

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA -
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**

**FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

HENRIQUE MOLINA BARRADAS

**PROTEÇÃO ADAPTATIVA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO
MODERNAS: PROPOSTA DE UM NOVO MÉTODO PARA
ESTIMAÇÃO DAS CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO BASEADO
EM LÓGICA FUZZY E EQUAÇÕES ANALÍTICAS GENÉRICAS**

**Ilha Solteira
2022**

HENRIQUE MOLINA BARRADAS

**PROTEÇÃO ADAPTATIVA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO
MODERNAS: PROPOSTA DE UM NOVO MÉTODO PARA
ESTIMAÇÃO DAS CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO BASEADO
EM LÓGICA FUZZY E EQUAÇÕES ANALÍTICAS GENÉRICAS**

Tese apresentada à Faculdade de
Engenharia do Câmpus de Ilha
Solteira –UNESP para a obtenção
do título de doutor em Engenharia
Elétrica.

Área de concentração: automação.

Prof. Dr. Fábio Berthequini Leão
Orientador

**Ilha Solteira
2022**

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

B269p Barradas, Henrique Molina.
Proteção adaptativa em redes de distribuição modernas: proposta de um novo método para estimação das correntes de curto-circuito baseado em lógica fuzzy e equações analíticas genéricas / Henrique Molina Barradas. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2022
208 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2022

Orientador: Fábio Bertequini Leão
Inclui bibliografia

1. Geradores distribuídos. 2. Curto-circuito. 3. Sistema de distribuição de energia elétrica. 4. Lógica fuzzy.


Raiane da Silva Santos

Supervisora Técnica de Seção
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CUB-8 - 999



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: Proteção adaptativa em redes de distribuição modernas: proposta de um novo método para estimação das correntes de curto-circuito baseado em Lógica Fuzzy e equações analíticas genéricas

AUTOR: HENRIQUE MOLINA BARRADAS

ORIENTADOR: FABIO BERTEQUINI LEÃO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em ENGENHARIA ELÉTRICA, área: Automação pela Comissão Examinadora:

Fabio Bertequini Leão

Prof. Dr. FABIO BERTEQUINI LEÃO (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Jose Roberto Sanches Mantovani
Prof. Dr. JOSE ROBERTO SANCHES MANTOVANI (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Carlos Roberto Minussi
Prof. Dr. CARLOS ROBERTO MINUSSI (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Fernanda Caseno Trindade
Profa. Dra. FERNANDA CASENO TRINDADE ARIOLI (Participação Virtual)
Departamento de Sistemas de Energia Elétrica / Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Benvido Rodrigues Pereira Júnior
Prof. Dr. BENVINDO RODRIGUES PEREIRA JÚNIOR (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Elétrica / Escola de Engenharia de São Carlos - USP

Ilha Solteira, 30 de setembro de 2022

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a DEUS por ter me abençoado e me dado forças para chegar até aqui.

Agradeço aos meus pais, ILIDIO CARLOS BARRADAS E MARA MOLINA BARRADAS por me derem a oportunidade de estudar e ficarem sempre ao meu lado nos momentos mais difíceis da minha vida.

Agradeço também ao meu irmão, HEITOR MOLINA BARRADAS, por me apoiar sempre.

Agradeço também a minha esposa, LILIAN PEREIRA RIBEIRO DA SILVA, POR ESTAR AO MEU LADO NESTA JORNADA, uma jornada difícil de muitas restrições, alegrias e tristezas. Ela tem se mostrado meu porto seguro.

Agradeço ao meu orientador, o PROFESSOR DOUTOR FÁBIO BERTEQUINI LEÃO, por estar sempre presente. Uma pessoa fantástica, que me acompanha desde a graduação e que não mediu esforços para me trazer até aqui. Levo a certeza de que eu tive o melhor orientador e, além disso, uma pessoa ímpar na minha vida.

Meus agradecimentos a todo o grupo de pesquisa do LaPSEE (Laboratório de Pesquisa em Sistemas de Energia Elétrica), especialmente aos professores, por sua dedicação aos nossos trabalhos de pesquisa. As vivências com a equipe foram muito construtivas. Finalmente, agradeço à CAPES e à FAPESP (sob processo nº 2015/21972-6) pelo inestimável apoio financeiro durante o meu doutorado, financiando esta pesquisa. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

Nos últimos anos houve um crescimento acentuado na inserção de Geradores Distribuídos (GDs), principalmente geradores fotovoltaicos conectados no sistema de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE). Dentre os impactos causados devido à inserção dos GDs nos SDEE, podem-se citar alguns positivos como a melhoria do perfil de tensão e a redução das perdas elétricas do sistema em alguns casos, mas também alguns impactos negativos como o aumento dos níveis de curto-circuito e a possibilidade da inversão no sentido dos fluxos de correntes que podem causar problemas na coordenação e seletividade da proteção. Dentre as soluções propostas na literatura, a proteção adaptativa é uma das mais interessantes devido à possibilidade de adaptação do sistema de proteção às diferentes condições do SDEE em termos de topologia, cargas e inserção de GDs. Para tanto, é necessário que o estado do SDEE seja obtido em situações em que a condição de topologia, cargas e gerações são suficientes para alterar os níveis e sentidos dos curtos-circuitos nos alimentadores necessitando que os parâmetros da proteção sejam atualizados para garantir a atuação dos dispositivos de proteção de forma coordenada e seletiva. Nesta tese é proposto um método para estimar de forma online as correntes de curto-circuito em SDEE considerando a inserção de GDs e adaptar a proteção existente. O método é baseado na primeira (PLK) e segunda (SLK) Leis de Kirchhoff e em Lógica Fuzzy (LF). O método proposto é capaz de obter as correntes de curto-circuito que circulam nos alimentadores do SDEE utilizando dados pré-falta e os parâmetros elétricos da rede, possibilitando a adaptação da proteção antes que o curto-circuito ocorra. Os resultados demonstram que o método desenvolvido é eficaz tanto para estimar a corrente injetada pelos GDs quanto para obtenção da variação da corrente de curto-circuito dos alimentadores do SDEE. A partir dos resultados obtidos por meio de simulações realizadas no DIGSILENT, observam-se erros absolutos inferiores a 60 ampéres no pior caso. Portanto os resultados demonstram uma perspectiva confiante na utilização do método proposto para a adaptação da proteção de SDEE modernos.

Palavras-chave: geradores distribuídos; curto-circuito; sistema de distribuição de energia elétrica; lógica fuzzy.

ABSTRACT

In recent years there has been growing the insertion of Distributed Generators (DGs), mainly photovoltaic generators connected to the Electric Power Distribution system (SDEE). Among the impacts caused by the insertion of DGs in the SDEE, some positive ones can be mentioned, such as the improvement of the voltage profile and the reduction of electrical losses in the system, but also some negative impacts such as the increase in short-circuit levels and the possibility of reverse current flows direction that can cause problems in the coordination and selectivity of the protection. Among the solutions proposed in the literature, adaptive protection is one of the most interesting due to the possibility of adapting the protection system to different conditions of the SDEE in terms of topology, loads and insertion of DGs. Therefore, it is necessary that the status of the SDEE is obtained in situations where the topology condition, loads and generations are sufficient to change the levels and directions of the short-circuits in the feeders, requiring the protection parameters to be updated to guarantee the performance of protective devices in a coordinated and selective manner. In this thesis, a new method is proposed to estimate online short-circuit currents in SDEE considering the insertion of DGs and adapt the existing protection. The method is based on the first (FKL) and second (SKL) Kirchhoff laws and on Fuzzy Logic (FL). The proposed method is able to obtain the short-circuit currents that circulate in the SDEE feeders using pre-fault data and the electrical parameters of the network, allowing the adaptation of the protection before the short-circuit occurs. The results demonstrate that the method developed is effective both to estimate the current injected by the DGs and to obtain the variation of the short-circuit current of the SDEE feeders. From the results obtained through simulations carried out in DIGSILENT, absolute errors lower than 60 amps in the worst case are observed. Therefore, the results demonstrate a confident perspective in the use of the proposed method for adapting the protection of modern SDEE.

Keywords: distributed generators; short-circuit; electricity distribution system; fuzzy logic.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Dados de Potência Instalada no Brasil por ano considerando Gerações Distribuídas.....	20
Figura 2: Ilustração da inserção de GD e possível redução da corrente em R1.....	22
Figura 3: Ilustração da perda de coordenação e seletividade.....	22
Figura 4: Resumo das propostas encontradas para a proteção do SDEE quando há GDs conectadas.....	24
Figura 5: Sistema elétrico utilizado para a obtenção do modelo matemático sem GD e ZF conectada na barra 1.....	35
Figura 7: Ilustração do sistema elétrico equivalente para a aplicação do método desenvolvido.	42
Figura 8: Sistema utilizado para validação das equações obtidas na seção 3.1.....	43
Figura 9: Função de pertinência para a corrente injetada pelo GF em regime permanente.....	50
Figura 10: Função de pertinência para a potência ativa injetada pela GF em regime permanente.....	50
Figura 11: Função de pertinência para a tensão, em regime permanente, na barra onde o GF está conectado.....	51
Figura 12: Função de pertinência para a distância entre a barra que a GF está conectada e a barra em falta.....	51
Figura 13: Função de pertinência para a resistência de falta.....	52
Figura 14: Função de pertinência para corrente injetada pela GF.....	52
Figura 15: Função de pertinência para a tensão em regime permanente na barra onde o GA está conectado.....	68
Figura 16: Função de pertinência para a distância entre a barra que o GA está conectada e a barra em curto-circuito..	69
Figura 17: Função de pertinência para corrente injetada pela GA.....	69

Figura 18: Diagrama de blocos referente a aplicação da Lógica Fuzzy com as Equações analíticas....	95
Figura 19: Sistema 13 barras do IEEE adaptado. .	169
Figura 20: Fluxograma do método completo.	182
Figura 21: Representação do sistema de 135 barras com o respectivo alimentador principal e suas ramificações..	183
Figura 22: Zonas de proteção dos relés....	184
Figura 23: Coordenograma da proteção de fase e neutro para o sistema de 135 barras sem GD.....	184
Figura 24: Coordenograma da proteção de fase e neutro para o sistema de 135 barras considerando 5 GDs.....	190
Figura 25: Coordenograma da proteção de fase e neutro para o sistema de 135 barras considerando 13 GDs.....	192

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resumo das diferenças entre os artigos abordados e a proposta deste trabalho.....	30
Tabela 2: Dados do sistema da Figura 9....	43
Tabela 3: Variação da corrente de curto-circuito nos ramos do SDEE para um curto-circuito trifásico com $Z_f = 0 \Omega$ na barra 4 - DIGSILENT®	44
Tabela 4: Variação da corrente de curto-circuito nos ramos do SDEE para um curto-circuito trifásico com $Z_f = 0 \Omega$ na barra 4 –equações propostas..	44
Tabela 5: Erro absoluto da variação da corrente nas linhas devido ao curto-circuito trifásico com $Z_f = 0 \Omega$ na barra 4.....	44
Tabela 6: Variação da corrente de curto-circuito nos ramos do SDEE para um curto-circuito trifásico com $Z_f = 0 \Omega$ na barra 2 - DIGSILENT®	45
Tabela 7: Variação da corrente de curto-circuito nos ramos do SDEE para um curto-circuito trifásico com $Z_f = 0 \Omega$ na barra 2 - Método Proposto.....	45
Tabela 8: Erro absoluto da variação da corrente nas linhas devido ao curto-circuito trifásico com $Z_f = 0 \Omega$ na barra 2.....	45
Tabela 9: Variação da corrente de curto-circuito nos ramos do SDEE para um curto-circuito monofásico com $Z_f = 10 \Omega$ na barra 4 - DIGSILENT®	46
Tabela 10: Variação da corrente de curto-circuito nos ramos do SDEE para um curto-circuito monofásico com $Z_f = 10 \Omega$ na barra 4 - Método Proposto...	46
Tabela 11: Erro absoluto da variação da corrente nas linhas devido ao curto-circuito monofásico com $Z_f = 0 \Omega$ na barra 4..	46
Tabela 12: Regras para curto-circuito trifásico referentes ao GF.....	53
Tabela 13: Regras para curto-circuito bifásico referentes ao GF.....	54
Tabela 14: Regras para curto-circuito monofásico referentes ao GF.....	55
Tabela 15: Cenários para os testes com curto-circuito trifásica para o GF.....	57
Tabela 16: Valores obtidos com o DIGSILENT® para formar a entrada do modelo Fuzzy do GF para curto-circuito trifásico.....	58
Tabela 17: Variáveis linguísticas referentes aos dados de entrada do GF para o curto-circuito trifásica.....	59

Tabela 18: Dados referentes as correntes injetadas pelo GF obtidos com o modelo Fuzzy e com o DIGSILENT® para curto-circuito trifásico....	60
Tabela 19: Cenário para os testes com curto-circuito bifásico para o GF.....	61
Tabela 20: Valores obtidos com o DIGSILENT® para formar a entrada do modelo Fuzzy do GF para curto-circuito bifásico... ..	62
Tabela 21: Variáveis linguísticas referentes aos dados de entrada do GF para o curto-circuito bifásico.....	62
Tabela 22: Dados referentes a corrente injetada pelo GF obtidos com o modelo Fuzzy e com o DIGSILENT® para curto-circuito bifásico.. ..	63
Tabela 23: Cenário para os testes de curto-circuito monofásico para o GF.	65
Tabela 24: Valores obtidos com o DIGSILENT® para formar a entrada do modelo Fuzzy do GF para curto-circuito monofásico.....	65
Tabela 25: Variáveis linguísticas referentes aos dados de entrada do GF para curto-circuito monofásico.....	66
Tabela 26: Dados referentes a corrente injetada pelo GF obtidos com o modelo Fuzzy e com o DIGSILENT® para curto-circuito monofásico.....	67
Tabela 27: Regras para o curto-circuito Trifásico referentes ao GA.....	70
Tabela 28: Regras para o curto-circuito bifásico referente ao GA.....	71
Tabela 29: Regras para curto-circuito monofásico referente ao GA.....	72
Tabela 30: Cenário para os testes de curto-circuito trifásico para o GA.....	74
Tabela 31: Valores obtidos com o DIGSILENT® para formar a entrada do modelo Fuzzy do GA para o curto-circuito trifásica.....	75
Tabela 32: Variáveis linguísticas referentes aos dados de entrada do GA para o curto-circuito trifásico.....	75
Tabela 33: Dados referente a corrente injetada pelo GA obtidos com o modelo Fuzzy e com o DIGSILENT® para o curto-circuito trifásico.....	76
Tabela 34: Cenário para os testes de curto-circuito bifásico para o GA.....	77
Tabela 35: Valores obtidos com o DIGSILENT® para formar a entrada do modelo Fuzzy do GA para curto-circuito bifásico.....	78
Tabela 36: Variáveis linguísticas referente aos dados de entrada do GA para curto-circuito bifásico.....	78

Tabela 37: Dados referente a corrente injetada pelo GA obtidos com o modelo Fuzzy e com o DIGSILENT® para curto-circuito bifásico.....	79
Tabela 38: Cenário para os testes de curto-circuito monofásico para o GA.....	80
Tabela 39: Valores obtidos com o DIGSILENT® para formar a entrada do modelo Fuzzy do GA para curto-circuito monofásico.....	81
Tabela 40: Variáveis linguísticas referentes aos dados de entrada do GA para a curto-circuito monofásico.....	82
Tabela 41: Dados referentes as correntes injetadas pelos GAs obtidos com o modelo Fuzzy e com o DIGSILENT® para curto-circuito monofásico.....	83
Tabela 42: Cenário para os testes de curto-circuito trifásico para o DFIG.....	85
Tabela 43: Valores obtidos com o DIGSILENT® para formar a entrada do modelo Fuzzy do DFIG para curto-circuito trifásico.....	85
Tabela 44: Variáveis linguísticas referente aos dados de entrada do DFIG para curto-circuito trifásico.....	86
Tabela 45: Dados referentes a corrente injetada pelo DFIG obtidos com o modelo Fuzzy e com o DIGSILENT® para curto-circuito trifásico.....	87
Tabela 46: Cenário para os testes de curto-circuito bifásico para o DFIG.....	88
Tabela 47: Valores obtidos com o DIGSILENT® para formar a entrada do modelo Fuzzy do DFIG para curto-circuito bifásico.....	89
Tabela 48: Variáveis linguísticas referente aos dados de entrada do DFIG para o curto-circuito bifásico.....	89
Tabela 49: Dados referente a corrente injetada pelo DFIG obtidos com o modelo Fuzzy e com o DIGSILENT® para curto-circuito bifásico.....	90
Tabela 50: Cenário para os testes de curto-circuito monofásico para o DFIG.....	91
Tabela 51: Valores obtidos com o DIGSILENT® para formar a entrada do modelo Fuzzy do DFIG para o curto-circuito monofásico.....	92
Tabela 52: Variáveis linguísticas referente aos dados de entrada do DFIG para o curto-circuito monofásico.....	92
Tabela 53: Dados referentes a corrente injetada pelo DFIG obtidos com o modelo Fuzzy e com o DIGSILENT® para o curto-circuito monofásico.....	93
Tabela 54: Cenários para validar o método completo para o curto-circuito trifásico com GFs conectados.....	97

Tabela 55: Valores obtidos com o DIGSILENT® para formar a entrada da Lógica Fuzzy para o curto-circuito trifásico com GF conectado.....	98
Tabela 56: Variáveis linguísticas referentes aos dados de entrada da Lógica Fuzzy para o curto-circuito trifásico com GF conectado.....	99
Tabela 57: Dados referente ao resultado da Lógica Fuzzy para o curto-circuito trifásico com GF conectados comparados com valores do DIGSILENT®.....	100
Tabela 58: Módulos obtidos da Lógica Fuzzy e ângulos utilizados nas equações (31), (32) e (33) para o curto-circuito trifásico com GFs conectados.....	101
Tabela 59: Resultado das equações (31), (32) e (33) para o curto-circuito trifásico com GFs conectados em cada teste.....	102
Tabela 60: Resultados da variação da corrente nas linhas do SDEE obtidos através do DIGSILENT® para o curto-circuito trifásico com GFs conectados em cada teste.....	103
Tabela 61: Valores do erro absoluto da variação da corrente nas linhas do sistema elétrico contendo GF conectado devido ao curto-circuito trifásico.....	103
Tabela 62: Valor da corrente em cada linha obtida através da equação (21), com GF conectado, para um curto-circuito trifásico.....	104
Tabela 63: Valor da corrente em cada linha obtida através do DIGSILENT, com GF conectado para um curto-circuito trifásico.....	105
Tabela 64: Valor do erro absoluto referente à corrente em cada linha do sistema quando há GF conectado e sob um curto-circuito trifásico.....	105
Tabela 65: Cenários para validar o método completo para curto-circuito bifásico entre as fases A e B com GFs conectados.....	106
Tabela 66: Valores obtidos com o DIGSILENT® para formar a entrada do método completo para curto-circuito bifásico com GF conectado.....	107
Tabela 67: Variáveis linguísticas referente aos dados de entrada da Lógica Fuzzy para curto-circuito bifásico com GF conectado.....	108
Tabela 68: Dados referentes aos resultados da Lógica Fuzzy para um curto-circuito bifásico com GF conectados comparados com os valores do DIGSILENT®.....	109
Tabela 69: Valor do módulo e ângulo utilizado nas equações (31), (32) e (33) para um curto-circuito bifásico com GFs conectados em cada teste.....	110
Tabela 70: Resultado das equações (31), (32) e (33) para um curto-circuito bifásico com GFs conectados em cada teste.....	111

Tabela 71: Resultado da variação da corrente de curto-circuito nas linhas obtidos através do DIGSILENT® para um curto-circuito bifásico com GFs conectados em cada teste.....	112
Tabela 72: Valores do erro absoluto da variação da corrente de curto-circuito nas linhas do sistema elétrico contendo GF conectado devido a um curto-circuito bifásico.....	113
Tabela 73: Valor da corrente de curto-circuito em cada linha obtida através da equação (21), com GF conectado, para um curto-circuito bifásico.....	114
Tabela 74: Valor da corrente de curto-circuito em cada linha obtida através do DIGSILENT®, com GF conectado, para um curto-circuito bifásico.....	115
Tabela 75: Valor do erro absoluto referente à corrente de curto-circuito em cada linha do sistema quando há GF conectado e sob curto-circuito bifásico.....	116
Tabela 76: Resultados para a substituição do valor da corrente do GF em regime permanente na fase C.....	116
Tabela 77: Cenários para validar o método completo para o curto-circuito monofásico com GFs conectados.....	117
Tabela 78: Valores obtidos com o DIGSILENT® para formar a entrada da LF o curto-circuito monofásico com GF conectado.....	118
Tabela 79: Variáveis linguísticas referente aos dados de entrada da LF para o curto-circuito monofásico com GF conectado.....	118
Tabela 80: Dados referentes ao resultado da lógica Fuzzy do método completo para um curto-circuito monofásico com GF conectados comparados com valores do DIGSILENT®.....	119
Tabela 81: Valor do módulo e ângulo utilizado nas equações (31), (32) e (33) para um curto-circuito monofásico com GFs conectados em cada teste.....	120
Tabela 82 Resultado das equações (31), (32) e (33) para um curto-circuito monofásico com GFs conectados em cada teste.....	121
Tabela 83: Resultado da variação da corrente nas linhas obtidos através do DIGSILENT® para um curto-circuito monofásico com GFs conectados em cada teste.....	121
Tabela 84: Valores do erro absoluto da variação da corrente nas linhas do sistema elétrico contendo GF conectado devido a um curto-circuito monofásico.....	122

Tabela 85: Valor da corrente em cada linha obtida através da equação (21), com GF conectado, para o curto-circuito monofásico.....	123
Tabela 86: Valor da corrente em cada linha obtida através do DIGSILENT®, com GF conectado, para o curto-circuito monofásico.....	124
Tabela 87: Valor do erro absoluto referente à corrente em cada linha do sistema quando há GF conectado e sob o curto-circuito monofásico.....	125
Tabela 88: Valor do módulo e ângulo utilizado nas equações (31), (32) e (33) para um curto-circuito trifásico com GAs conectados em cada teste.....	126
Tabela 89: Resultado das equações (31), (32) e (33) para um curto-circuito trifásico com GAs conectados em cada teste.....	127
Tabela 90: Resultado da variação da corrente nas linhas obtidos através do DIGSILENT® para um curto-circuito trifásico com GAs conectados em cada teste.....	128
Tabela 91: Valores do erro absoluto da variação da corrente nas linhas do sistema elétrico contendo GA conectado devido ao curto-circuito trifásico.....	129
Tabela 92: Valor da corrente em cada linha obtida através da equação (21), com GA conectado, para o curto-circuito trifásico.....	130
Tabela 93: Valor da corrente em cada linha obtida através do DIGSILENT®, com GA conectado, para o curto-circuito trifásico.....	131
Tabela 94: Valor do erro absoluto referente à corrente em cada linha do sistema quando há GA conectado e sob um curto-circuito trifásico.....	132
Tabela 95: Valor do módulo e ângulo utilizado nas equações (31), (32) e (33) para um curto-circuito bifásico com GAs conectados em cada teste.....	133
Tabela 96: Resultado das equações (31), (32) e (33) para um curto-circuito bifásico com GAs conectados em cada teste.....	134
Tabela 97: Resultado da variação da corrente nas linhas obtidos através do DIGSILENT® para um curto-circuito bifásico com GAs conectados em cada teste....	135
Tabela 98: Valores do erro absoluto da variação da corrente de curto-circuito nas linhas do sistema elétrico contendo GA conectado devido ao curto-circuito bifásico.....	136
Tabela 99: Valor da corrente de curto-circuito em cada linha obtida através da equação (21), com GA conectado, para o curto-circuito bifásico.....	137
Tabela 100: Valor da corrente de curto-circuito em cada linha obtida através do DIGSILENT®, com GA conectado, para o curto-circuito bifásico.....	138

Tabela 101: Valor do erro absoluto referente à corrente de curto-circuito em cada linha do sistema quando há GA conectado e sob um curto-circuito bifásico.....	139
Tabela 102: Resultados para a substituição do valor da corrente do GA em regime permanente na fase C.....	140
Tabela 103: Valor do módulo e ângulo utilizado nas equações (31), (32) e (33) para um curto-circuito monofásico com GAs conectados em cada teste.....	141
Tabela 104: Resultado das equações (31), (32) e (33) para um curto-circuito monofásico com GAs conectados em cada teste.....	142
Tabela 105: Resultados da variação da corrente de curto-circuito nas linhas obtidos através do DIGSILENT® para um curto-circuito monofásico com GAs conectados em cada teste.....	143
Tabela 106: Valores do erro absoluto da variação da corrente de curto-circuito nas linhas do sistema elétrico contendo GA conectado devido a um curto-circuito monofásico.....	147
Tabela 107: Valor da corrente em cada linha obtida através da equação (21), com GA conectado, para o curto-circuito monofásico.....	145
Tabela 108: Valor da corrente de curto-circuito em cada linha obtida através do DIGSILENT®, com GA conectado, para um curto-circuito monofásico.....	146
Tabela 109: Valor do erro absoluto referente à corrente de curto-circuito em cada linha do sistema quando há GA conectado e sob um curto-circuito monofásico.....	147
Tabela 110: Valor do módulo e ângulo utilizado nas equações (31), (32) e (33) para um curto-circuito trifásico com DFIGs conectados em cada teste.....	148
Tabela 111: Resultado das equações (31), (32) e (33) para um curto-circuito trifásico com DFIGs conectados em cada teste.....	149
Tabela 112: Resultado da variação da corrente de curto-circuito nas linhas obtidos através do DIGSILENT® para um curto-circuito trifásico com DFIGs conectados em cada teste.....	150
Tabela 113: Valores do erro absoluto da variação da corrente nas linhas do sistema elétrico contendo DFIG conectado devido a uma falta trifásica.....	151
Tabela 114: Valor da corrente em cada linha obtida através da equação (21), com DFIG conectado, para um curto-circuito trifásico.....	152
Tabela 115: Valor da corrente de curto-circuito em cada linha obtida através do DIGSILENT®, com DFIG conectado, para curto-circuito trifásico.....	153

Tabela 116: Valor do erro absoluto referente à corrente de curto-circuito em cada linha do sistema quando há DFIG conectado e sob um curto-circuito trifásico.....	154
Tabela 117: Valor do módulo e ângulo utilizado nas equações (31), (32) e (33) para um curto-circuito bifásico com DFIGs conectados em cada teste.....	155
Tabela 118: Resultado das equações (31), (32) e (33) para um curto-circuito bifásico com DFIGs conectados em cada teste.....	156
Tabela 119: Resultado da variação da corrente de curto-circuito nas linhas obtidos através do DIGSILENT® para um curto-circuito bifásico com DFIGs conectados em cada teste.....	157
Tabela 120: Valores do erro absoluto da variação da corrente de curto-circuito nas linhas do sistema elétrico contendo DFIG conectado devido a um curto-circuito bifásico.....	158
Tabela 121: Valor da corrente de curto-circuito em cada linha obtida através da equação (21), com DFIG conectado, para o curto-circuito bifásico.....	159
Tabela 122: Valor da corrente em cada linha obtida através do DIGSILENT®, com DFIG conectado, para o curto-circuito bifásico.....	160
Tabela 123: Valor do erro absoluto referente à corrente em cada linha do sistema quando há DFIG conectado e sob um curto-circuito bifásico.....	161
Tabela 124: Resultados para a substituição do valor da corrente do DFIG em regime permanente na fase C.....	162
Tabela 125: Valor do módulo e ângulo utilizado nas equações (31), (32) e (33) para o curto-circuito monofásico com DFIGs conectados em cada teste.....	163
Tabela 126: Resultado das equações (31), (32) e (33) para o curto-circuito monofásico com DFIGs conectados em cada teste.....	163
Tabela 127: Resultado da variação da corrente de curto-circuito nas linhas obtidos através do DIGSILENT® para o curto-circuito monofásico com DFIGs conectados em cada teste.....	164
Tabela 128: Valores do erro absoluto da variação da corrente de curto-circuito nas linhas do sistema elétrico contendo DFIG conectado devido ao curto-circuito monofásico.....	165
Tabela 129: Valor da corrente de curto-circuito em cada linha obtida através da equação (21), com DFIG conectado, para um curto-circuito monofásico.....	166
Tabela 130: Valor da corrente de curto-circuito em cada linha obtida através do DIGSILENT®, com DFIG conectado, para o curto-circuito monofásico.....	167

Tabela 131: Valor do erro absoluto referente à corrente em cada linha do sistema quando há DFIG conectado e sob o curto-circuito monofásico.....	168
Tabela 132: Cenários para os testes com o sistema de 13 barras do IEEE.....	169
Tabela 133: Descrição dos geradores distribuídos que foram utilizados nos testes.....	170
Tabela 134: Valores obtidos com o DIGSILENT® para formar a entrada do modelo completo para os seis cenários.....	171
Tabela 135: Variáveis linguísticas referentes aos dados de entrada do modelo completo para os 6 cenários.....	172
Tabela 136: Dados referentes ao resultado da lógica Fuzzy do modelo completo, para os 6 cenários, comparados com valores do DIGSILENT®.....	173
Tabela 137: Valor do módulo e ângulo utilizado nas equações (31), (32) e (33) para os 6 cenários.....	174
Tabela 138: Resultado das equações (31), (32) e (33) com GDs conectados para os seis cenários.....	175
Tabela 139: Resultados da variação da corrente nas linhas obtidos através do DIGSILENT®, com GDs conectados, para os seis cenários.....	176
Tabela 140: Valores do erro absoluto da variação da corrente de curto-circuito nas linhas do sistema elétrico contendo GD conectado para os seis cenários.....	177
Tabela 141: Magnitude das correntes em cada linha/seção do tronco principal do sistema de 13 barras do IEEE empregando o método completo para os seis cenários.....	178
Tabela 142: Magnitude das correntes em cada linha/seção do tronco principal do sistema de 13 barras do IEEE empregando o DIGSILENT para os seis cenários.....	179
Tabela 143: Erro absoluto entre as correntes obtidas a partir do método completo e as obtidas a partir do DIGSILENT para os seis cenários	180
Tabela 144: Dados das GDs conectadas no sistema de 135 barras.....	185
Tabela 145: Cenários para determinar a variação da corrente nas linhas onde os relés estão.....	186
Tabela 146: Atualização da corrente de curto-circuito de projeto para observar se o delta I é de crescimento ou diminuição para os 3 relés com 8 GDs.....	187
Tabela 147: Adaptação da proteção com todas as GDs conectados.....	187
Tabela 148: Atualização da corrente de curto-circuito de projeto para observar se o delta I é de crescimento ou diminuição para os 3 relés com 5 GDs.....	188

Tabela 149: Adaptação da proteção sem as GFs conectados.....	189
Tabela 150: Descrição das 13 GDs conectadas no sistema elétrico	191
Tabela 151: Obtenção das novas correntes de <i>pick-up</i>	191

SUMÁRIO

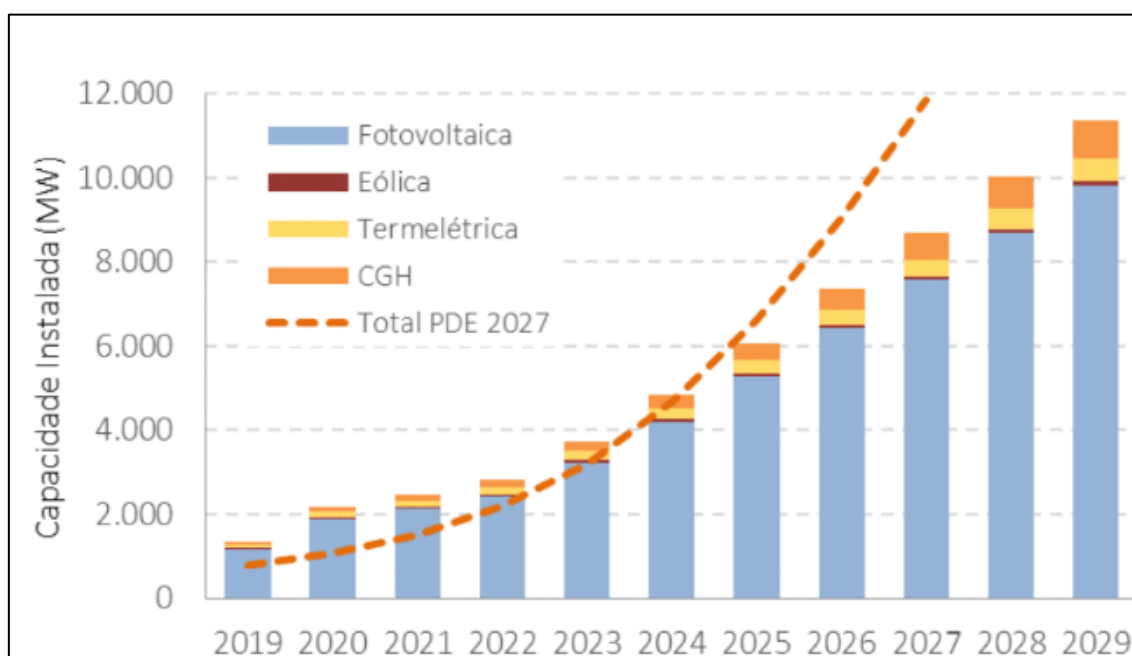
1	INTRODUÇÃO	20
2	LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO	24
2.1	PROTEÇÃO ADAPTATIVA EM SDEES CONSIDERANDO A INSERÇÃO DE GDs.....	25
2.2	LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO SOBRE EQUACIONAMENTO E CONTRIBUIÇÃO DOS GDS DURANTE UMA FALTA	31
2.1.1	Geradores fotovoltaicos (GFs)	31
2.2.2	Geradores assíncronos.....	32
2.2.3	Geradores de indução duplamente alimentados (DFIGs).....	33
3	MODELO MATEMÁTICO PARA ESTIMAÇÃO DAS CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO EM SDEE CONSIDERANDO A INSERÇÃO DE GD.....	34
3.1	EQUAÇÕES PARA ESTIMAÇÃO DAS CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO	34
3.1.1	Validação das equações propostas para o cálculo das correntes de curto-circuito considerando a inserção de GDs.....	43
4	DESENVOLVIMENTO DOS MODELOS DOS GERADORES DISTRIBUÍDOS.....	48
4.1	GERADORES FOTOVOLTAICOS (GFS)	48
4.1.1	Validação da modelagem do gerador fotovoltaico.....	56
4.1.1.1	Curto-circuito trifásico.....	56
4.1.1.2	Curto-circuito bifásico.....	60
4.1.1.3	Curto-circuito monofásico.....	63
4.2	MODELO PARA O GERADOR ASSÍNCRONO (GA).....	67
4.2.1	Validação do modelo do gerador assíncrono (GA).....	73
4.2.1.1	Curto-circuito trifásico.....	73
4.2.1.2	Curto-circuito bifásico.....	76
4.2.1.3	Curto-circuito monofásico.....	79
4.3	MODELO PARA O GERADOR DE INDUÇÃO DUPLAMENTE ALIMENTADO (DFIG).....	83
4.3.1	Validação do modelo fuzzy para o gerador de indução duplamente alimentado.....	84
4.3.1.1	Curto-circuito trifásico.....	84
4.3.1.2	Curto-circuito bifásico.....	87
4.3.1.3	Curto-circuito monofásico	90

4.4	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA ESTIMAÇÃO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO INJETADA PELOS GDS NO SDEE OBTIDOS ATRAVÉS DA MODELAGEM FUZZY.....	93
4.5	INTEGRAÇÃO DA LÓGICA FUZZY COM AS EQUAÇÕES ANALÍTICAS.....	94
5	TESTES E RESULTADOS PARA A APLICAÇÃO DA LÓGICA FUZZY COM AS EQUAÇÕES ANALÍTICAS – MÉTODO LF-EA.....	96
5.1	TESTES E RESULTADOS PARA O SDEE COM INSERÇÃO DE GFs.....	96
5.1.1	Curto-circuito trifásico.....	96
5.1.2	Curto-circuito bifásico.....	106
5.1.3	Curto-circuito monofásico.....	117
5.2	TESTES E RESULTADOS PARA O SDEE COM INSERÇÃO de GAs.....	125
5.2.1	Curto-circuito trifásico.....	125
5.2.2	Curto-circuito bifásico.....	132
5.2.3	Curto-circuito monofásico.....	141
5.3	TESTES E RESULTADOS PARA O SDEE COM INSERÇÃO DE DFIGs.....	147
5.3.1	Curto-circuito trifásico.....	147
5.3.2	Curto-circuito bifásico.....	154
5.3.3	Curto-circuito monofásico.....	162
5.4	VALIDAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO UTILIZANDO O SISTEMA DE 13 BARRAS DO IEEE.....	168
6	APLICAÇÃO DO MÉTODO COMPLETO.....	181
6.1	TESTES COM UM SISTEMA REAL BRASILEIRO.....	183
7	CONCLUSÃO.....	193
	TRABALHOS FUTUROS	194
	REFERÊNCIAS.....	195
	APÊNDICE	201

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos percebeu-se um aumento exponencial do número de Geradores Distribuídos (GDs), principalmente geradores fotovoltaicos e geradores eólicos que utilizam de fontes primárias intermitentes conectados ao sistema de baixa e média tensão (ANEEL, 2017), Figura 1. Em quase sua totalidade eles se classificam em micro e mini geração, ou seja, gerações com potência instalada abaixo de 75 kW e entre 75 kW e 1 MW respectivamente (ANEEL, 2012). As microgerações são encontradas principalmente em residências, comércios e indústrias de pequeno porte. Já as minigerações são encontradas em indústrias de grande porte ou até mesmo em parques ou sítios de geração de energia. Além disso, a microgeração encontra-se conectada à baixa tensão e a minigeração à média tensão, de acordo com a resolução normativa da ANEEL nº 482 de 2012 (ANEEL, 2012).

Figura 1: Dados de Potência Instalada no Brasil por ano considerando Gerações Distribuídas.



Fonte: Dados obtidos de EPE 2020.

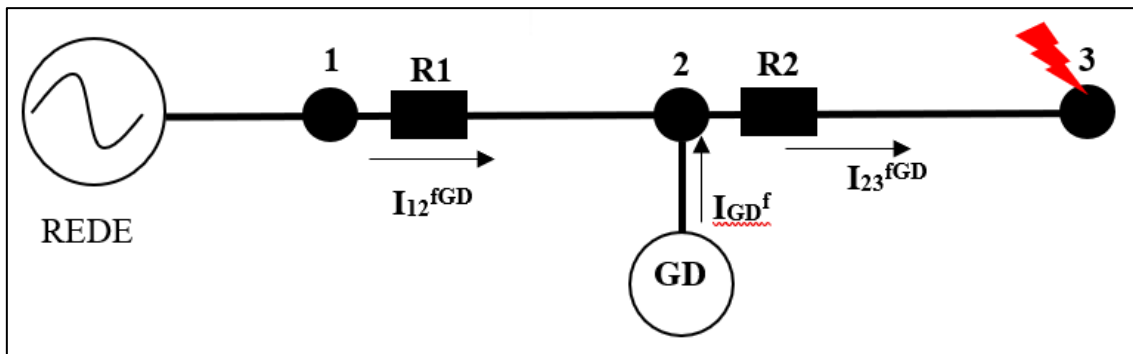
Esse cenário de crescimento no número de conexões de GD no sistema de distribuição de energia elétrica (SDEE) está relacionado a dois fatores principais: economia na fatura de energia e sustentabilidade do meio ambiente, principalmente do

ponto de vista do consumidor. Entretanto, quando se observa este cenário pelo lado da concessionária, tem-se, em alguns casos, a redução das perdas elétricas nos alimentadores da rede de distribuição de energia elétrica, uma melhora no perfil de tensão e a descentralização da matriz energética (ZHANG; YONG-LI, 2011; ZHAN, 2016; PRICA, 2017; HUSNAIN SADIQ, 2018).

No entanto, se o SDEE apresentar uma inserção elevada de GDs, as perdas elétricas nos cabos dos alimentadores podem aumentar e a tensão no sistema elétrico pode ultrapassar os limites máximos estabelecidos pelo PRODIST MÓDULO 8 (ANEEL, 2017). No caso de um curto-circuito, o sistema de proteção pode atuar de forma ineficiente levando a desligamentos desnecessários, ou, nos piores casos, a não atuação dos dispositivos de proteção (HONGXIA ZHAN, 2016; PRICA, 2017; HUSNAIN, 2018; COFFELE; DYŚKO, 2015; SHAOFEI, 2017). O número exato de GDs conectados ao SDEE para que estes problemas possam ser observados dependem de cada alimentador em questão (BARRADAS, 2018; BARRADAS, 2020).

Considerando os problemas causados no sistema de proteção do SDEE frente à ocorrência de uma falta, pode-se citar a não atuação da proteção, o falso *trip* e a perda de coordenação (TELUKUNTA, 2017). A não atuação da proteção pode ocorrer quando há a redução do alcance do relé de sobrecorrente devido a redução da corrente “sentida” pelo relé quando há a inserção de GD. Conforme a Figura 2, o relé R1 pode não atuar quando ele está localizado a montante de um GD e a falta localizada a jusante do GD, barra 3; neste caso, o GD contribui na corrente de curto-circuito e reduz a corrente de falta “sentida” por R1, podendo não sensibilizá-lo, ou seja, pontos mais próximos de R1 considerando o GD apresentam nível de curto-circuito equivalente a pontos mais distantes. O maior problema neste caso é que devido a redução do alcance da proteção, pontos na rede que antes causavam a atuação do relé podem não ser abrangidos pela zona de atuação determinada sem a inserção do GD. Ainda em relação a Figura 2, a inserção do GD, ao contrário de R1, pode causar um aumento na corrente de curto-circuito “sentida” por R2, reduzindo seu tempo de atuação o que implica em aumento do alcance de R2 (pontos mais distantes de R2 considerando o GD apresentam nível de curto-circuito equivalente a pontos mais próximos sem GD) o que poderia causar perda de seletividade da proteção devido a sobreposição de zonas de proteção principal.

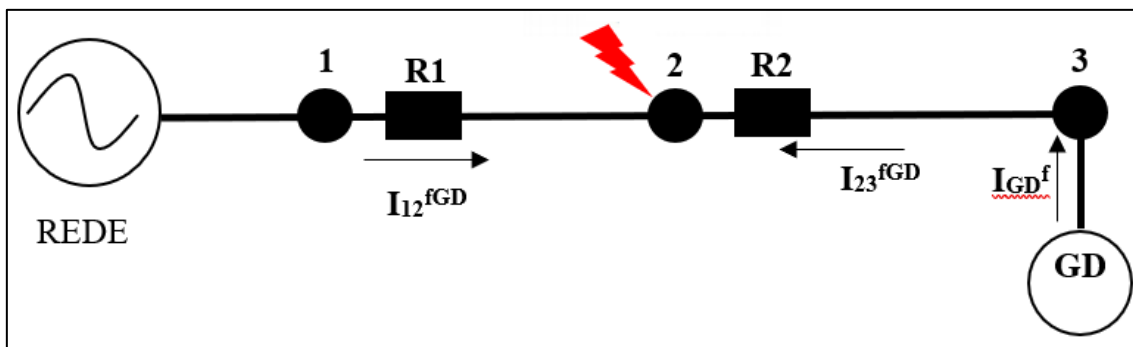
Figura 2: Ilustração da inserção de GD e possível redução da corrente em R1.



Fonte: Próprio autor.

Considerando o caso da Figura 3, a perda de coordenação e seletividade dos dispositivos de proteção pode ocorrer, por exemplo, em se tratando de uma falta na barra 2. Considerando que a proteção foi originalmente projetada para fluxo em sentido unidirecional (da fonte para as cargas), o fluxo reverso causado pelo GD pode fazer com que R2 atue de forma descoordenada com R1. Uma condição perigosa para o sistema e para as pessoas envolvidas é a situação em que R2 atue antes de R1 o que poderá causar um ilhamento não intencional da parte a jusante da rede. Se for considerado um curto-circuito na barra 1, é impossível obter coordenação e seletividade entre R1 e R2 considerando a proteção projetada para fluxo unidirecional.

Figura 3: Ilustração da perda de coordenação e seletividade.



Fonte: Próprio autor.

Considerando que tradicionalmente as curvas de atuação das proteção em SDEE são do tipo inversa, o deslocamento dos níveis de curto-circuito devido a inserção do GD dificulta a manutenção da coordenação e seletividade. Desta forma alguns trabalhos na literatura propõem o uso de curvas de tempo definido e a substituição da proteção de sobrecorrente por relés de sobrecorrente direcionais. Nestes casos a ideia é ajustar a

corrente de *pick-up* da dos relés e, em casos específicos, alterar o tempo de atuação das curvas.

Baseado no que foi exposto nesta tese é proposto um método para estimar de forma online as correntes de curto-circuito em SDEE considerando a inserção de GDs e adaptar a proteção existente. O método é baseado na primeira (PLK) e segunda (SLK) Leis de Kirchhoff e em Lógica Fuzzy (LF) (TERANO; ASAI; SUGENO, 1991).

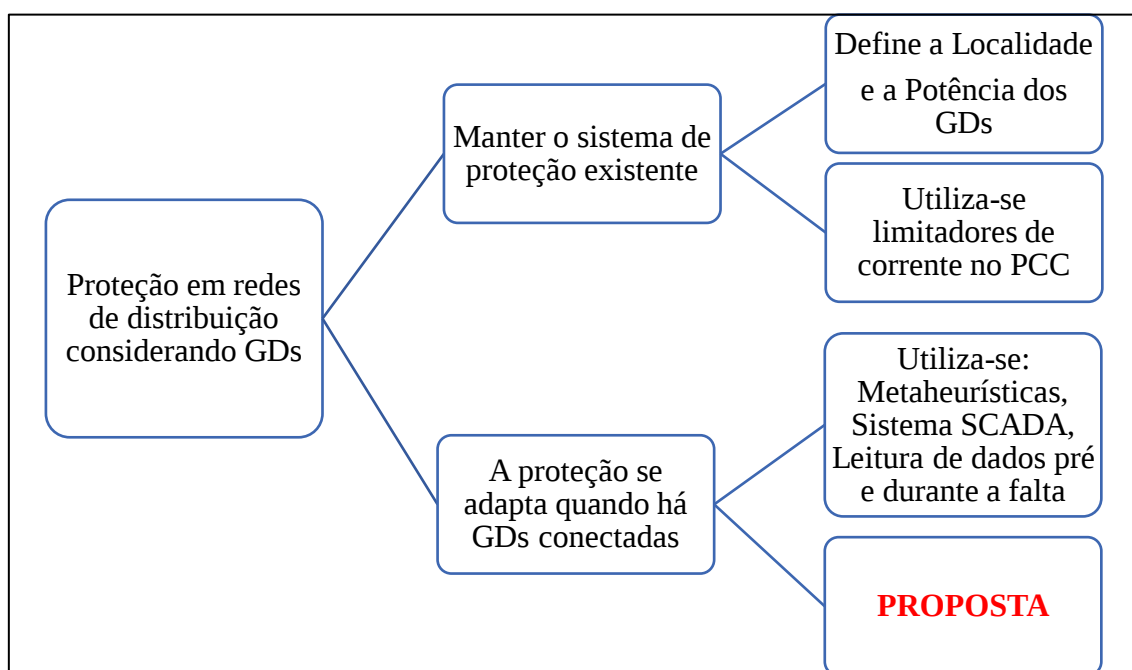
O método proposto é capaz de obter as correntes de curto-circuito que circulam nos alimentadores do SDEE utilizando dados pré-falta e os parâmetros elétricos da rede, possibilitando a adaptação da proteção antes que o curto-circuito ocorra.

2 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

2.1 PROTEÇÃO ADAPTATIVA EM SDEES CONSIDERANDO A INSERÇÃO DE GDS.

Nesta seção será realizado um levantamento de artigos que propõem a resolução do problema de coordenação no sistema de proteção quando há GDs conectados no SDEE. Além disso, será introduzida a proposta deste trabalho. Na Figura 5 pode-se observar um cronograma do conteúdo que será apresentado nesta seção.

Figura 4: Resumo das propostas encontradas para a proteção do SDEE quando há GDs conectadas.



Fonte: Próprio autor.

Tradicionalmente os SDEEs operam em topologia radial com fluxo de potência unidirecional no sentido da subestação para as cargas. Em vista deste paradigma, os sistemas de proteção são projetados para atuarem monitorando as correntes em um único sentido. Dependendo da potência e do ponto de inserção, os GDs podem causar alterações do fluxo de corrente (aumento/redução ou inversão) em pontos onde há dispositivos de proteção. Portanto, alguns trabalhos sugerem meios para que a proteção existente não precise ser modificada com a conexão dos GDs. Como exemplo tem-se a conexão dos GDs em pontos estratégicos para que o sistema de proteção estabelecido para o sistema

sem estes seja mantido. Outro meio é a utilização de dispositivos limitadores de corrente que se instalados no ponto de acoplamento com a rede proporcionam aos GDs contribuírem com uma corrente mínima durante uma falta. Porém há trabalhos que desenvolvem métodos para modificar os parâmetros dos relés a fim de proporcionar a seletividade e a coordenação da proteção neste novo cenário.

No caso em que a proteção do sistema é mantida inalterada, pode-se citar (H. ZHAN *et al.*, 2016) cuja proposta dos autores é a utilização de um algoritmo genético (AG) para estabelecer a potência e a localidade dos GDs. Considera-se como restrições os parâmetros de proteção existentes nos relés e nos fusíveis de proteção contra sobrecorrente. A quantidade de geradores fica a critério do operador.

Também utilizando um AG, em Hosseini (2014), os autores propuseram uma estimativa da potência e do local da conexão do GD considerando na função objetivo, os parâmetros de tensão e perdas no sistema. Como restrições, utilizaram os níveis máximos de tensão e a coordenação dos dispositivos de proteção pré-existentes.

Utilizando outra meta-heurística, em Sivasankaran (2017), empregou-se o algoritmo de otimização de enxame de partículas para determinar a localidade de instalação dos GDs, cuja função objetivo estabelece a minimização do custo de instalação e de combustível utilizado para alimentá-los que está diretamente ligada a potência dos GDs. As restrições do algoritmo consideram a proteção de sobrecorrente existente no sistema elétrico sem a conexão dos GDs, a qual deve ter seus parâmetros mantidos com a inserção dos GDs.

Seguindo esta mesma linha de raciocínio, alguns métodos consideram limitadores de corrente conectados no ponto de conexão comum (PCC) dos GDs com a rede elétrica. Estes limitadores atuarão no momento em que ocorrer uma falta no sistema elétrico desviando a corrente de curto-circuito proveniente dos GDs para a terra. Assim a corrente de curto-circuito do sistema permanecerá praticamente inalterada (LEE, 2013; ALAM, 2020; KIM, 2016; GUARDA, 2018; KALAGE, 2016; ISLAM, 2020; EL-KHATTAM, 2008).

Em He (2016) é proposto um sistema adaptativo que considera a inserção massiva de geradores distribuídos que utiliza a relação entre os valores da tensão de falta e pré-falta para acelerar o tempo de atuação dos relés de proteção de sobrecorrente. Neste caso,

a falta precisa ocorrer para que o sistema adaptativo possa se adaptar e atuar de forma coordenada. Os resultados apresentados mostraram-se eficientes quanto à rapidez em que o relé passa a atuar, mas não foi apresentado o tempo total, desde a ocorrência da falta até a atuação do relé. Além disso o artigo não apresenta resultados para faltas monofásicas proporcionando uma incerteza quanto à eficiência deste método.

Em Shih (2017) é descrito um sistema adaptativo para melhorar a sensibilidade dos relés em um sistema elétrico contendo geração distribuída conectada. Para que isso seja possível, um sistema SCADA é estabelecido e configurado. Simulações de fluxo de carga, falta, contingência e sensibilidade são efetuados a cada mudança na topologia ou operação da rede. Para melhorar a coordenação entre os relés foi implementado um algoritmo evolutivo diferencial. Os resultados mostrados abordam a quantidade de casos de coordenação da proteção que foram resolvidos depois da implementação do método, contudo não é descrito para qual tipo de falta o sistema elétrico está submetido.

Em Alam (2019) o autor precisa de todos os dados do sistema, e se houver alguma mudança no sistema, calcula-se a corrente de falta com a finalidade de reparametrizar os relés verificando se as restrições da função objetivo proposta estão sendo satisfeitas. Ele utiliza cinco *solvers* para comparar o quão rápido é a convergência do seu método mas não especifica para qual tipo de falta as análises são feitas e não ilustra nenhum caso comparando as curvas dos relés antes e após a adaptação. Assim o autor desvia o foco da proteção adaptativa, pois deveria mostrar as curvas dos relés ajustadas antes que ocorra a falta para que, assim que houver a ocorrência da falta a coordenação destes sejam mantidas devido à execução do método proposto.

Em Jain (2015) é proposto a adaptação da proteção considerando a leitura de todos os dados do sistema elétrico, inclusive dos GDs para que seja possível calcular as correntes de falta do sistema e, desse modo os novos parâmetros para os relés. Neste caso, o autor ilustra as curvas dos relés antes e após a adaptação ocorrer. Não é abordado neste trabalho o tipo de falta que os testes foram submetidos e também não há indicação da localidade da conexão dos GDs no sistema. Assim sendo, seria interessante análises considerando vários níveis de inserção, localidades diferentes e para todos os tipos de falta.

Em Chandraratne (2018) os autores utilizam um micro algoritmo genético para adaptar a proteção. Eles utilizam o micro algoritmo genético ao invés do algoritmo genético devido à população inicial ser menor no micro, tornando sua convergência mais rápida. Uma das variáveis de entrada do método proposto é a corrente de falta do sistema cujo cálculo é feito através do equivalente de Thévenin que é realizado toda vez que o sistema SCADA detecta alguma mudança no fluxo de potência do sistema. Os resultados apresentados mostraram serem eficientes para os três tipos de falta e com variação na resistência de falta de 0 a 10 ohms, no entanto, a inserção de GDs ficou restrita a apenas dois GDs conectados no final dos alimentadores.

Em Mahat (2011) é proposto que a adaptação da função de sobrecorrente dos relés seja feita após a falta ocorrer. Neste caso, a corrente vista pelos relés é utilizada para configurar o tempo de atuação de cada um mantendo a coordenação entre eles. Para validar o método proposto foram gerados resultados para faltas trifásicas com GDs considerando vários níveis de injeção de potência conectados em barras finais dos ramos.

Em Kumar e Jain (2020) os autores desenvolveram um método de adaptação da proteção de sobrecorrente dos relés que considera o GD conectado na última barra operando junto à rede e no caso de ilhamento. Só que este método necessita da leitura da corrente de falta para reparametrizar os relés em ambos os casos. Assim sendo, é gerado um vetor de parâmetros para o cenário junto à rede e outro para o cenário ilhado considerando os três tipos de falta. Portanto o algoritmo detecta o cenário, faz a leitura da corrente de falta e envia aos relés os parâmetros pré-ajustados.

Em Xuand e Liao (2018) é proposto um método online para a atualização dos parâmetros dos relés de proteção contra sobrecorrentes. Utiliza-se um algoritmo genético (AG) para diminuir o tempo de atuação de cada relé quando há uma variação de carga e/ou a inserção de GDs. Um sistema SCADA, juntamente com comunicação entre os relés, é utilizado para adquirir todos os dados pré-falta. Posteriormente é escolhida a zona de proteção dos relés e realiza-se simulações de curto-circuito. Utilizando-se desta corrente e do valor da corrente de *pick-up* dos relés envolvidos na reparametrização, os valores de tempo são ajustados utilizando o AG. Caso todas as restrições forem satisfeitas, o sistema de proteção está pronto para a atuação correta. Contudo os resultados apresentados mostram somente os tempos de atuação de cada relé e a corrente de *pick-up*

sem distinguir o tipo de falta em que foram obtidos, por outro lado não se mostra nenhum resultado comparando o sistema de proteção atuando sem e com GDs.

Em Muda e Jena (2016) é proposto um método adaptativo para os relés de sobrecorrente utilizando sequência positiva e negativa do sistema. As correntes sequenciais são lidas e processadas pelos relés, que através de equações e comunicação entre os relés realiza a adaptação da proteção. Assim o método proposto foi submetido a vários testes mostrando sua eficiência. Porém não é apresentado o tempo total de processamento desde o momento da falta até a atuação da proteção, passando pela leitura, processamento dos dados e a adaptação da proteção.

Em Sitharthan (2016) é desenvolvido um método para a adaptação da proteção de sobrecorrente que necessita monitorar a corrente de sequência negativa após a ocorrência da falta para iniciar o algoritmo de adaptação da proteção. Neste caso, para a configuração dos relés de sobrecorrente foram utilizadas curvas de tempo definido. Para que o método funcione perfeitamente, um centro de gerenciamento deve ser estabelecido. Os resultados mostraram-se eficientes, porém não é abordado o tempo decorrente desde a detecção da falta até sua eliminação.

Em Rahmati (2015) utiliza-se um método baseado em um plano de impedâncias para a adaptação da proteção. Para auxiliar a execução do método deve-se obter todos os dados do sistema para que seja elaborado um circuito equivalente de Thévenin, pois, com as mudanças no perfil de carregamento do sistema, altera-se a impedância de Thévenin proporcionando a reparametrização do sistema de proteção. Os resultados discutidos referem-se ao sistema com GD conectado na última barra e não considera a falta monofásica, dando espaço para questionamentos quanto à robustez deste método.

Observa-se que há várias maneiras de contornar o problema da proteção de sobrecorrente considerando GDs conectadas no SDEE. Nesta tese é proposta uma nova alternativa com o objetivo de adaptar a proteção de sobrecorrente a partir de dados pré-falta. Considerando um cenário de elevada inserção de GDs, propõe-se equações matemáticas genéricas baseadas em análise clássica de circuitos elétricos. Os dados utilizados nas equações são a impedância do sistema sob análise, a contribuição dos GDs durante a falta, e a impedância de falta. Para estimar as contribuições dos GDs durante a falta a partir de dados pré-falta, é proposto um modelo baseado em Lógica Fuzzy, que

utiliza a corrente e potência dos GDs, tensão pré-falta na barra de instalação do GD, local da falta e a impedância de falta. O método completo integra as equações genéricas e o modelo Fuzzy de injeção dos GDs para reparametrizar a proteção de sobrecorrente de forma adaptativa antes da ocorrência de uma falta no sistema elétrico.

O valor da impedância e o local da falta são definidos pela concessionária a partir das normas estabelecidas para a parametrização dos dispositivos de proteção (CPFL ENERGIA). Esses parâmetros são bem conhecidos e largamente utilizados pelas concessionárias de energia elétrica em seus projetos de sistemas de proteções de redes de distribuição de energia elétrica considerando o sistema sem inserção de GDs.

Portanto, pode-se dividir a proposta desta tese em duas partes:

A primeira estima a corrente de curto-circuito injetada pelo GD do tipo fotovoltaico, síncrono, assíncrono e DFIG a partir de dados pré-falta empregando Lógica Fuzzy (LF), a qual possui regras do tipo “SE” “ENTÃO” e utiliza o método do centróide na defuzzyficação. Os dados de entrada pré-falta dos GDs são corrente e potência injetadas e tensão no ponto de conexão. Além disso são utilizadas a impedância entre a barra que está conectada, o ponto de falta e a resistência de falta.

A segunda utiliza as contribuições das correntes dos GDs obtidas pela LF as quais são utilizadas na formulação matemática equacionada com base na PLK e SLK para estimar de forma rápida e eficiente as correntes de curto-circuito em pontos estratégicos do alimentador, possibilitando reparametrizar o sistema de proteção de forma online previamente a ocorrência da falta.

Na Tabela 1 está representado um resumo para ilustrar melhor as diferenças entre os artigos apresentados na revisão da literatura e a proposta deste trabalho.

Tabela 1: Resumo das diferenças entre os artigos abordados e a proposta deste trabalho.

Artigos	Mantém a proteção	Define o local, quantidade e a potência	Tipo de dados utilizados		Adapta a proteção	Recurso Matemático		
			Pré e durante a falta	Pré-falta		Meta-heurística	Análise clássica	Lógica Fuzzy
H. Zhan	X	X	X			X		
S. A. Hosseini	X	X		X		X		
M. S. Sivasankaran	X	X		X		X		
H. Jo	X		X				X	
M. S. Alam	X		X				X	
Y. Kim	X		X				X	
F. G. K. Guarda	X		X				X	
A. A. Kalage	X		X				X	
M. A. Islam	X		X				X	
W. El-Khattam	X		X				X	
J. H. He			X		X	X		
M. Y. Shih			X		X	X	X	
M. N. Alam			X		X		X	
D. K. Jain			X		X		X	
C. Chandraratne			X		X	X		
P. Mahat			X		X		X	
N. Kumar			X		X		X	
K. Xu				X	X	X		
H. Muda			X		X		X	
R. Sitharthan			X		X		X	
A. Rahmati				X	X		X	
Proposta				X	X		X	X

Fonte: Próprio autor.

Com o aumento dos GDs, notou-se que a modificação no sistema de proteção deveria ser feita periodicamente considerando a injeção de potência dos GDs naquele exato momento, pois trata-se de gerações de fontes intermitentes em sua grande maioria. Sendo assim, permite-se dizer que o sistema de proteção do SDEE deve se adaptar de forma autônoma e em um curto período de tempo para que, em uma eventual falta no SDEE ele possa atuar de forma adequada.

2.2 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO SOBRE A CONTRIBUIÇÃO DOS GDS DURANTE UMA FALTA.

Um dos principais desafios e que pode ser considerado uma inovação desta tese, é obter a contribuição das correntes de curto-circuito dos GDs a partir de dados pré-falta, independente da tecnologia de geração empregada. A ideia é que as contribuições das correntes de curto-circuito fornecidas pelos GDs, principalmente aqueles com geração intermitente, possam ser estimadas utilizando dados pré-falta medidos e disponíveis nos sistemas de medições dos GDs, de modo que esses resultados possam ser empregados para readaptar os parâmetros da proteção para as atuais condições do sistema. A priori, buscaram-se na literatura especializada referências que possuíam como objetivo a estimação da corrente injetada pelos GDs durante um curto-circuito. Porém os resultados encontrados não eram adequados e suficientes para o emprego da técnica nesta tese. O principal problema é que os métodos propostos na literatura utilizam a tensão de falta no ponto de acoplamento do GD para a estimação das correntes de falta, sendo que esse dado está disponível após a ocorrência do curto-circuito, o que inviabiliza a parametrização da proteção de forma adaptativa antes da ocorrência da falta.

2.2.1 Geradores fotovoltaicos (GFs)

Dentre as buscas efetuadas na literatura especializada, pode-se citar (N. Díaz, 2011) que utiliza a LF para determinar a corrente injetada do GF durante a falta considerando o ajuste do ponto de máxima transferência de potência (MPPT) dos inversores. O artigo não aborda o comportamento dos GFs frente aos três tipos principais de curto-circuito, tampouco o comportamento do método com a variação da resistência de falta.

Em Shen *et al.* (2017) é definido um sistema de equações que analisa três condições de tensão de falta para decidir qual destas será utilizada no cálculo da corrente injetada pelo GF. Em Strezoski, (2016) os autores desenvolveram um modelo matemático para o cálculo da corrente de falta dos GFs, mas também se necessita de dados de falta do sistema. Em Strezoski (2016) estima-se a corrente sub-transiente, transiente e em regime, e em Strezoski (2020) os autores apresentam melhorias no método anterior e resultados em laboratório, mas ambos também necessitam de dados de curto-circuito para poder calcular a corrente injetada pelo GF.

Em Strezoski (2017) são definidas duas estratégias para obter a corrente de falta injetada pelo GF. Essas estratégias consideram o quão drástica é a falta para o gerador, se a falta for branda a corrente de falta é igual a corrente pré-falta; se a falta for severa é utilizada uma equação baseada na corrente máxima que o GF pode injetar na rede e a corrente pré-falta do GF sendo bastante difícil decidir o quão severa é a falta para o GF. Adicionalmente o método restringe em dois valores de contribuição de corrente de falta, deixando uma faixa de valores sem resultado.

Em Trujillo (2017) é utilizada uma equação baseada em duas vezes a corrente nominal do GF. Sendo assim para qualquer tipo de falta e resistência de falta a contribuição da corrente do GF é a mesma.

Com base na revisão de GFs e através de Buzo (2021), adotou-se para as simulações desta tese, de forma conservativa, que os GFs podem injetar uma corrente máxima de curto-circuito de até duas vezes o valor da corrente nominal. Além disso, como foi dito na seção 2.1, utilizou-se da Lógica Fuzzy para estimar a contribuição do GF durante uma falta possibilitando obter diferentes valores para esta corrente, e sem a necessidade de utilizar dados de falta.

2.2.2 Geradores assíncronos (GAs)

Na busca por um modelo que atendesse as necessidades deste trabalho, buscou-se na NORMA IEC 60909 a contribuição deste tipo de geração. A norma orienta a utilização de uma equação fixa para os tipos de falta deixando de abordar a questão do distanciamento entre o gerador e o ponto de falta.

Assim como em Trujillo (2017), Sulawa (2007), Dashti (2007), Chaudhary (2012), Makowskiand e Leicht (2017), Xu (2019), a abordagem do cálculo de curto-circuito dos geradores assíncronos fica restrita somente às faltas que ocorrem nos terminais do gerador, ou seja, no PCC. Sendo assim, decidiu-se que, assim como no modelo do GF, utiliza-se a Lógica Fuzzy como proposta para estimar a corrente de falta injetada pelo gerador assíncrono (GA). As mesmas variáveis de entrada para o GF foram consideradas para o gerador assíncrono, mas as funções de pertinências tiveram que ser adaptadas para

este modelo, uma vez que a característica de funcionamento é diferente entre eles. O GF é um gerador estático e o assíncrono dinâmico.

2.2.3 Geradores de indução duplamente alimentados (DFIGs)

Assim como para os geradores assíncronos, buscou-se na norma IEC 60909 uma formulação para os geradores de indução duplamente alimentados (DFIGs). Entretanto foram encontrados os mesmos problemas citados em 2.2.2.

Em Trujillo (2017) é utilizado um modelo de equação única que utiliza um fator de tensão e este está associado à tensão residual nos terminais do DFIG, e, a partir do valor deste fator é determinado se a falta ocorre longe ou próximo do gerador. Além disso este fator é utilizado na equação que determina a corrente injetada pelo DFIG durante um curto-circuito.

Em Yu (2008), Xu (2019) e Peng (2009) são elaboradas equações para modelar o DFIG. Em Yu (2008) é apresentado somente o modelo do DFIG para condições de regime permanente. Em Xu *et al.*, (2019) e Peng (2009) são abordados modelos para o DFIG durante o curto-circuito. Todavia, nas equações são necessários muitos parâmetros da máquina. Além disso, não são apresentados resultados do comportamento deste gerador para curtos-circuitos ao longo do alimentador.

Baseado na revisão bibliográfica não se encontrou dentre as referências pesquisadas, um método ou modelo de DFIG capaz de determinar a contribuição do GD na corrente de curto-circuito em diferentes condições da rede. Em vista disso, nesta tese é proposto um modelo para o DFIG baseado em LF capaz de estimar a contribuição do gerador considerando todos os tipos de curtos-circuitos em diferentes condições do SDEE. Na fase de validação dos resultados, verificou-se que as contribuições dos geradores assíncronos e DFIGs são bem próximos, o que favoreceu utilizar a mesma modelagem para ambos os tipos de geradores.

3 MODELO MATEMÁTICO PARA ESTIMAÇÃO DAS CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO EM SDEE CONSIDERANDO A INSERÇÃO DE GD

A ideia do método proposto nesta tese é estimar as correntes de curto-circuito de forma rápida e eficiente considerando a inserção de GDs utilizando dados de pré-falta sem a necessidade da realização de extensiva análise e cálculo de curto-circuito da rede. A partir da revisão bibliográfica e da vasta quantidade de métodos encontrados na literatura, propõe-se nesta tese um sistema de equações baseado nas 1º e 2º Leis de Kirchhoff (PLK e SLK respectivamente) com o objetivo de calcular as correntes de curto-circuito com e sem GDs conectados no SDEE durante uma condição de curto-circuito.

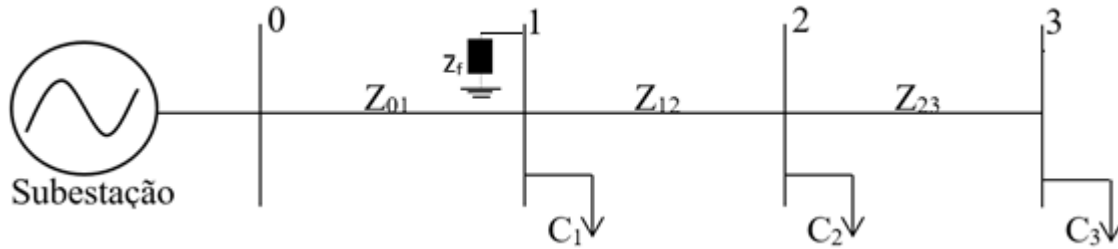
O modelo matemático apresentado nesta tese é um aprimoramento do modelo matemático elaborado na referência de Barradas *et al.*, (2018) que necessita da corrente de carga e da tensão, ambas durante a falta. Nesta seção é abordado o modelo proposto e os resultados obtidos em Barradas *et al.*, (2020), o qual não necessita da corrente de carga e nem da tensão durante a falta. O estudo e entendimento do modelo é necessário para compreender os resultados que serão apresentados na seção 4.

3.1 EQUAÇÕES PARA ESTIMAÇÃO DAS CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO

O objetivo do modelo matemático proposto é resultar em equações que possibilitem estimar a variação da corrente de falta nas linhas do sistema elétrico durante uma falta quando há GDs conectados.

Para a elaboração do modelo matemático proposto, emprega-se o sistema elétrico da Figura 6, o qual representa um sistema elétrico trifásico com cargas conectadas (C1, C2 e C3) em suas respectivas barras; além disso, é ilustrada a representação da impedância de falta (Z_f), conectada na barra 3.

Figura 5: Sistema elétrico utilizado para a obtenção do modelo matemático sem GD e Z_f conectada na barra 1.



Fonte: Próprio autor.

Observando a Figura 5, a análise começa com o sistema sem a presença de GDs. Obteve-se através das Leis de Kirchoff, a corrente de falta em cada linha deste sistema para faltas ocorrendo nas barras 1, 2 e 3.

Partindo da hipótese de que a falta ocorreu na barra 1 do sistema da Figura 5, tem-se que as correntes fasoriais em cada linha deste sistema, I_{01}^f , I_{12}^f e I_{23}^f , podem ser representadas pelas equações (1), (2) e (3) respectivamente para as linhas/seções 01, 12 e 23.

$$I_{01}^f = \frac{V_0^f + Z_f \cdot I_{C1}^f + Z_f \cdot I_{C2}^f + Z_f \cdot I_{C3}^f}{Z_{01} + Z_f} \quad (1)$$

$$I_{12}^f = I_{C2}^f + I_{C3}^f \quad (2)$$

$$I_{23}^f = I_{C3}^f \quad (3)$$

Sendo I_{C1}^f , I_{C2}^f e I_{C3}^f são as correntes das cargas C1, C2 e C3 durante a falta, Z_{01} é a impedância da linha entre as barras 0 e 1 e V_0^f é a tensão de falta da barra 0. Lembrando que estas variáveis são para sistemas trifásicos, então tem-se nas equações (4) e (5) a forma genérica para a impedância do sistema e a impedância de falta respectivamente, cujos índices i e j representam as barras do sistema e os índices A, B e C as fases do

sistema elétrico. Além disso, as variáveis tensão e corrente são representadas por seus fasores enquanto as impedâncias são complexas. Tem-se que I_{ij}^{abc} é a corrente de curto-circuito trifásica entre as barras i e j do sistema, V_i^f é a tensão de curto-circuito trifásica referente à carga conectada na barra i do sistema e V_i^f é a tensão de curto-circuito na barra i do sistema.

$$Z_{ij} = \begin{bmatrix} Z_{ij_A} & Z_{ij_AB} & Z_{ij_AC} \\ Z_{ij_BA} & Z_{ij_B} & Z_{ij_BC} \\ Z_{ij_CA} & Z_{ij_CB} & Z_{ij_C} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$Z_f = \begin{bmatrix} Z_{f_A} & Z_{f_AB} & Z_{f_AC} \\ Z_{f_BA} & Z_{f_B} & Z_{f_BC} \\ Z_{f_CA} & Z_{f_CB} & Z_{f_C} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Considerando agora que a falta ocorre na barra 2, têm-se as equações (6), (7) e (8) que descrevem as correntes nas linhas 01, 12 e 23.

$$I_{01}^f = \frac{V_0^f + (Z_{12} + Z_f) \cdot I_{C1}^f + Z_f \cdot I_{C2}^f + Z_f \cdot I_{C3}^f}{Z_{01} + Z_{12} + Z_f} \quad (6)$$

$$I_{12}^f = \frac{V_0^f - Z_{01} \cdot I_{C1}^f + Z_f \cdot I_{C2}^f + Z_f \cdot I_{C3}^f}{Z_{01} + Z_{12} + Z_f} \quad (7)$$

$$I_{23}^f = I_{C3}^f \quad (8)$$

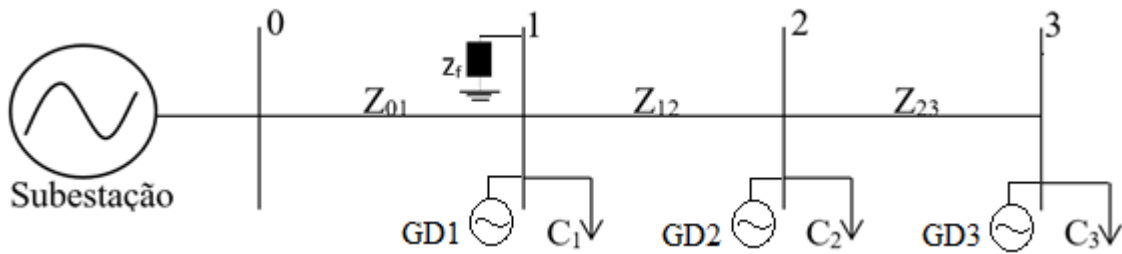
E por último, têm-se as equações (9), (10) e (11) que descrevem a corrente de falta nas linhas 01, 12 e 23 respectivamente, devido à falta na barra 3.

$$I_{01}^f = \frac{V_0^f + (Z_{12} + Z_{23} + Z_f)I_{C1}^f + (Z_{23} + Z_f)I_{C2}^f + Z_f I_{C3}^f}{Z_{01} + Z_{12} + Z_{23} + Z_f} \quad (9)$$

$$I_{12}^f = \frac{V_0^f - Z_{01}I_{C1}^f + (Z_{23} + Z_f)I_{C2}^f + Z_f I_{C3}^f}{Z_{01} + Z_{12} + Z_{23} + Z_f} \quad (10)$$

$$I_{23}^f = \frac{V_0^f - Z_{01}I_{C1}^f - (Z_{01} + Z_{12})I_{C2}^f + Z_f I_{C3}^f}{Z_{01} + Z_{12} + Z_{23} + Z_f} \quad (11)$$

Figura 6: Sistema elétrico utilizado para a obtenção do modelo matemático com GD e ZF conectados na barra 1.



Fonte: Próprio autor.

Obtendo-se as correntes para todas as linhas em decorrência das três condições de curto-circuito, partiu-se para a análise considerando GDs conectados nas barras 1, 2 e 3, Figura 7. Vale ressaltar que o fluxo de corrente dos GDs foi considerado inverso ao das cargas, ou seja, a corrente das cargas flui das barras para as cargas, enquanto a corrente dos GDs flui do GD para as barras. Portanto, nas equações (1)-(3) e (6)-(11) pode-se acrescentar a corrente dos GDs subtraindo as correntes das cargas, respeitando as barras em que estão conectadas. Então, considerando a matriz que descreve as contribuições das correntes de curto-circuito dos GDs, determinou-se as equações que descrevem as correntes de falta nas linhas do sistema da Figura 6 quando há GDs conectados nas barras

do sistema para as condições de curto-circuito nas barras 1, 2 e 3. As equações de (12) a (14) representam respectivamente, as correntes nas linhas 01, 12 e 23 considerando uma falta na barra 1.

$$I_{01}^{f_{GD}} = \frac{V_0^{f_{GD}} + Z_f \cdot \left(I_{C1}^{f_{GD}} - I_{GD1}^f \right) + Z_f \cdot \left(I_{C2}^{f_{GD}} - I_{GD2}^f \right) + Z_f \cdot \left(I_{C3}^{f_{GD}} - I_{GD3}^f \right)}{Z_{01} + Z_f} \quad (12)$$

$$I_{12}^{f_{GD}} = I_{C2}^{f_{GD}} - I_{GD2}^f + I_{C3}^{f_{GD}} - I_{GD3}^f \quad (13)$$

$$I_{23}^{f_{GD}} = I_{C3}^{f_{GD}} - I_{GD3}^f \quad (14)$$

Considerando uma falta na barra 2, as equações de (15) a (17) representam respectivamente, as correntes nas linhas 01, 12 e 23.

$$I_{01}^{f_{GD}} = \frac{V_0^{f_{GD}} + (Z_{12} + Z_f) \cdot \left(I_{C1}^{f_{GD}} - I_{GD1}^f \right) + Z_f \cdot \left(I_{C2}^{f_{GD}} - I_{GD2}^f \right) + Z_f \cdot \left(I_{C3}^{f_{GD}} - I_{GD3}^f \right)}{Z_{01} + Z_{12} + Z_f} \quad (15)$$

$$I_{12}^{f_{GD}} = \frac{V_0^{f_{GD}} - Z_{01} \cdot \left(I_{C1}^{f_{GD}} - I_{GD1}^f \right) + Z_f \cdot \left(I_{C2}^{f_{GD}} - I_{GD2}^f \right) + Z_f \cdot \left(I_{C3}^{f_{GD}} - I_{GD3}^f \right)}{Z_{01} + Z_{12} + Z_f} \quad (16)$$

$$I_{23}^{f_{GD}} = I_{C3}^{f_{GD}} - I_{GD3}^f \quad (17)$$

E, por último, as equações de (18) a (20) representam, respectivamente, as correntes nas linhas 01, 12 e 23 considerando uma falta na barra 3.

$$I_{01}^{f_{GD}} = \frac{V_0^{f_{GD}} + (Z_{12} + Z_{23} + Z_f) \left(I_{C1}^{f_{GD}} - I_{GD1}^f \right) + (Z_{23} + Z_f) \left(I_{C2}^{f_{GD}} - I_{GD2}^f \right) + Z_f \left(I_{C3}^{f_{GD}} - I_{GD3}^f \right)}{Z_{01} + Z_{12} + Z_{23} + Z_f} \quad (18)$$

$$I_{12}^{f_{GD}} = \frac{V_0^{f_{GD}} - Z_{01} \left(I_{C1}^{f_{GD}} - I_{GD1}^f \right) + (Z_{23} + Z_f) \left(I_{C2}^{f_{GD}} - I_{GD2}^f \right) + Z_f \left(I_{C3}^{f_{GD}} - I_{GD3}^f \right)}{Z_{01} + Z_{12} + Z_{23} + Z_f} \quad (19)$$

$$I_{23}^{f_{GD}} = \frac{V_0^{f_{GD}} - Z_{01} \left(I_{C1}^{f_{GD}} - I_{GD1}^f \right) - (Z_{01} + Z_{12}) \left(I_{C2}^{f_{GD}} - I_{GD2}^f \right) + Z_f \left(I_{C3}^{f_{GD}} - I_{GD3}^f \right)}{Z_{01} + Z_{12} + Z_{23} + Z_f} \quad (20)$$

Assim, após a determinação das equações para obtenção das correntes nas linhas do sistema sob condições de falta com e sem os GDs conectados, fez-se a diferença entre as correntes para as respectivas linhas e localizações da barra em falta, equação (21). Na realização desta diferença foi considerado que a tensão na barra 0 e a corrente das cargas são aproximadamente iguais quando o sistema apresenta ou não GD conectado, resultando no cancelamento da tensão na barra 0 e das correntes das cargas. Desta forma, a partir da equação (21), o equivalente considerado no sistema resultará na soma fasorial das corrente dos GDs presentes nos ramos laterais.

$$\Delta I_{ij} = I_{ij}^f - I_{ij}^{f_{GD}} \quad (21)$$

Então, utilizando-se de (21), para faltas nas barras 1, 2 e 3, respectivamente, tem-se a trinca de equações (22), (23) e (24); (25), (26) e (27); e (28), (29) e (30) respectivamente para cada falta.

$$\Delta I_{01}^f = \frac{Z_f \cdot I_{GD1}^f + Z_f \cdot I_{GD2}^f + Z_f \cdot I_{GD3}^f}{Z_{01} + Z_f} \quad (22)$$

$$\Delta I_{12}^f = I_{GD2}^f + I_{GD3}^f \quad (23)$$

$$\Delta I_{23}^f = I_{GD3}^f \quad (24)$$

$$\Delta I_{01}^f = \frac{(Z_{12} + Z_f) \cdot I_{GD1}^f + Z_f \cdot I_{GD2}^f + Z_f \cdot I_{GD3}^f}{Z_{01} + Z_{12} + Z_f} \quad (25)$$

$$\Delta I_{12}^f = \frac{-Z_{01} \cdot I_{GD1}^f + Z_f \cdot I_{GD2}^f + Z_f \cdot I_{GD3}^f}{Z_{01} + Z_{12} + Z_f} \quad (26)$$

$$\Delta I_{23}^f = I_{GD3}^f \quad (27)$$

$$\Delta I_{01} = \frac{(Z_{12} + Z_{23} + Z_f) \cdot I_{GD1}^f + (Z_{23} + Z_f) \cdot I_{GD2}^f + Z_f \cdot I_{GD3}^f}{Z_{01} + Z_{12} + Z_{23} + Z_f} \quad (28)$$

$$\Delta I_{12} = \frac{-Z_{01} \cdot I_{GD1}^f + (Z_{23} + Z_f) \cdot I_{GD2}^f + Z_f \cdot I_{GD3}^f}{Z_{01} + Z_{12} + Z_{23} + Z_f} \quad (29)$$

$$\Delta I_{23} = \frac{-Z_{01} \cdot I_{GD1}^f - (Z_{01} + Z_{12}) \cdot I_{GD2}^f + Z_f \cdot I_{GD3}^f}{Z_{01} + Z_{12} + Z_{23} + Z_f} \quad (30)$$

Observando as equações (22)-(30) conclui-se que há uma certa similaridade quando se calcula a variação da corrente nas linhas considerando o local da falta. Por exemplo, para o cálculo da variação da corrente de falta na primeira linha do sistema, equação (31), no numerador a corrente do GD multiplica a impedância de falta somada com a soma das impedâncias das linhas a jusante da barra de conexão do GD até a barra

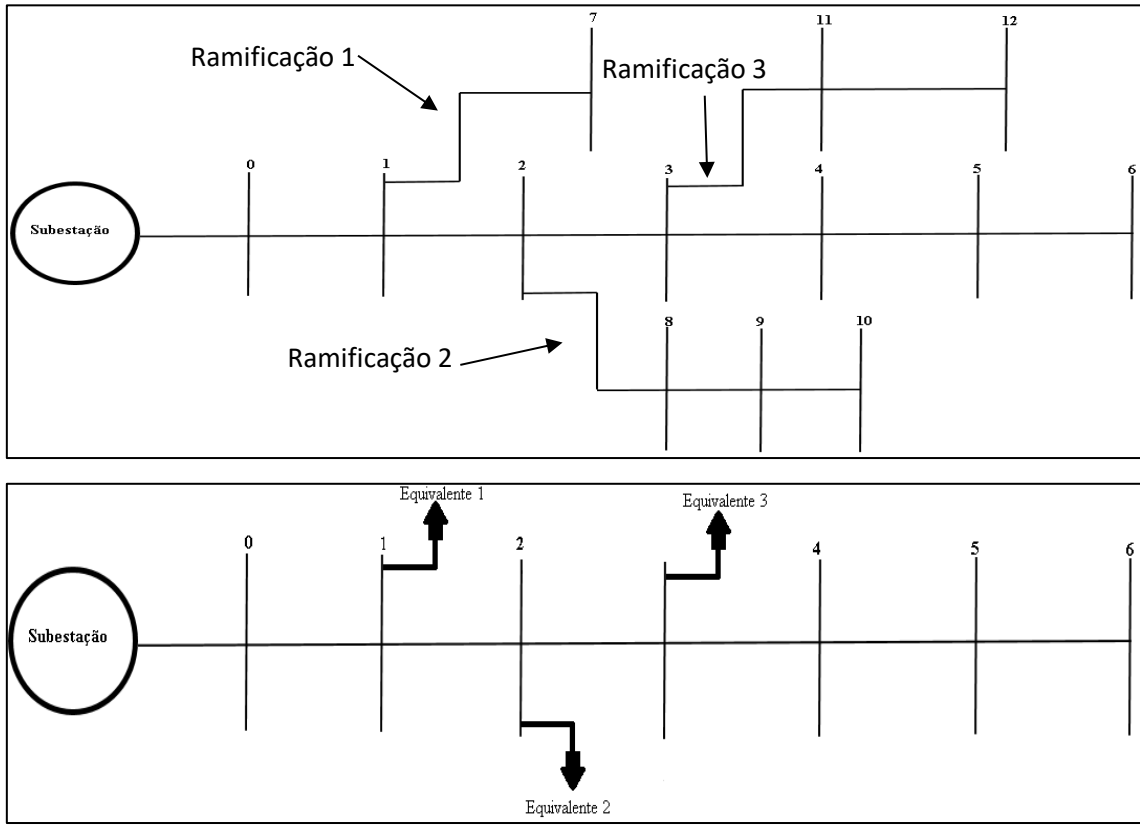
em falta. No denominador, observa-se que se soma as impedâncias das linhas do sistema até a barra em falta.

Para o cálculo da variação da corrente nas linhas a montante do ponto de falta, exceto a primeira linha, equação (32), nota-se que a corrente dos GDs a montante da barra em falta multiplica o valor negativo da soma das impedâncias do sistema até o respectivo GD; e os GDs que estão a jusante do ponto de falta multiplica a soma da impedância de falta com as impedâncias de todos os ramos a jusante do ramo em que está calculando a variação da corrente. O numerador, neste caso, pode ser calculado como a soma das impedâncias das linhas até a barra em falta mais a impedância de falta.

E, por último, quando se calcula a variação da corrente em uma linha a jusante da barra em falta, equação (33), basta somar a contribuição de cada GD a jusante da linha sob análise.

As equações (31), (32) e (33), quando integradas, permitem calcular a variação da corrente de falta em todas as linhas de um SDEE radial, o qual deve ser reduzido a um sistema equivalente. Portanto, define-se o tronco principal do alimentador e os ramos laterais devem ser considerados como um equivalente de injeção de corrente de GDs para cada derivação, Figura 7.

Figura 7: Ilustração do sistema elétrico equivalente para a aplicação do método desenvolvido.



Fonte: Próprio autor.

$$\Delta I_{ij}^f = \frac{\sum_{k=1}^{NB-1} ((\sum_{i=1}^{BF-1} Z_{ij}) + Z_f) \cdot I_{GDk}^f}{\sum_{l=0}^{BF-1} Z_{lp} + Z_f} \quad (31)$$

$$\Delta I_{ij}^f = \frac{-\sum_{k=1}^i \sum_{m=0}^{i-1} Z_{mn} \cdot I_{GDk}^f + \sum_{r=j}^{NB-1} \left(\left(\sum_{i=j}^{BF-1} Z_{ls} \right) + R_f \right) I_{GDk}^f}{\sum_{t=0}^{BF-1} Z_{tw} + R_f}$$

(32)

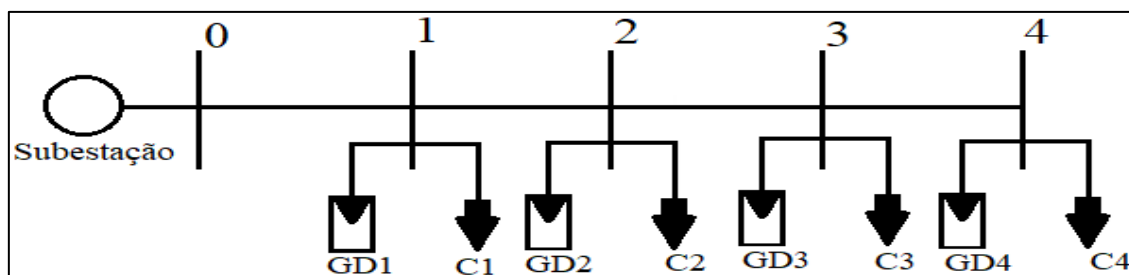
$$\Delta I_{ij}^f = \sum_{k=j}^{NB-1} I_{GDk}^f \quad (33)$$

Sendo: NB o número de barras; BF a barra em falta; $j=i+1$; $p=l+1$; $n=m+1$; $s=l+1$ e $w=t+1$; p, s, w são índices auxiliares.

3.1.1 Validação das equações propostas para o cálculo das correntes de curto-circuito considerando a inserção de GDs.

Para validar as equações (31), (32) e (33), é empregado o sistema trifásico e equilibrado da Figura 8, que foi adaptado de (S. Shen et al., 2017). Os dados deste sistema são apresentados na Tabela 2.

Figura 8: Sistema utilizado para validação das equações obtidas na seção 3.1.



Fonte: Próprio autor.

Com o auxílio do MATLAB®, implementou-se as equações (31), (32) e (33) que possibilitam calcular a variação da corrente de falta em todas as linhas do sistema da Figura 8. Nesta etapa de validação das equações propostas a corrente injetada pelo GD, I_{GDk} , é obtida a partir do software de simulação DIgSILENT®. Para verificar a exatidão das equações, realiza-se comparações entre os resultados de curto-circuito do *software* e as equações propostas.

Tabela 2: Dados do sistema da Figura 8.

Barras	Linha Ω	Carga MVA	GD MW
1	$1,5 + j2,5$	$0,3 + j0,2$	0,3
2	$0,9 + j2,5$	$0,8 + j0,2$	0,5
3	$0,9 + j1,5$	$0,3 + j0,2$	0,3
4	$0,9 + j1,5$	$0,3 + j0,2$	0,5

Fonte: Adaptado de S. Shen et al., 2017.

Nas Tabelas 3 e 4 estão contidos os valores em módulo da variação das correntes obtidas com o DIgSILENT® e com as equações, respectivamente. Na Tabela 5 estão contidos os erros absolutos quando se compara os valores das Tabelas 3 e 4. Esta primeira análise foi realizada para uma falta trifásica com resistência de falta $Z_f=0$ ohms localizada na barra 4.

Tabela 3: Variação da corrente de curto-circuito nos ramos do SDEE para um curto-circuito trifásico com $Z_f=0 \Omega$ na barra 4 - DIgSILENT®.

Fases	$ \Delta I_{01}^f _D$	$ \Delta I_{12}^f _D$	$ \Delta I_{23}^f _D$	$ \Delta I_{34}^f _D$
A	69,67	40,15	73,36	83,61
B	69,86	40,33	73,61	83,86
C	69,84	40,33	73,6	83,85

Fonte: Próprio autor.

Tabela4: Variação da corrente de curto-circuito nos ramos do SDEE para um curto-circuito trifásico com $Z_f=0 \Omega$ na barra 4 –equações propostas.

Fases	$ \Delta I_{01}^f $	$ \Delta I_{12}^f $	$ \Delta I_{23}^f $	$ \Delta I_{34}^f $
A	70,34	40,66	73,68	84,07
B	70,34	40,66	73,68	84,07
C	70,34	40,66	73,68	84,07

Fonte: Próprio autor.

Tabela 5: Erro absoluto da variação da corrente nas linhas devido ao curto-circuito trifásico com $Z_f=0 \Omega$ na barra 4.

Fases	Erro 0-1	Erro 1-2	Erro 2-3	Erro 3-4
A	0,66	0,51	0,31	0,45
B	0,48	0,33	0,07	0,20
C	0,49	0,33	0,08	0,22

Fonte: Próprio autor.

Nas Tabelas 6, 7 e 8 estão contidos os módulos dos valores, em ampéres, para um curto-circuito trifásico com $Z_f = 0 \, \Omega$ localizado na barra 2. A Tabela 6 refere-se aos valores, em módulo, obtidos com o DIgSILENT®, a Tabela 7 refere-se aos valores, em módulo, obtidos com o método proposto e na Tabela 8 são apresentados os erros absolutos.

Tabela 6: Variação da corrente de curto-circuito nos ramos do SDEE para um curto-circuito trifásico com $Z_f = 0 \, \Omega$ na barra 2 - DIgSILENT®.

Fases	$ \Delta I_{01}^f _D$	$ \Delta I_{12}^f _D$	$ \Delta I_{23}^f _D$	$ \Delta I_{34}^f _D$
A	19,5	32,87	33,06	20,65
B	19,5	32,87	33,06	20,65
C	19,5	32,87	33,06	20,65

Fonte: Próprio autor.

Tabela 7: Variação da corrente de curto-circuito nos ramos do SDEE para um curto-circuito trifásico com $Z_f = 0 \, \Omega$ na barra 2 - Método Proposto.

Fases	$ \Delta I_{01}^f $	$ \Delta I_{12}^f $	$ \Delta I_{23}^f $	$ \Delta I_{34}^f $
A	19,63	32,72	33,33	20,82
B	19,63	32,72	33,33	20,82
C	19,63	32,72	33,33	20,82

Fonte: Próprio autor.

Tabela 8: Erro absoluto da variação da corrente nas linhas devido ao curto-circuito trifásico com $Z_f = 0 \, \Omega$ na barra 2.

Fases	Erro 0-1	Erro 1-2	Erro 2-3	Erro 3-4
A	0,13	0,14	0,27	0,16
B	0,13	0,14	0,27	0,16
C	0,13	0,14	0,26	0,16

Fonte: Próprio autor.

Nas Tabelas 9, 10 e 11 estão contidos os módulos dos valores, em ampéres, para um curto-circuito monofásico, fase A, com $Z_f = 10 \, \Omega$ localizado na barra 2. A Tabela 9

refere-se aos valores, em módulo, obtidos com o DIgSILENT®, a Tabela 10 refere-se aos valores, em módulo, obtidos com as equações propostas e a Tabela 11 apresenta o erro absoluto.

Tabela 9: Variação da corrente de curto-circuito nos ramos do SDEE para um curto-circuito monofásico com $Z_f=10 \Omega$ na barra 4 - DIgSILENT®.

Fases	$ \Delta I_{01}^f _D$	$ \Delta I_{12}^f _D$	$ \Delta I_{23}^f _D$	$ \Delta I_{34}^f _D$
A	65,25	50,75	20,28	20,51
B	88,38	72,14	34,75	21,82
C	88,43	72,28	34,4	21,63

Fonte: Próprio autor.

Tabela 10: Variação da corrente de curto-circuito nos ramos do SDEE para um curto-circuito monofásico com $Z_f= 10 \Omega$ na barra 4 - Método Proposto.

Fases	$ \Delta I_{01}^f $	$ \Delta I_{12}^f $	$ \Delta I_{23}^f $	$ \Delta I_{34}^f $
A	65,74	51,08	20,62	20,82
B	88,42	72,15	34,82	21,83
C	88,41	72,14	34,81	21,82

Fonte: Próprio autor.

Tabela 11: Erro absoluto da variação da corrente nas linhas devido ao curto-circuito monofásico com $Z_f = 0 \Omega$ na barra 4.

Fases	Erro 0-1	Erro 1-2	Erro 2-3	Erro 3-4
A	0,49	0,33	0,34	0,32
B	0,06	0,03	0,09	0,03
C	0,01	0,11	0,44	0,22

Fonte: Próprio autor.

Observando os erros contidos nas Tabelas 5, 8 e 11, nota-se que as equações (31), (32) e (33) propostas através dos conceitos clássicos de circuitos elétricos mostraram-se

eficientes, pois apresentaram erros reduzidos independentemente do tipo de curto-circuito que o sistema é submetido. Portanto, as equações genéricas propostas nesta tese podem ser empregadas para realizar análises rápidas, simplificadas e com boa precisão do impacto nos níveis de curto-circuito dos SDEEs provocado devido à inserção de GDs. Partindo-se do caso base em que a proteção foi projetada sem considerar a inserção de GDs, pode-se aplicar as equações desenvolvidas nesta tese no ajuste rápido da proteção de sobrecorrente empregando a variação da corrente estimada devido à inserção da GD no sistema. Conforme observado na validação dos testes, um dado necessário para a estimação das correntes de curto-circuito refere-se às contribuições dos GDs na condição de curto-circuito. Na próxima seção serão propostos, empregando LF, os modelos dos GDs capazes de estimar a contribuição das correntes de curto-circuito dos geradores considerando as variáveis do problema na condição pré-falta.

4 DESENVOLVIMENTO DOS MODELOS DOS GERADORES DISTRIBUÍDOS

4.1 GERADORES FOTOVOLTAICOS (GFS)

A necessidade de determinar a contribuição do gerador fotovoltaico (GF) partiu do princípio de utilizar somente dados pré-falta para o método desenvolvido na seção 3.1, uma vez que nas equações (31), (32) e (33) é necessário o valor da corrente de curto-circuito injetado pelo GD.

Sendo assim, propõe-se utilizar a Lógica Fuzzy para estimar a contribuição do GF durante curtos-circuitos. Neste caso, a LF foi escolhida devido à grande quantidade de combinações entre as variáveis pré-falta, as variáveis do sistema e a resistência de falta para estimar a corrente de falta injetada pelo GF. Em um problema complexo como, por exemplo, obter resultados de falta partindo de valores pré-falta, as equações analíticas se tornam inviáveis. Sendo assim, a utilização de variáveis linguísticas para quantificar os dados de entrada do problema se torna uma solução possibilitando obter valores de saída aproximados.

Na modelagem do GF, são utilizados como dados de entrada a corrente, a potência e a tensão do gerador na condição pré-falta. Estes dados podem ser adquiridos a partir do sistema de medições do GD.

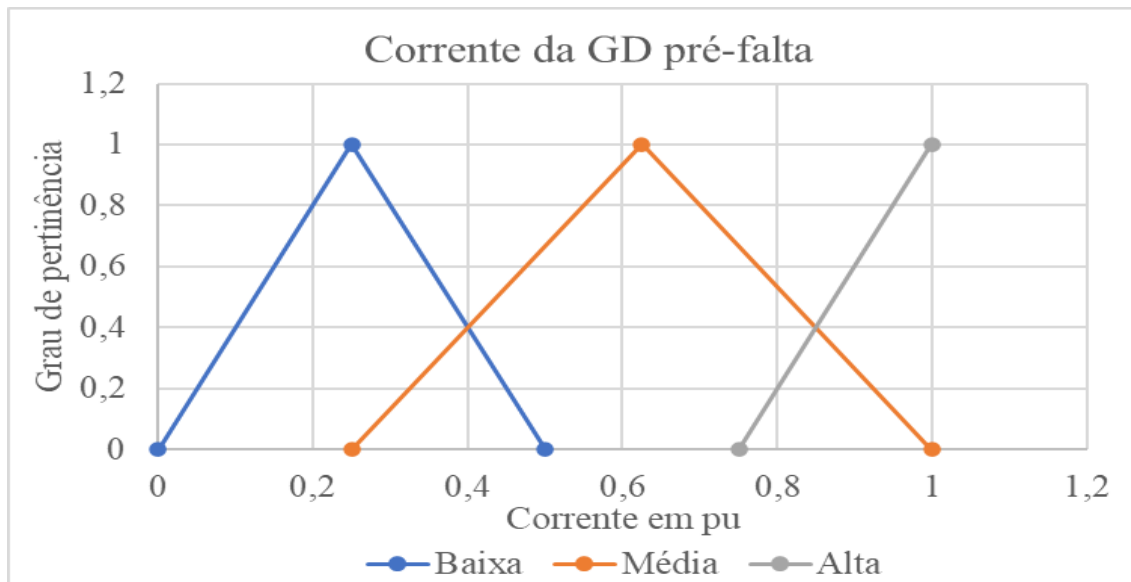
Dados adicionais são necessários como a localização do GD no sistema, a qual está associada a impedância equivalente entre a barra da subestação e o ponto de acoplamento do GD e a impedância de falta que pode ser adotada a partir da norma da concessionária (CPFL, ENERGIA) empregada para o projeto do sistema de proteção do SDEE.

Utilizando-se da combinação das variáveis linguísticas para estes cinco dados de entrada para a Lógica Fuzzy foi possível estimar a corrente injetada pelo GF durante uma falta. As Figuras de 10 a 14 ilustram os gráficos das funções de pertinência referentes às variáveis linguísticas utilizadas para modelar o GF, e a Figura 14 ilustra os patamares de injeção de corrente do GF durante a falta.

Os gráficos contidos nas Figuras de 9 a 14 foram elaborados depois de muitas simulações e observações do comportamento do GF frente a uma falta. Por exemplo, na Figura 9, o eixo das abscissas contém os valores em pu da corrente injetada pela GF em regime permanente; na Figura 10, a potência do GF foi dividida em baixa, média e alta. Já a Figura 12, referente à tensão, é utilizada para determinar as variáveis linguísticas e os valores contidos nas abscissas, conforme descrito no módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2017). Na Figura 12 utilizou-se a impedância do sistema, referente ao sistema da Figura 8. Apesar das regras do método terem sido desenvolvidas utilizando o sistema da Figura 8, a função de pertinência para a impedância vale para qualquer outro sistema elétrico sem a necessidade de mudanças. Na Figura 13 tem-se a resistência de falta e na Figura 14 a corrente injetada pela GF durante uma falta, que está limitada em 2 pu (BUZO; BARRADAS; LEÃO, 2021).

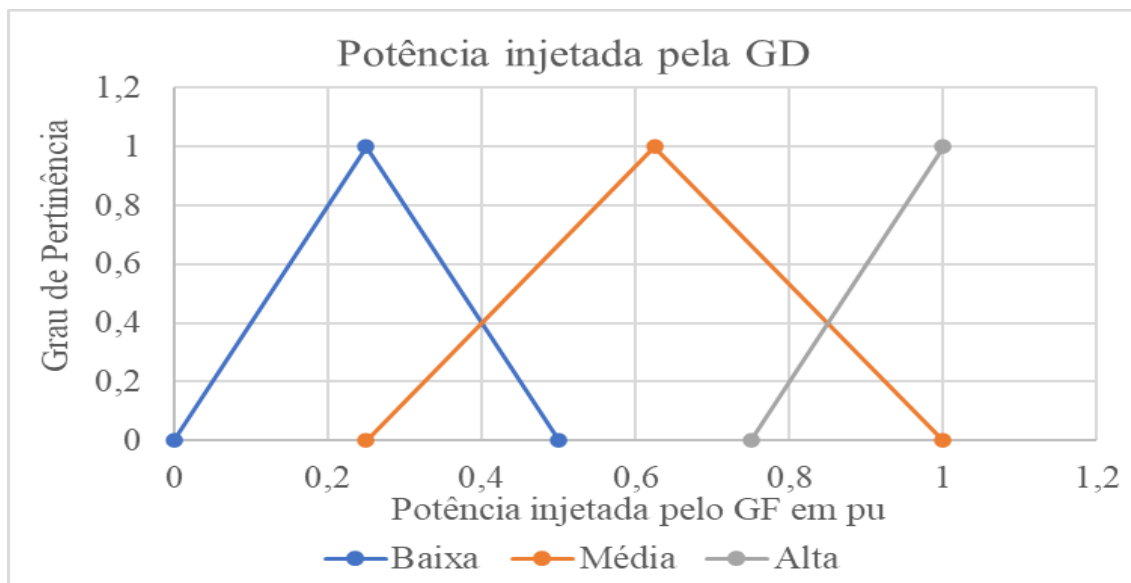
Para analisar outros SDEEs contendo GFs, as funções de pertinência contidas nas Figuras 9 a 14 não devem ser alteradas. Além disso, para valores fora dos limites inferiores e superiores deve-se manter a variável linguística mais próxima, por exemplo, na Figura 13, referente a impedância de falta, valores superiores a oito ohms deve-se utilizar a variável linguística ALTA.

Figura 9: Função de pertinência para a corrente injetada pelo GF em regime permanente.



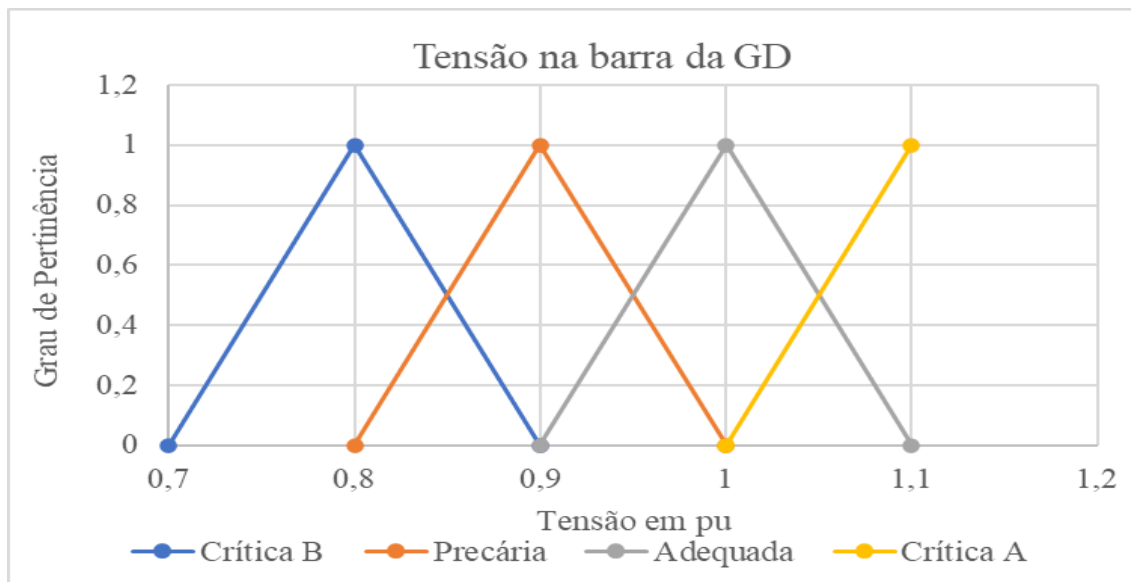
Fonte: Próprio autor.

Figura 10: Função de pertinência para a potência ativa injetada pela GF em regime permanente.



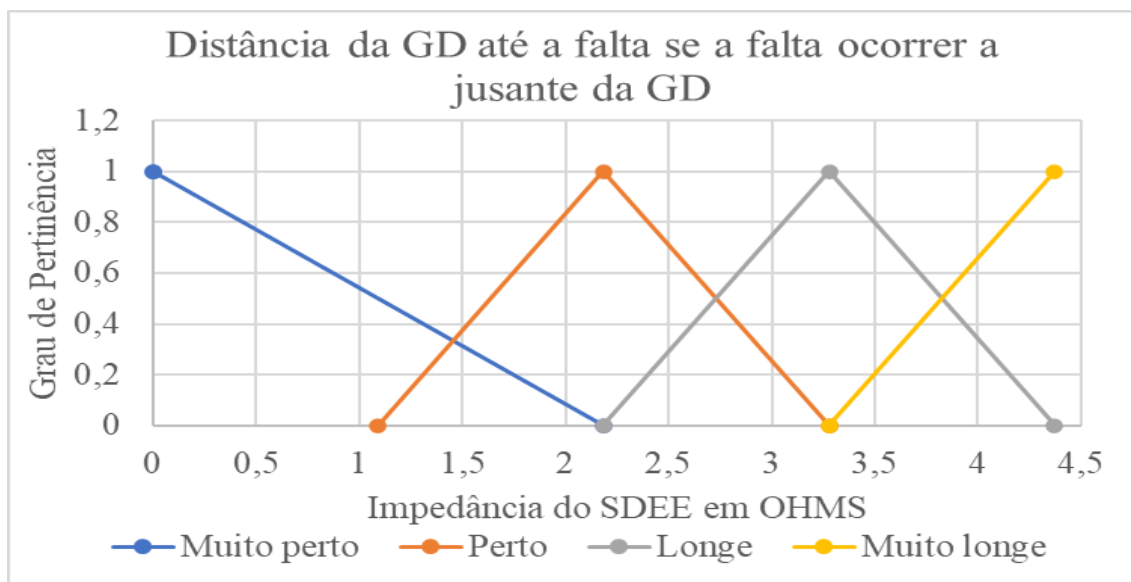
Fonte: Próprio autor.

Figura 11: Função de pertinência para a tensão, em regime permanente, na barra onde o GF está conectado.

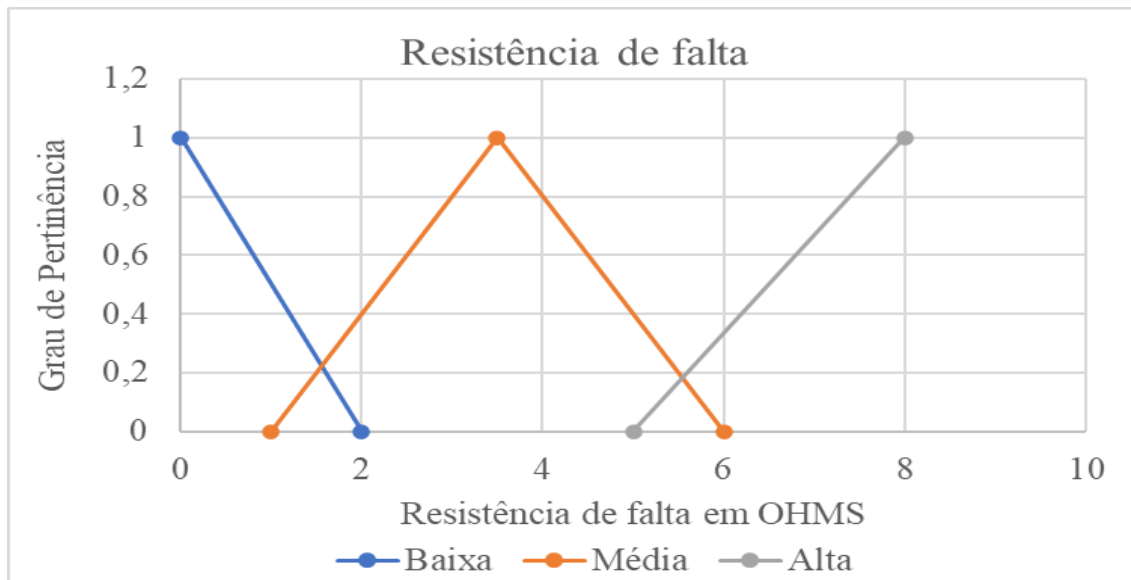


Fonte: Próprio autor.

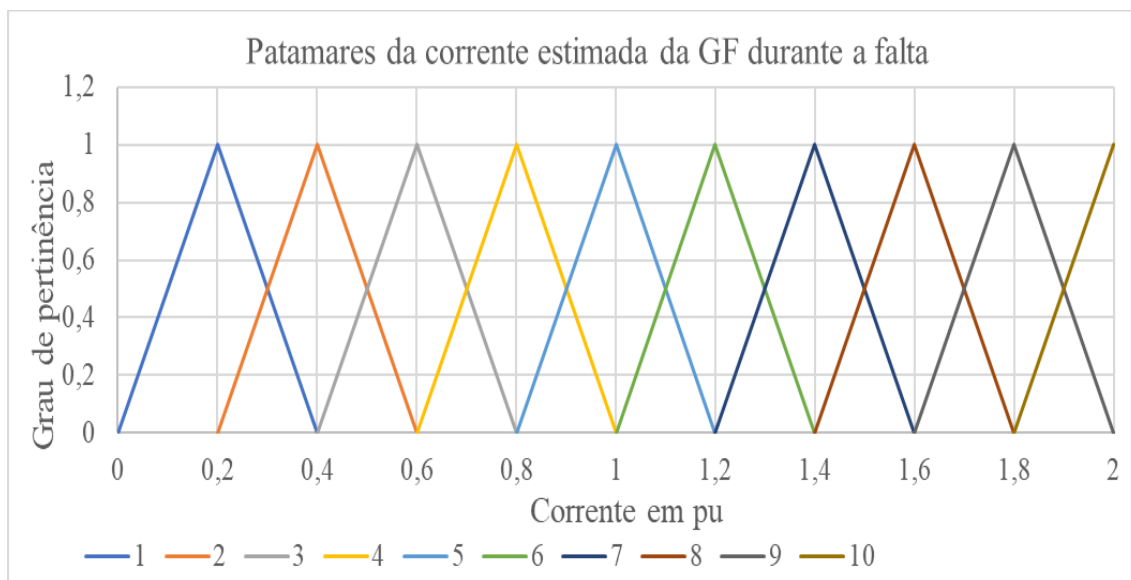
Figura 12: Função de pertinência para a distância entre a barra que a GF está conectada e a barra em falta.



Fonte: Próprio autor.

Figura 13: Função de pertinência para a resistência de falta.

Fonte: Próprio autor.

Figura 14: Função de pertinência para corrente injetada pela GF.

Fonte: Próprio autor.

Para elaborar a resposta do sistema fuzzy, contida na Figura 14, há a necessidade de criar regras do tipo “SE” e “ENTÃO”. Essas regras possibilitam determinar qual o patamar da injeção de corrente do GF durante o curto-circuito, estando associada com um grau de pertinência, que, pelo método do centroide para realizar a defuzzyficação, possibilita encontrar a corrente aproximada injetada pelo GF.

Pode ocorrer que durante uma análise, duas regras são satisfeitas, isso ocorre quando um valor de entrada pertence a duas variáveis linguísticas, por exemplo, quando o valor de tensão é 0,94 pu provoca uma intersecção com o gráfico de tensão precária e adequada, neste caso, para o GF adota-se qual tiver o grau de pertinência maior, que é o de tensão precária.

As regras “SE” e “ENTÃO” foram obtidas para os três tipos de curto-circuito apresentados nas Tabelas 12, 13 e 14 respectivamente.

Tabela 12: Regras para curto-circuito trifásico referentes ao GF.

REGRA	ENTRADA					SAÍDA
	Corrente	Potência	Tensão	Distância	RF	Corrente
1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MUITO PERTO	BAIXA	PATAMAR 10
2	ALTA	ALTA	ADEQUADA	PERTO	BAIXA	PATAMAR 6, 7 E 8
3	ALTA	ALTA	ADEQUADA	LONGE	BAIXA	PATAMAR 5
4	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MUITO LONGE	BAIXA	PATAMAR 5
5	ALTA	ALTA	PRECÁRIA	MUITO PERTO	BAIXA	PATAMAR 10
6	ALTA	ALTA	PRECÁRIA	PERTO	BAIXA	PATAMAR 7 E 8

Fonte: Próprio autor.

Tabela 13: Regras para curto-circuito bifásico referentes ao GF.

REGRA	ENTRADA					SAÍDA
	Corrente	Potência	Tensão	Distância	RF	Corrente
1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MUITO PERTO	BAIXA	PATAMAR 5 e 6
2	ALTA	ALTA	ADEQUADA	PERTO	BAIXA	PATAMAR 5
3	ALTA	ALTA	ADEQUADA	LONGE	BAIXA	PATAMAR 5
4	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MUITO LONGE	BAIXA	PATAMAR 4 e 5
5	ALTA	ALTA	PRECÁRIA	MUITO PERTO	BAIXA	PATAMAR 5 e 6
6	ALTA	ALTA	PRECÁRIA	PERTO	BAIXA	PATAMAR 5

Fonte: Próprio autor.

Tabela 14: Regras para curto-circuito monofásico referentes ao GF.

REGRA	ENTRADA					SAÍDA
	Corrente	Potência	Tensão	Distância	RF	Corrente
1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MUITO PERTO	BAIXA	PATAMAR 9
2	ALTA	ALTA	ADEQUADA	PERTO	BAIXA	PATAMAR 6 e 7
3	ALTA	ALTA	ADEQUADA	LONGE	BAIXA	PATAMAR 5 e 6
4	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MUITO LONGE	BAIXA	PATAMAR 5
5	ALTA	ALTA	PRECÁRIA	MUITO PERTO	BAIXA	PATAMAR 9
6	ALTA	ALTA	PRECÁRIA	PERTO	BAIXA	PATAMAR 7 E 8
7	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MUITO PERTO	ALTA	PATAMAR 5 E 6
8	ALTA	ALTA	ADEQUADA	PERTO	ALTA	PATAMAR 5 E 6
9	ALTA	ALTA	ADEQUADA	LONGE	ALTA	PATAMAR 5 E 6
10	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MUITO LONGE	ALTA	PATAMAR 5

Fonte: Próprio autor.

Nota-se que a variável linguística ALTA apareceu em todas as regras para a corrente e a potência, isso deve-se ao fato de que o sistema de proteção apresenta maiores problemas quando a inserção de geração é elevada. Mas isso não impede de determinar regras para as outras caracterizações de corrente e de potência.

No caso da falta trifásica e bifásica, a resistência de falta (RF) aparece somente caracterizada como BAIXA, isso porque em (CPFL ENERGIA, 2016), para a elaboração do projeto do sistema de proteção, é realizada a análise com resistência de falta igual a 0

ohms. No caso do curto-circuito monofásico são realizados testes com RF igual a 0 e 40 ohms, portanto as variáveis linguísticas BAIXA e ALTA aparecem nas regras.

4.1.1 Validação da modelagem do gerador fotovoltaico.

4.1.1.1 Curto-circuito trifásico

Para validar a modelagem do GF utilizou-se do sistema da Figura 8, o qual foi simulado no DIGSILENT®. Os resultados obtidos com o DIGSILENT® são empregados como referência para os obtidos com o modelo proposto, pois se comparou o resultado da corrente de curto-circuito injetada pelo GF fornecida pelo *software* com o resultado obtido pela lógica fuzzy. Além disso, os dados de entrada para o modelo fuzzy como a corrente, a potência e a tensão, todos fornecidos na condição pré-falta, foram obtidos através do DIGSILENT®. O dado referente a impedância existente entre a barra em que o GF está conectado e o local onde o curto-circuito foi simulado é adquirido através da Tabela 2. A potência nominal de cada GF é igual a 500 kW com fator de potência unitário. O tipo de curto-circuito e a resistência de falta devem ser adotados para as simulações.

Na Tabela 15 são apresentados os cenários que o sistema da Figura 8 foi submetido para curto-circuito trifásico. Com a respectiva configuração foi possível determinar os valores pré-falta utilizados na modelagem do GF, bem como a distância entre o GF e a barra em curto (D GF-BF), Tabela 16. Após a coleta destes dados, foi possível caracterizá-los segundo as variáveis linguísticas estabelecidas na modelagem do GF, Tabela 17, possibilitando determinar uma das regras contidas na Tabela 12. Assim sendo, determinou-se a variável linguística para a corrente injetada pelo GF, bem como seu valor em pu e ampéres, o qual pode ser facilmente comparado com o valor da corrente injetada pelo GF através da simulação do DIGSILENT®, Tabela 18. No apêndice encontra-se a metodologia para determinar a contribuição da corrente de curto-circuito do GF para o teste 1, a qual pode ser estendida aos demais casos.

Observa-se que no teste 8 os GFs 3 e 4 estão a jusante da barra em falta, neste caso, para um curto-circuito trifásico com $RF = 0$ ohms, a distância em que o GF se encontra da barra em curto não vai influenciar, pois a contribuição do GF é considerada máxima. Portanto, pode-se notar que o patamar adotado é o 10, Tabela 18.

Tabela 15: Cenários para os testes com curto-circuito trifásica para o GF.

Teste	Barra que há GF conectada	Barra em curto	Configuração das cargas
1	1	1	Igual da Tabela 4
2	1	2	Igual da Tabela 4
3	1	3	Igual da Tabela 4
4	1	4	Igual da Tabela 4
5	3	3	C1 e C2 Igual da Tabela 4. C3= 800kW e 500 kVar. C4=600kW e 200 kVar
6	3	4	C1 e C2 Igual da Tabela 4. C3= 800kW e 500 kVar. C4=600kW e 200 kVar
7	1 e 3	3	C2 Igual da Tabela 4. C3= 800kW e 500 kVar. C4=600kW e 200 kVar
8	2,3 e 4	2	C1= SEM; C2 Igual da Tabela 4. C3= 800kW e 500 kVar. C4=600kW e 200 kVar

Fonte: Próprio autor.

Tabela 16: Valores obtidos com o DIGSiLENT® para formar a entrada do modelo Fuzzy do GF para curto-circuito trifásico.

Teste/GF	Corrente (pu)	Potência (pu)	Tensão (pu)	D GF-BF (Ω)	RF (Ω)
1/GF1	1,02	1	0,979	0	0
2/GF1	1,02	1	0,979	1,75	0
3/GF1	1,02	1	0,979	3,5	0
4/GF1	1,02	1	0,979	4,37	0
5/GF3	1,062	1	0,941	0	0
6/GF3	1,062	1	0,941	0,87	0
7/GF1	1,023	1	0,977	3,5	0
7/GF3	1,051	1	0,951	0	0
8/GF2	1,029	1	0,971	0	0
8/GF3	1,037	1	0,963	*	0
8/GF4	1,040	1	0,961	*	0

(*) GD está a jusante do ponto de curto-circuito.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 17: Variáveis linguísticas referentes aos dados de entrada do GF para o curto-circuito trifásica.

Teste/GF	Corrente	Potência	Tensão	D GF-BF	RF
1/GF1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MP	BAIXA
2/GF1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	PERTO	BAIXA
3/GF1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	LONGE	BAIXA
4/GF1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	ML	BAIXA
5/GF3	ALTA	ALTA	PRECÁRIA	MP	BAIXA
6/GF3	ALTA	ALTA	PRECÁRIA	MP	BAIXA
7/GF1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	LONGE	BAIXA
7/GF3	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MP	BAIXA
8/GF2	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MP	BAIXA
8/GF3	ALTA	ALTA	ADEQUADA	*	BAIXA
8/GF4	ALTA	ALTA	ADEQUADA	*	BAIXA

MP = muito perto; ML = muito longe.

(*) GD está a jusante do ponto de curto-circuito.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 18: Dados referentes as correntes injetadas pelo GF obtidos com o modelo Fuzzy e com o DIGSILENT® para curto-circuito trifásico.

Teste/GF	Variável Linguística corrente saída	Corrente injetada Fuzzy (pu/A)	Corrente injetada DIGSILENT (pu/A)
1/GF1	PATAMAR 10	1,933/40,43	1,956/40,91
2/GF1	PATAMAR 6,7 E 8	1,4/29,28	1,29/27,18
3/GF1	PATAMAR 5	1/20,91	1,075/22,49
4/GF1	PATAMAR 5	1/20,91	1,022/21,35
5/GF3	PATAMAR 10	1,933/40,43	1,956/40,91
6/GF3	PATAMAR 10	1,933/40,43	1,72/36
7/GF1	PATAMAR 5	1/20,91	1,072/22,43
7/GF3	PATAMAR 10	1,933/40,43	1,956/40,91
8/GF2	PATAMAR 10	1,933/40,43	1,956/40,91
8/GF3	PATAMAR 10*	1,933/40,43	1,933/40,44
8/GF4	PATAMAR 10*	1,933/40,43	1,922/40,21

(*) GF conectado a jusante do curto-circuito.

Fonte: Próprio autor.

4.1.1.2 Curto-circuito bifásico

Para validar o modelo para o curto-circuito bifásico, submeteu-se o sistema aos cenários da Tabela 19. Com isso, simulou-se estes no DIGSILENT® e determinou-se os dados de entrada do modelo fuzzy, Tabela 20. Desse modo, obteve-se as variáveis linguísticas do modelo Fuzzy, Tabela 21, resultando na variável linguística da corrente injetada pelo GF e no seu valor, o qual pode ser comparado com o valor da corrente injetada pelo GF observada no DIGSILENT®, Tabela 22.

Além disso, quando o GF está a jusante da barra em curto, notou-se que a contribuição do GF neste caso independe da distância que ele se encontra da barra e, portanto, a contribuição do GF neste caso é indicada pelo patamar 5 e 6.

Tabela 19: Cenário para os testes com curto-circuito bifásico para o GF.

Teste	Barra que há GF conectada	Barra em curto	Configuração das cargas
1	1	1	C1 e C2 Igual da Tabela 4. C3= 800kW e 500 kVar. C4=600kW e 200 kVar
2	1	2	C1 e C2 Igual da Tabela 4. C3= 800kW e 500 kVar. C4=600kW e 200 kVar
3	1	3	C1 e C2 Igual da Tabela 4. C3= 800kW e 500 kVar. C4=600kW e 200 kVar
4	1	4	C1 e C2 Igual da Tabela 4. C3= 800kW e 500 kVar. C4=600kW e 200 kVar
5	3	3	C1 e C2 Igual da Tabela 4. C3= 800kW e 500 kVar. C4=600kW e 200 kVar
6	1, 3 e 4	4	C1 e C2 Igual da Tabela 4. C3= 800kW e 500 kVar. C4=600kW e 200 kVar
7	4	2	C1 e C2 Igual da Tabela 4. C3= 800kW e 500 kVar. C4=600kW e 200 kVar

Fonte: Próprio autor.

Tabela 20: Valores obtidos com o DIGSILENT® para formar a entrada do modelo Fuzzy do GF para curto-circuito bifásico.

Teste/GF	Corrente (pu)	Potência (pu)	Tensão (pu)	D GF-BF (Ω)	RF (Ω)
1/GF1	1,03	1	0,967	0	0
2/GF1	1,03	1	0,967	1,75	0
3/GF1	1,03	1	0,967	3,5	0
4/GF1	1,03	1	0,967	4,37	0
5/GF3	1,062	1	0,941	0	0
6/GF1	1,023	1	0,976	4,37	0
6/GF3	1,046	1	0,955	0,87	0
6/GF4	1,047	1	0,954	0	0
7/GF4	1,063	1	0,94	*	0

(*) GD está a jusante do ponto de curto-circuito.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 21: Variáveis linguísticas referentes aos dados de entrada do GF para o curto-circuito bifásico.

Teste/GF	Corrente	Potência	Tensão	D GF-BF	RF
1/GF1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MP	BAIXA
2/GF1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	PERTO	BAIXA
3/GF1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	LONGE	BAIXA
4/GF1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	ML	BAIXA
5/GF3	ALTA	ALTA	PRECÁRIA	MP	BAIXA
6/GF1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	ML	BAIXA
6/GF3	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MP	BAIXA
6/GF4	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MP	BAIXA
7/GF4	ALTA	ALTA	PRECÁRIA	*	BAIXA

(*) GD está a jusante do ponto de curto-circuito.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 22: Dados referentes a corrente injetada pelo GF obtidos com o modelo Fuzzy e com o DIGSILENT® para curto-circuito bifásico.

Teste/GF	Variável linguística para corrente injetada	Corrente injetada Fuzzy (pu/A)	Corrente injetada DIGSILENT (pu/A)
1/GF1	PATAMAR 5 e 6	1,1/23	1,155/24,16
2/GF1	PATAMAR 5	1/20,91	0,976/20,43
3/GF1	PATAMAR 5	1/20,91	0,944/19,75
4/GF1	PATAMAR 4 e 5	0,9/18,82	0,941/19,7
5/GF3	PATAMAR 5 e 6	1,1/23	1,168/24,44
6/GF1	PATAMAR 4 e 5	0,9/18,82	0,955/19,98
6/GF3	PATAMAR 5 e 6	1,1/23	1,104/23,09
6/GF4	PATAMAR 5 e 6	1,1/23	1,172/24,51
7/GF4	PATAMAR 5 e 6	1,1/23	1,164/24,36

Fonte: Próprio autor.

4.1.1.3 Curto-circuito monofásico

E, por último, realizaram-se testes para o curto-circuito monofásico. Na Tabela 23 estão descritos os cenários elaborados para submeter o modelo proposto ao teste. Na Tabela 24 são apresentados os dados de entrada para o modelo Fuzzy, os quais foram obtidos com simulações através do DIGSILENT®. Com estes valores, foi possível determinar a variável linguística correspondente a cada dado de entrada do modelo proposto, Tabela 25. Sendo assim, determinou-se a variável linguística da corrente injetada pelo GF referente ao modelo Fuzzy cuja defuzzificação gerou o valor da corrente injetada pelo GF durante um curto-circuito monofásico. Comparou-se este valor com o valor obtido através da simulação de curto-circuito realizada no DIGSILENT®, Tabela 26.

Para GFs que estão conectados a jusante da barra em falta, para falta monofásica com $R_F=0$ ohms, utiliza-se o patamar 9 para calcular a corrente injetada pelo GF. No caso da $R_F=40$ ohms utiliza-se o patamar 5.

Tabela 23: Cenário para os testes de curto-circuito monofásico para o GF.

Teste	Barra que há GF conectada	Barra em falta	Configuração das cargas
1	1	1	C1 e C2 Igual da Tabela 2. C3= 800kW e 500 kVar. C4=600kW e 200 kVar
2	1	2	Igual ao teste 1
3	1	3	Igual ao teste 1
4	1	4	Igual ao teste 1
5	3	3	Igual ao teste 1
6	3	4	Igual ao teste 1
7	1, 2 e 3	4	Igual ao teste 1
8	1 e 2	4	Igual ao teste 1
9	4	2	C Igual ao teste 1

Fonte: Próprio autor.

Tabela 24: Valores obtidos com o DIGSILENT® para formar a entrada do modelo Fuzzy do GF para curto-circuito monofásico.

Teste/GF	Corrente (pu)	Potência (pu)	Tensão (pu)	D GD-BF (Ω)	RF (Ω)
1/GF1	1,033	1	0,9672	0	0
2/GF1	1,033	1	0,9672	1,75	0
3/GF1	1,033	1	0,9672	3,5	0
4/GF1	1,033	1	0,9672	4,37	0
5/GF3	1,062	1	0,9411	0	0
6/GF3	1,062	1	0,9411	0,87	0
7/GF1	1,024	1	0,9765	4,37	0
7/GF2	1,038	1	0,963	2,62	0
7/GF3	1,049	1	0,9527	0,87	0
8/GF1	1,029	1	0,9718	4,37	0
8/GF2	1,046	1	0,9556	2,62	0
9/GF4	1,063	1	0,9402	*	0

(*) GD a jusante do ponto de curto-circuito.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 25: Variáveis linguísticas referentes aos dados de entrada do GF para curto-circuito monofásico.

Teste/GF	Corrente	Potência	Tensão	D GD-BF	RF
1/GF1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MP	BAIXA
2/GF1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	PERTO	BAIXA
3/GF1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	LONGE	BAIXA
4/GF1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	ML	BAIXA
5/GF3	ALTA	ALTA	PRECÁRIA	MP	BAIXA
6/GF3	ALTA	ALTA	PRECÁRIA	MP	BAIXA
7/GF1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	ML	BAIXA
7/GF2	ALTA	ALTA	ADEQUADA	PERTO	BAIXA
7/GF3	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MP	BAIXA
8/GF1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	ML	BAIXA
8/GF2	ALTA	ALTA	ADEQUADA	P	BAIXA
9/GF4	ALTA	ALTA	PRECÁRIA	*	BAIXA

(*) GD a jusante do ponto de curto-circuito.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 26: Dados referentes a corrente injetada pelo GF obtidos com o modelo Fuzzy e com o DIGSILENT® para curto-circuito monofásico.

Teste/GF	Variável linguística para corrente injetada	Corrente injetada Fuzzy (pu/A)	Corrente injetada DIGSILENT (pu/A)
1/GF1	PATAMAR 9	1,8/37,65	1,72/36,13
2/GF1	PATAMAR 6 e 7	1,3/27,19	1,193/24,97
3/GF1	PATAMAR 5 e 6	1,1/23	1,021/21,36
4/GF1	PATAMAR 5	1/20,91	0,959/20,06
5/GF3	PATAMAR 9	1,8/37,65	1,719/35,96
6/GF1	PATAMAR 9	1,8/37,65	1,393/29,15
7/GF1	PATAMAR 5	1/20,91	0,981/20,52
7/GF2	PATAMAR 5 e 6	1,1/23	1,143/23,91
7/GF3	PATAMAR 9	1,8/37,65	1,399/29,27
8/GF1	PATAMAR 5	1/20,91	1,065/22,29
8/GF2	PATAMAR 5 e 6	1,1/23	1,107/23,17
9/GF4	PATAMAR 9	1,8/37,65	1,722/36,02

Fonte: Próprio autor.

4.2 MODELO PARA O GERADOR ASSÍNCRONO (GA).

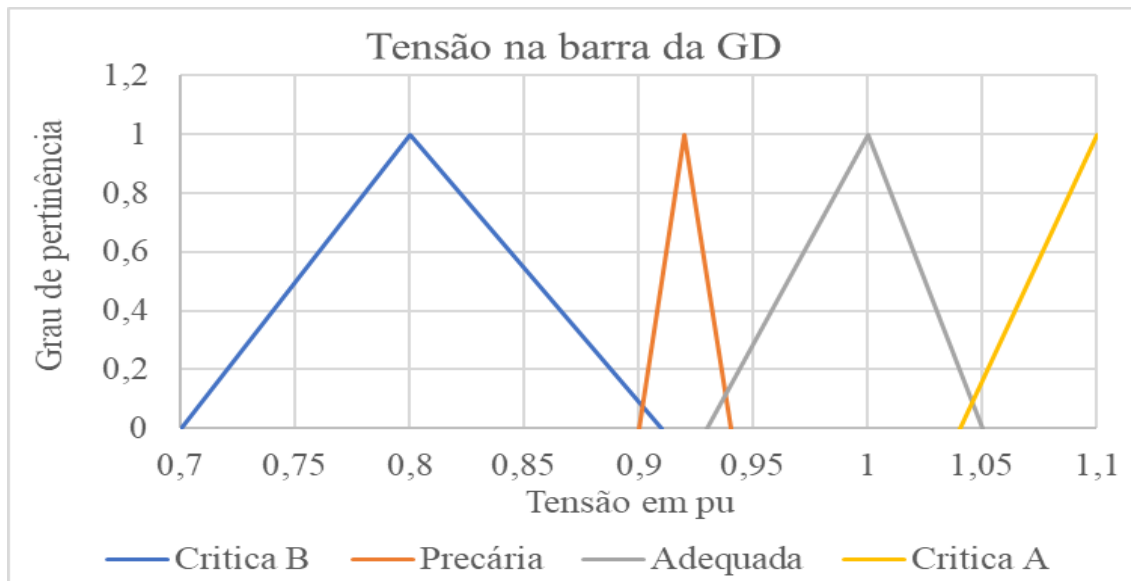
A necessidade de modelar um outro tipo de gerador, além do fotovoltaico, partiu do pressuposto de expor as equações (31), (32) e (33) a outros valores de contribuição de geradores. Então, seguindo a mesma proposta apresentada para a modelagem do GF, utilizou-se da Lógica Fuzzy para modelar o GA.

Diferentemente do GF, o GA, por ser uma máquina rotativa, pode apresentar uma injeção de corrente elevada durante um curto-circuito. O valor da corrente injetada no SDEE está diretamente relacionado ao nível da tensão em seus terminais durante o curto-circuito. Nesta situação, ao diminuir a tensão em seus terminais a corrente injetada no sistema se eleva, podendo chegar a quase 10 vezes o valor da corrente nominal.

Devido às diferenças existentes entre os GFs e os Gas, desenvolveu-se um novo modelo para o GA. Novas funções de pertinências foram desenvolvidas e,

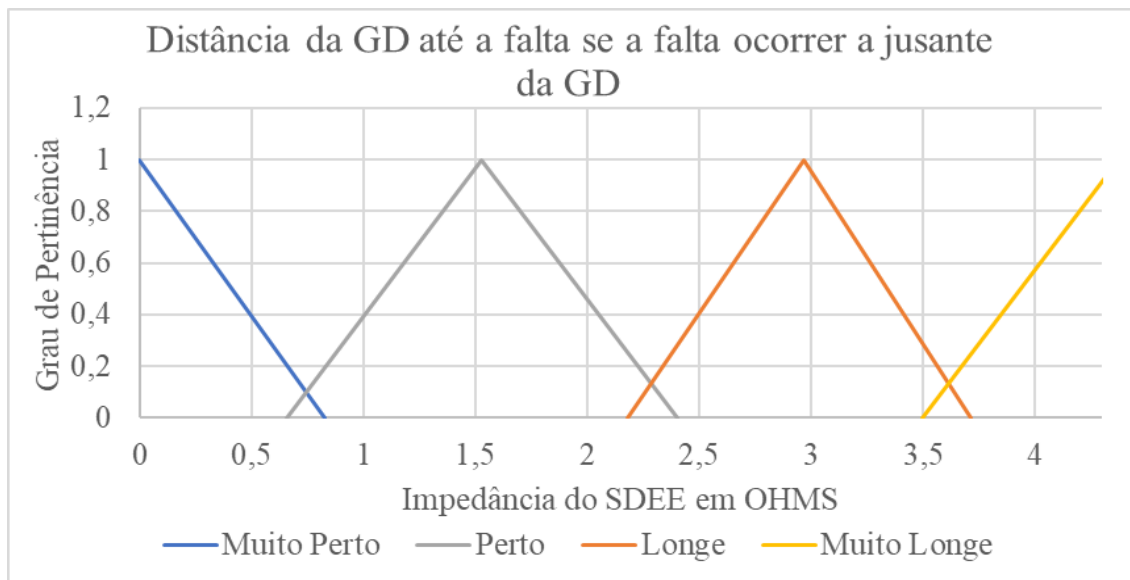
consequentemente, novas regras “SE” e ENTÃO” foram criadas. Entretanto, a essência da modelagem foi mantida, ou seja, estimar a corrente injetada durante o curto-circuito pelo gerador utilizando apenas variáveis pré-falta. Então, este modelo apresenta as mesmas variáveis de entrada e de saída, mas com funções distintas para a tensão, distância entre o GA e a barra em falta; e a corrente injetada pelo GA durante o curto-circuito, Figuras 15, 16 e 17 respectivamente. Portanto as Figuras 9, 10 e 13 são utilizadas para a modelagem do GA também.

Figura 15: Função de pertinência para a tensão em regime permanente na barra onde o GA está conectado.



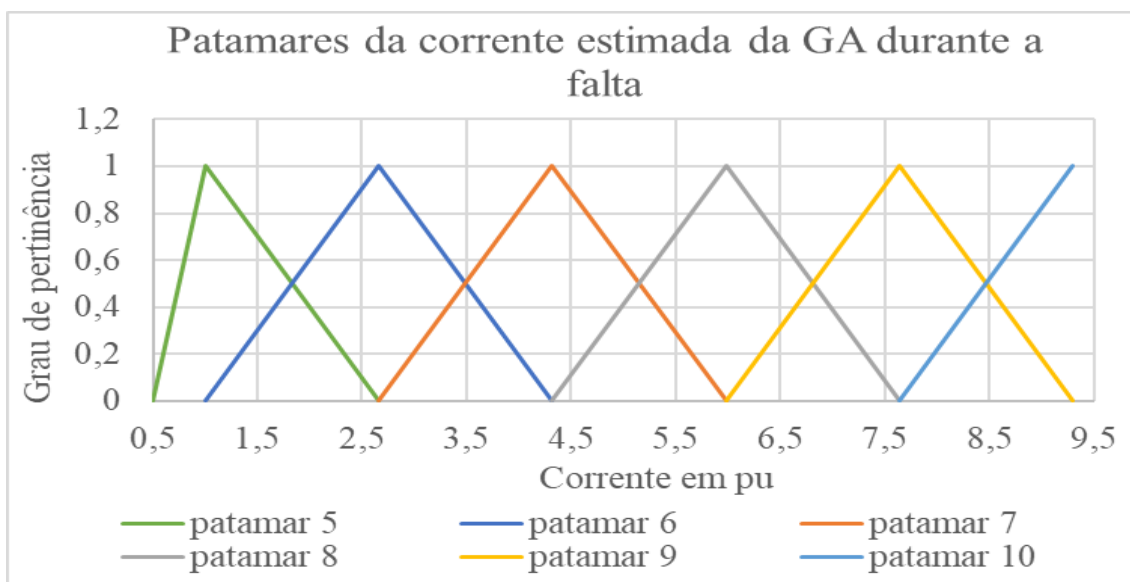
Fonte: Próprio autor.

Figura 16: Função de pertinência para a distância entre a barra que o GA está conectada e a barra em curto-circuito.



Fonte: Próprio autor.

Figura 17: Função de pertinência para corrente injetada pela GA.



Fonte: Próprio autor.

Também, foram elaboradas, após testes exaustivos, as regras para determinar a corrente injetada pelo GA durante um curto-circuito. Nas Tabelas 27, 28 e 29 encontram-se as regras para curto-circuito trifásico, bifásico e monofásico para o GA.

Tabela 27: Regras para o curto-circuito Trifásico referentes ao GA.

REGRA	ENTRADA					SAÍDA
	Corrente	Potência	Tensão	Distância	RF	Corrente
1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MUITO PERTO	BAIXA	PATAMAR 10
2	ALTA	ALTA	ADEQUADA	PERTO	BAIXA	PATAMAR 8
3	ALTA	ALTA	ADEQUADA	LONGE	BAIXA	PATAMAR 7
4	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MUITO LONGE	BAIXA	PATAMAR 6 e 7
5	ALTA	ALTA	PRECÁRIA	MUITO PERTO	BAIXA	PATAMAR 9
6	ALTA	ALTA	PRECÁRIA	PERTO	BAIXA	PATAMAR 8
7	ALTA	ALTA	PRECÁRIA	LONGE	BAIXA	PATAMAR 8

Fonte: Próprio autor.

Tabela 28: Regras para o curto-circuito bifásico referente ao GA.

REGRA	ENTRADA					SAÍDA
	Corrente	Potência	Tensão	Distância	RF	Corrente
1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MUITO PERTO	BAIXA	PATAMAR 9
2	ALTA	ALTA	ADEQUADA	PERTO	BAIXA	PATAMAR 8
3	ALTA	ALTA	ADEQUADA	LONGE	BAIXA	PATAMAR 7
4	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MUITO LONGE	BAIXA	PATAMAR 6
5	ALTA	ALTA	PRECÁRIA	MUITO PERTO	BAIXA	PATAMAR 9
6	ALTA	ALTA	PRECÁRIA	PERTO	BAIXA	PATAMAR 8
7	ALTA	ALTA	PRECÁRIA	LONGE	BAIXA	PATAMAR 7

Fonte: Próprio autor.

Tabela 29: Regras para curto-circuito monofásico referente ao GA.

REGRA	ENTRADA					SAÍDA
	Corrente	Potência	Tensão	Distância	RF	Corrente
1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MUITO PERTO	BAIXA	PATAMAR 9
2	ALTA	ALTA	ADEQUADA	PERTO	BAIXA	PATAMAR 8
3	ALTA	ALTA	ADEQUADA	LONGE	BAIXA	PATAMAR 7
4	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MUITO LONGE	BAIXA	PATAMAR 6
5	ALTA	ALTA	PRECÁRIA	MUITO PERTO	BAIXA	PATAMAR 9
6	ALTA	ALTA	PRECÁRIA	PERTO	BAIXA	PATAMAR 8
7	ALTA	ALTA	PRECÁRIA	LONGE	BAIXA	PATAMAR 7
8	ALTA	ALTA	PRECÁRIA	ML	ALTA	PATAMAR 5
9	ALTA	ALTA	PRECÁRIA	LONGE	ALTA	PATAMAR 5
10	ALTA	ALTA	PRECÁRIA	PERTO	ALTA	PATAMAR 5
11	ALTA	ALTA	PRECÁRIA	MP	ALTA	PATAMAR 5

Fonte: Próprio autor.

Novamente, tem-se que as regras para corrente e a potência apresentam variável linguística ALTA pois partiu-se da premissa de investigar o pior caso na utilização deste tipo de gerador o qual pode ser utilizado como gerador eólico ou como geradores de Pequenas Centrais Hidráulicas (PCH), as quais, geralmente, trabalham com potência nominal (IEEE Std 1020, 2011)

4.2.1 Validação do modelo do gerador assíncrono (GA).

Para validar o modelo do GA, simulou-se o sistema apresentado na Figura 8 variando-se a quantidade de carga e a localidade da conexão do GA. Isso foi realizado com o intuito de testar o modelo do GA sob diferentes cenários, principalmente, observar a influência da variação da tensão na corrente injetada pelo GA.

Igualmente na modelagem do GF, para a modelagem do GA, utilizou-se os dados da Tabela 2 referentes à impedância das linhas. As cargas foram alteradas. O tipo de curto-circuito e a impedância de falta também são predeterminados. E adotou-se uma potência de 81,3686 kVa com fator de potência igual a 0,93 para os Gas, conseqüentemente a corrente nominal é de 3,4042 ampéres.

4.2.1.1 Curto-circuito trifásico

Para a validação dos Gas são estabelecidos os cenários da Tabela 30.

As Tabelas 31 e 32 contêm os valores das variáveis de entrada e caracterização com a variável linguística respectivamente. Observa-se que na Tabela 31, para o teste 6, o GA3 está conectado a jusante da falta, representada por (*). Quando isso ocorre para um curto-circuito trifásico com $R_F=0$ ohms, independente das condições do sistema, a contribuição do GA passa a pertencer à variável linguística PATAMAR 10 proporcionando uma injeção de corrente no sistema de 8,6658 pu, o que representa, para a potência do GA em questão, 29,5 ampéres.

Tabela 30: Cenário para os testes de curto-circuito trifásico para o GA.

Teste	Barra que há GA conectada	Barra em curto	Configuração das cargas
1	1	1	Igual da Tabela 4
2	1	2	Igual da Tabela 4
3	1	3	Igual da Tabela 4
4	1	4	Igual da Tabela 4
5	1 e 3	4	Igual da Tabela 4
6	1,2 e 3	2	Igual da Tabela 4
7	3	4	C1 e C3 Igual da Tabela 4. C2= 1600kW e 400 kVar. C4=1100kW e 400 kVar

Fonte: Próprio autor.

Além disso, na Tabela 32 aparece duas vezes, na coluna teste/GA, 7/GA3 pois o valor da tensão na barra do GA3 para este teste intercepta a variável linguística precária e adequada levando à seleção de duas regras, regra 2 e 6 da Tabela 27. Entretanto ambas as regras geram uma saída no PATAMAR 8 prevalecendo o maior grau de pertinência, 0,34 da regra 2 ao invés de 0,05 da regra 6.

Na Tabela 33 estão contidas as respectivas variáveis linguísticas das correntes injetadas pelo GA, devido à análise das regras apresentadas na Tabela 27. Além disso, contém o valor da corrente injetada pelo GA obtido com a Defuzzificação e, para fins de comparação, o valor da corrente injetada pelo GA obtido com as simulações de curto-circuito no DIGSILENT®. Nota-se que ambos os valores de corrente injetada pelo GA são muito próximos provando a robustez e exatidão do método para estimar a corrente de falta do GA.

Tabela 31: Valores obtidos com o DIGSILENT® para formar a entrada do modelo Fuzzy do GA para o curto-circuito trifásica.

Teste/GA	Corrente (pu)	Potência (pu)	Tensão (pu)	D GD-BF (Ω)	RF (Ω)
1/GA1	3,57	1	0,9759	0	0
2/GA1	3,57	1	0,9759	1,75	0
3/GA1	3,57	1	0,9759	3,5	0
4/GA1	3,57	1	0,9759	4,37	0
5/GA1	3,57	1	0,976	4,37	0
5/GA3	3,89	1	0,9548	0,87	0
6/GA1	3,57	1	0,9761	1,5	0
6/GA2	3,86	1	0,9643	0	0
6/GA3	3,56	1	0,9618	*	0
7/GA3	3,82	1	0,9334	0,87	0

Fonte: Próprio autor.

Tabela 32: Variáveis linguísticas referentes aos dados de entrada do GA para o curto-circuito trifásico.

Teste/GA	Corrente	Potência	Tensão	D GD-BF	RF
1/GA1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MP	BAIXA
2/GA1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	PERTO	BAIXA
3/GA1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	LONGE	BAIXA
4/GA1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	ML	BAIXA
5/GA1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	ML	BAIXA
5/GA3	ALTA	ALTA	ADEQUADA	PERTO	BAIXA
6/GA1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	PERTO	BAIXA
6/GA2	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MP	BAIXA
6/GA3	ALTA	ALTA	ADEQUADA	*	BAIXA
7/GA3	ALTA	ALTA	PRECÁRIA	PERTO	BAIXA
7/GA3	ALTA	ALTA	ADEQUADA	PERTO	BAIXA

(*) GA conectado a jusante do ponto de curto-circuito

Fonte: Próprio autor.

Tabela 33: Dados referente a corrente injetada pelo GA obtidos com o modelo Fuzzy e com o DIGSILENT® para o curto-circuito trifásico.

Teste/GA	Variável linguística para corrente injetada	Corrente injetada Fuzzy (pu/A)	Corrente injetada DIGSILENT (pu/A)
1/GA1	PATAMAR 10	8,665/29,5	8,624/29,36
2/GA1	PATAMAR 8	6,027/20,52	5,540/18,86
3/GA1	PATAMAR 7	4,274/14,55	4,157/14,15
4/GA1	PATAMAR 6 E 7	3,454/11,76	3,723/12,67
5/GA1	PATAMAR 6 E 7	3,454/11,76	3,407/11,59
5/GA3	PATAMAR 8	5,919/20,15	6,482/22,06
6/GA1	PATAMAR 8	5,919/20,15	5,553/18,9
6/GA2	PATAMAR 8	8,701/29,62	8,51/28,97
6/GA3	PATAMAR 10	8,665/29,5	8,39/28,58
7/GA3	PATAMAR 8	5,919/20,15	6,23/21,21
7/GA3	PATAMAR 8		

Fonte: Próprio autor.

4.2.1.2 Curto-circuito bifásico

Para os casos de curto-circuito bifásico têm-se os cenários apresentados na Tabela 34. Nota-se que para o teste 6, o GA3 está a jusante do curto-circuito, e para curto-circuito bifásico fase AB com $R_F=0$ ohms, a contribuição dos Gas apresenta-se no PATAMAR 9, ou seja, 7,5632 pu, o que, para a potência do GA em questão, representa 25,7468 ampéres.

Na Tabela 35 estão contidos os valores de entrada referentes aos testes em que os Gas foram submetidos, e na Tabela 36 contém a respectiva caracterização pela variável linguística. Sendo assim, diante das regras contidas na Tabela 28, foi possível determinar a variável linguística e, conseqüentemente, estimar o valor da contribuição do GA durante o curto-circuito bifásico, Tabela 36. Nesta tabela também são apresentados os valores obtidos do DIGSILENT® referentes às correntes injetadas pelos Gas durante o curto-circuito proporcionando compará-los com os valores obtidos através da LF. Portanto, têm-se que estes valores são bem próximos comprovando a eficiência desta modelagem para os Gas.

Tabela 34: Cenário para os testes de curto-circuito bifásico para o GA.

Teste	Barra que há GA conectada	Barra em falta	Configuração das cargas
1	3	4	Igual da Tabela 4
2	3	3	Igual da Tabela 4
3	1	1	Igual da Tabela 4
4	1	2	Igual da Tabela 4
5	1 e 3	4	Igual da Tabela 4
6	1 e 3	2	Igual da Tabela 4
7	2 e 3	4	C1 e C3 Igual da Tabela 4. C2= 1600kW e 400 kVar. C4=1100kW e 400 kVar

Fonte: Próprio autor.

Tabela 35: Valores obtidos com o DIGSILENT® para formar a entrada do modelo Fuzzy do GA para curto-circuito bifásico.

Teste/GA	Corrente (pu)	Potência (pu)	Tensão (pu)	D GD-BF (Ω)	RF (Ω)
1/GA3	3,89	1	0,956	0,87	0
2/GA3	3,89	1	0,956	0	0
3/GA1	3,57	1	0,9759	0	0
4/GA1	3,57	1	0,9759	1,75	0
5/GA1	3,57	1	0,976	4,37	0
5/GA3	3,89	1	0,9579	0,87	0
6/GA1	3,57	1	0,976	1,75	0
6/GA3	3,89	1	0,9579	*	0
7/GA2	4,29	1	0,9281	2,62	0
7/GA3	4,4	1	0,9154	0,87	0

(*) GA a jusante ao ponto de curto-circuito

Fonte: Próprio autor.

Tabela 36: Variáveis linguísticas referente aos dados de entrada do GA para curto-circuito bifásico.

Teste/GA	Corrente	Potência	Tensão	D GD-BF	RF
1/GA3	ALTA	ALTA	ADEQUADA	PERTO	BAIXA
2/GA3	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MP	BAIXA
3/GA1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MP	BAIXA
4/GA1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	PERTO	BAIXA
5/GA1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	ML	BAIXA
5/GA3	ALTA	ALTA	ADEQUADA	PERTO	BAIXA
6/GA1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	PERTO	BAIXA
6/GA3	ALTA	ALTA	ADEQUADA	*	BAIXA
7/GA2	ALTA	ALTA	PRECÁRIA	LONGE	BAIXA
7/GA3	ALTA	ALTA	PRECÁRIA	PERTO	BAIXA

Fonte: Próprio autor.

Tabela 37: Dados referente a corrente injetada pelo GA obtidos com o modelo Fuzzy e com o DIGSILENT® para curto-circuito bifásico.

Teste/GA	Variável linguística para corrente injetada	Corrente injetada Fuzzy (pu/A)	Corrente injetada DIGSILENT (pu/A)
1/GA3	PATAMAR 8	5,919/20,15	6,906/23,51
2/GA3	PATAMAR 9	7,563/25,74	7,853/26,73
3/GA1	PATAMAR 9	7,563/25,74	7,896/26,88
4/GA1	PATAMAR 8	5,919/20,15	5,223/17,78
5/GA1	PATAMAR 6	2,633/8,96	3,648/12,42
5/GA3	PATAMAR 8	5,919/20,15	6,91/23,526
6/GA1	PATAMAR 8	5,919/20,15	5,223/17,78
6/GA3	PATAMAR 9	7,563/25,74	7,81/26,59
7/GA2	PATAMAR 7	4,276/14,55	4,861/16,55
7/GA3	PATAMAR 8	5,919/20,15	6,027/20,51

Fonte: Próprio autor.

4.2.1.3 Curto-circuito monofásico

Os Gas foram submetidos aos cenários apresentados na Tabela 38. Na Tabela 39 contêm os valores em regime permanente, lidos através do DIGSILENT®, e os valores que caracterizam o sistema proporcionando os dados de entrada para o sistema Fuzzy. Com isso é possível determinar a variável linguística para cada valor, Tabela 40, proporcionando o resultado da corrente dos Gas para cada teste, Tabela 41.

Na Tabela 40, para o teste 1, a distância em que o GA2 se encontra da barra em falta, gera a intersecção com duas variáveis linguísticas, PERTO e LONGE, portanto, duas regras que estão contidas na Tabela 29 são selecionadas gerando dois patamares de corrente injetada pelo GA2, o PATAMAR 7 e o PATAMAR 8. Sendo assim é realizada a combinação desses dois patamares para estimar a corrente injetada pelo GA2.

Além disso, quando o GA está a jusante da falta a corrente injetada por ele pode ser determinada pelo PATAMAR 9, e quando ocorre uma falta monofásica com resistência de falta igual a 40 ohms a estimação da corrente é dada pelo patamar 5. Neste

caso, como o gráfico do PATAMAR 5, FIGURA 13, não é representada por um triângulo isósceles o valor estimado da corrente injetada pelo GA sofre alterações perceptíveis.

Tabela 38: Cenário para os testes de curto-circuito monofásico para o GA.

Teste	Barra que há GA conectada	Barra em falta	Configuração das cargas
1	2	4	Igual da Tabela 4
2	1	2	Igual da Tabela 4
3	1 e 4	4	Igual da Tabela 4
4	2 e 4	3	Igual da Tabela 4
5	2 e 3	4	C1 e C3 Igual da Tabela 4. C2= 1600kW e 400 kVar. C4=1100kW e 400 kVar
6	1	4	Igual da Tabela 4
7	1, 2, 3 e 4	4	C1 e C3 Igual da Tabela 4. C2= 1600kW e 400 kVar. C4=1100kW e 400 kVar

Fonte: Próprio autor.

Tabela 39: Valores obtidos com o DIGSILENT® para formar a entrada do modelo Fuzzy do GA para curto-circuito monofásico.

Teste/GA	Corrente (pu)	Potência (pu)	Tensão (pu)	D GD-BF (Ω)	RF (Ω)
1/GA2	3,871	1	0,963	2,62	0
2/GA1	3,774	1	0,975	1,75	0
3/GA1	3,775	1	0,975	4,37	0
3/GA4	3,64	1	0,955	0	0
4/GA2	3,87	1	0,963	1,75	0
4/GA4	3,492	1	0,955	*	0
5/GA2	4,291	1	0,928	2,62	0
5/GA3	4,4	1	0,915	0,87	0
6/GA1	3,775	1	0,974	4,37	40
7/GA1	4,028	1	0,953	4,37	40
7/GA2	4,285	1	0,928	2,62	40
7/GA3	4,396	1	0,916	0,87	40
7/GA4	4,15	1	0,911	0	40

Fonte: Próprio autor.

Tabela 40: Variáveis linguísticas referentes aos dados de entrada do GA para a curto-circuito monofásico.

Teste/GA	Corrente	Potência	Tensão	D GD-BF	RF
1/GA2	ALTA	ALTA	ADEQUADA	PERTO	BAIXA
1/GA2	ALTA	ALTA	ADEQUADA	LONGE	BAIXA
2/GA1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	PERTO	BAIXA
3/GA1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	ML	BAIXA
3/GA4	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MP	BAIXA
4/GA2	ALTA	ALTA	ADEQUADA	PERTO	BAIXA
4/GA4	ALTA	ALTA	ADEQUADA	*	BAIXA
5/GA2	ALTA	ALTA	PRECÁRIA	LONGE	BAIXA
5/GA3	ALTA	ALTA	PRECÁRIA	PERTO	BAIXA
6/GA1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	ML	ALTA
7/GA1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	ML	ALTA
7/GA2	ALTA	ALTA	PRECÁRIA	LONGE	ALTA
7/GA3	ALTA	ALTA	PRECÁRIA	PERTO	ALTA
7/GA4	ALTA	ALTA	PRECÁRIA	MP	ALTA

(*) GA a jusante do ponto de curto-circuito.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 41: Dados referentes as correntes injetadas pelos GAs obtidos com o modelo Fuzzy e com o DIGSILENT® para curto-circuito monofásico.

Teste/GA	Variável linguística para corrente injetada	Corrente injetada Fuzzy (pu/A)	Corrente injetada DIGSILENT (pu/A)
1/GA2	PATAMAR 8	4,405/14,99	4,846/16,5
1/GA2	PATAMAR 7		
2/GA1	PATAMAR 8	5,919/20,15	4,792/16,31
3/GA1	PATAMAR 6	2,633/8,96	2,983/10,15
3/GA4	PATAMAR 9	7,563/25,74	7,4969/25,52
4/GA2	PATAMAR 8	5,919/20,15	5,554/18,91
4/GA4	PATAMAR 9	7,563/25,74	7,762/26,42
5/GA2	PATAMAR 7	4,405/14,99	4,537/15,44
5/GA3	PATAMAR 8	5,919/20,15	6,373/21,69
6/GA1	PATAMAR 5	1,645/5,6	1,304/4,44
7/GA1	PATAMAR 5	1,286/4,381	1,286/4,37
7/GA2	PATAMAR 5	1,148/3,9	1,482/5,046
7/GA3	PATAMAR 5	1,277/4,34	1,677/5,71
7/GA4	PATAMAR 5	1,148/3,9	1,7176/5,84

Fonte: Próprio autor.

4.3 MODELO PARA O GERADOR DE INDUÇÃO DUPLAMENTE ALIMENTADO (DFIG).

Atualmente geradores eólicos ou aerogeradores modernos são em sua maioria constituídos de geradores de indução duplamente alimentados (DFIGs) (Jiao, Nianand e He, 2017). Desta forma é de grande importância que a contribuição desse tipo de gerador possa ser estimada em casos de curto-circuito visto sua maior inserção nos SDEE. Por ser uma derivação do GA, utilizou-se o mesmo modelo Fuzzy descrito na seção 2.3 para o DFIG. Portanto, são empregadas as mesmas funções de pertinência e as mesmas regras apresentadas para o GA e, mesmo assim, devido à contribuição deste ser um pouco

diferente do que o GA, os resultados mostraram-se muito satisfatórios para os três tipos de falta.

4.3.1 Validação do modelo fuzzy para o gerador de indução duplamente alimentado

4.3.1.1 Curto-circuito trifásico

Para validar o modelo do DFIG para curto-circuito trifásico, submeteu-se o sistema da Figura 8 aos cenários contidos na Tabela 42. Após a simulação de cada cenário obteve-se os dados de entrada para o sistema Fuzzy conforme apresentados na Tabela 43. Através destes valores foi possível determinar a variável linguística associada aos dados de entrada para cada teste, Tabela 44, proporcionando a obtenção da variável linguística referente a cada DFIG utilizado nos testes. Portanto, na Tabela 45 encontram-se a caracterização e o valor estimado para o DFIG, o qual pode ser comparado com o valor obtido do DIGSILENT®.

Na realização do teste 7, o valor da tensão do DFIG2 intercepta os valores das variáveis linguísticas ADEQUADA e PRECÁRIA levando à análise de duas regras, 3 e 7, Tabela 27. Consequentemente, isso gera duas respostas, que neste caso são representadas pelos patamares 8 e 7 proporcionando um valor estimado para a contribuição na corrente de falta de 19,835 ampéres.

Para o DFIG conectado a jusante da falta utiliza-se o patamar 10.

Tabela 42: Cenário para os testes de curto-circuito trifásico para o DFIG.

Teste	Barra que há DFIG conectada	Barra em falta	Configuração das cargas
1	1	1	Igual da Tabela 4
2	1	2	Igual da Tabela 4
3	1	3	Igual da Tabela 4
4	1	4	Igual da Tabela 4
5	2 e 3	4	Igual da Tabela 4
6	1, 2, 3 e 4	4	Igual da Tabela 4
7	2 e 3	4	C1 e C3 Igual da Tabela 4. C2= 1600kW e 400 kVar. C4=1100kW e 400 kVar

Fonte: Próprio autor.

Tabela 43: Valores obtidos com o DIGSilent® para formar a entrada do modelo Fuzzy do DFIG para curto-circuito trifásico.

Teste/GF	Corrente (pu)	Potência (pu)	Tensão (pu)	D GD-BF (Ω)	RF (Ω)
1/DFIG1	3,5	1	0,975	0	0
2/DFIG1	3,5	1	0,975	1,75	0
3/DFIG1	3,5	1	0,975	3,5	0
4/DFIG1	3,5	1	0,975	4,37	0
5/DFIG2	3,56	1	0,966	2,62	0
5/DFIG3	3,58	1	0,96	0,87	0
6/DFIG1	3,49	1	0,979	4,37	0
6/DFIG2	3,55	1	0,969	2,62	0
6/DFIG3	3,57	1	0,964	0,87	0
6/DFIG4	4,58	1	0,962	0	0
7/DFIG2	3,85	1	0,931	2,62	0
7/DFIG3	3,9293	1	0,92	0,87	0

Fonte: Próprio autor.

Tabela 44: Variáveis linguísticas referente aos dados de entrada do DFIG para curto-circuito trifásico.

Teste/ DFIG	Corrente	Potência	Tensão	D GD-BF	RF
1/DFIG1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MP	BAIXA
2/DFIG1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	PERTO	BAIXA
3/DFIG1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	LONGE	BAIXA
4/DFIG1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	ML	BAIXA
5/DFIG2	ALTA	ALTA	ADEQUADA	LONGE	BAIXA
5/DFIG3	ALTA	ALTA	ADEQUADA	PERTO	BAIXA
6/DFIG1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	LONGE	BAIXA
6/DFIG2	ALTA	ALTA	ADEQUADA	PERTO	BAIXA
6/DFIG3	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MP	BAIXA
6/DFIG4	ALTA	ALTA	ADEQUADA	ML	BAIXA
7/DFIG2	ALTA	ALTA	PRECÁRIA	LONGE	BAIXA
7/DFIG2	ALTA	ALTA	ADEQUADA	LONGE	BAIXA
7/DFIG3	ALTA	ALTA	PRECÁRIA	PERTO	BAIXA

Fonte: Próprio autor.

Tabela 45: Dados referentes a corrente injetada pelo DFIG obtidos com o modelo Fuzzy e com o DIGSILENT® para curto-circuito trifásico.

Teste/ DFIG	Variável linguística para corrente injetada	Corrente injetada Fuzzy (pu/A)	Corrente injetada DIGSILENT (pu/A)
1/DFIG1	PATAMAR 10	8,739/29,75	9,299/31,65
2/DFIG1	PATAMAR 8	5,731/19,51	5,906/20,1
3/DFIG1	PATAMAR 7	4,206/14,32	4,393/14,95
4/DFIG1	PATAMAR 6 E 7	3,476/11,83	3,919/13,34
5/DFIG2	PATAMAR 7	4,364/14,85	6,013/20,47
5/DFIG3	PATAMAR 8	5,937/20,22	8,181/27,85
6/DFIG1	PATAMAR 6 E 7	3,467/11,8	3,9101/13,31
6/DFIG2	PATAMAR 7	4,366/14,863	6,008/20,45
6/DFIG3	PATAMAR 8	5,939/20,22	8,18/27,84
6/DFIG4	PATAMAR 10	8,721/29,689	9,299/31,65
7/DFIG 2	PATAMAR 8	5,826/19,83	5,924/20,16
7/DFIG2	PATAMAR 7		
7/ DFIG3	PATAMAR 8	5,939/20,22	8,143/27,72

Fonte: Próprio autor.

4.3.1.2 Curto-circuito bifásico.

Para validar o modelo do DFIG para falta bifásica submeteu-se o sistema da Figura 8 aos cenários contidos na Tabela 46. Após a simulação de cada cenário, obteve-se os dados de entrada para o sistema Fuzzy, Tabela 47. Através destes valores foi possível determinar a variável linguística associada aos dados de entrada para cada teste, Tabela 48, proporcionando a obtenção da variável linguística referente a injeção de corrente de cada DFIG utilizado nos testes. Portanto, na Tabela 49 encontram-se a caracterização e o valor estimado para a corrente injetada pelos DFIGs, a qual pode ser comparada com o valor obtido do DIGSILENT®.

No teste 5, o valor da tensão do DFIG 2 intersecta nas variáveis linguísticas ADEQUADA e PRECÁRIA, levando à análise de duas regras 1 e 5 , Tabela 28.

Consequentemente, isso gera duas respostas, que neste caso são representadas pelo patamar 9 proporcionando um valor estimado para a contribuição na corrente de falta de 26,019 ampéres. Para o DFIG conectado a jusante do curto-circuito bifásico utiliza-se o patamar 9.

Tabela 46: Cenário para os testes de curto-circuito bifásico para o DFIG.

Teste	Barra que há DFIG conectada	Barra em curto	Configuração das cargas
1	1	1	Igual da Tabela 4
2	1	4	Igual da Tabela 4
3	2	3	Igual da Tabela 4
4	2	4	C1 e C3 Igual da Tabela 4. C2= 1600kW e 400 kVar. C4=1100kW e 400 kVar
5	2 e 3	2	C1 e C3 Igual da Tabela 4. C2= 1600kW e 400 kVar. C4=1100kW e 400 kVar

Fonte: Próprio autor.

Tabela 47: Valores obtidos com o DIGSILENT® para formar a entrada do modelo Fuzzy do DFIG para curto-circuito bifásico.

Teste/GF	Corrente (pu)	Potência (pu)	Tensão (pu)	D GD-BF (Ω)	RF (Ω)
1/DFIG1	3,5	1	0,97	0	0
2/DFIG1	3,5	1	0,97	4,37	0
3/DFIG2	3,57	1	0,96	1,5	0
4/DFIG2	3,86	1	0,93	2,62	0
5/DFIG2	3,85	1	0,93	0	0
5/DFIG3	3,92	1	0,92	*	0

Fonte: Próprio autor.

Tabela 48: Variáveis linguísticas referente aos dados de entrada do DFIG para o curto-circuito bifásico.

Teste/GF	Corrente	Potência	Tensão	D GD-BF	RF
1/DFIG1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MP	BAIXA
2/DFIG1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	ML	BAIXA
3/DFIG2	ALTA	ALTA	ADEQUADA	PERTO	BAIXA
4/DFIG2	ALTA	ALTA	ADEQUADA	LONGE	BAIXA
5/DFIG2	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MP	BAIXA
5/DFIG2	ALTA	ALTA	PRECÁRIA	MP	BAIXA
5/DFIG3	ALTA	ALTA	PRECÁRIA	*	BAIXA

Fonte: Próprio autor.

Tabela 49: Dados referente a corrente injetada pelo DFIG obtidos com o modelo Fuzzy e com o DIGSILENT® para curto-circuito bifásico.

Teste/ DFIG	Variável linguística para corrente injetada	Corrente injetada Fuzzy (pu/A)	Corrente injetada DIGSILENT (pu/A)
1/ DFIG1	PATAMAR 9	7,62/25,94	8,39/28,57
2/ DFIG1	PATAMAR 6	2,66/9,086	3,8/12,96
3/ DFIG2	PATAMAR 8	5,93/20,22	6,26/21,31
4/ DFIG2	PATAMAR 7	4,37/14,89	5,49/18,71
5/ DFIG2	PATAMAR 9	7,64/26,01	8,26/28,14
5/ DFIG2	PATAMAR 9		
5/ DFIG3	PATAMAR 9	7,64/26,01	8,2/27,93

Fonte: Próprio autor.

4.3.1.3 Curto-circuito monofásico

Para validar o modelo do DFIG para curto-circuito monofásico, submeteu-se o sistema da Figura 8 aos cenários contidos na Tabela 50. Após a simulação de cada cenário obteve-se os dados de entrada para o sistema Fuzzy, Tabela 51. Através destes valores foi possível determinar a variável linguística associada aos dados de entrada para cada teste, Tabela 52, proporcionando a obtenção da variável linguística referente à injeção da corrente de cada DFIG utilizado nos testes. Portanto, na Tabela 53 encontram-se a caracterização e o valor estimado para o DFIG, o qual pode ser comparado com o valor obtido do DIGSILENT®.

No teste 4 e 6, o valor da tensão do DFIG 2 intersecta nas variáveis linguísticas ADEQUADA e PRECÁRIA levando à análise de duas regras, 1 e 5, Tabela 29. Consequentemente, isso gera duas respostas, que neste caso são representadas pelo patamar 7 e 5 para os testes 4 e 6 respectivamente, pois se diferenciam pela RF. Nota-se que para o teste 4 a corrente estimada do DFIG2 é 14,4526 ampéres e para o teste 6 é 4,5293 ampéres.

Para o DFIG conectado a jusante da falta monofásica com $R_F=0$ ohms utiliza-se o patamar 9 e para $R_F=40$ ohms utiliza-se o patamar 5.

Tabela 50: Cenário para os testes de curto-circuito monofásico para o DFIG.

Teste	Barra que há GF conectada	Barra em curto	Configuração das cargas
1	1	1	Igual da Tabela 4
2	1	3	Igual da Tabela 4
3	2 e 3	4	Igual da Tabela 4
4	2 e 3	4	C1 e C3 Igual da Tabela 4. C2= 1600kW e 400 kVar. C4=1100kW e 400 kVar
5	1	4	C1 e C3 Igual da Tabela 4. C2= 1600kW e 400 kVar. C4=1100kW e 400 kVar
6	1, 2 e 3	2	C1 e C3 Igual da Tabela 4. C2= 1600kW e 400 kVar. C4=1100kW e 400 kVar

Fonte: Próprio autor.

Tabela 51: Valores obtidos com o DIGSILENT® para formar a entrada do modelo Fuzzy do DFIG para o curto-circuito monofásico.

Teste/GF	Corrente (pu)	Potência (pu)	Tensão (pu)	D GD-BF (Ω)	RF (Ω)
1/DFIG1	3,5	1	0,97	0	0
2/DFIG1	3,5	1	0,97	4,37	0
3/DFIG2	3,56	1	0,96	2,62	0
3/DFIG3	3,58	1	0,96	0,87	0
4/DFIG2	3,85	1	0,93	2,62	0
4/DFIG3	3,93	1	0,92	0,87	0
5/DFIG1	3,67	1	0,95	4,37	0
6/DFIG1	3,66	1	0,95	1,75	40
6/DFIG2	3,85	1	0,93	0	40
6/DFIG3	3,92	1	0,92	*	40

(*) DFIG a jusante do ponto de curto-circuito.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 52: Variáveis linguísticas referente aos dados de entrada do DFIG para o curto-circuito monofásico.

Teste/DFIG	Corrente	Potência	Tensão	D GD-BF	RF
1/DFIG1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MP	BAIXA
2/DFIG1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	LONGE	BAIXA
3/DFIG2	ALTA	ALTA	ADEQUADA	LONGE	BAIXA
3/DFIG3	ALTA	ALTA	ADEQUADA	PERTO	BAIXA
4/DFIG2	ALTA	ALTA	ADEQUADA	LONGE	BAIXA
4/DFIG2	ALTA	ALTA	PRECÁRIA	LONGE	BAIXA
4/DFIG3	ALTA	ALTA	PRECÁRIA	PERTO	BAIXA
5/DFIG1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	ML	BAIXA
6/DFIG1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	PERTO	ALTA
6/DFIG2	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MP	ALTA
6/DFIG2	ALTA	ALTA	PRECÁRIA	MP	ALTA
6/DFIG3	ALTA	ALTA	PRECÁRIA	*	ALTA

Fonte: Próprio autor.

Tabela 53: Dados referentes a corrente injetada pelo DFIG obtidos com o modelo Fuzzy e com o DIGSILENT® para o curto-circuito monofásico.

Teste/GF	Variável linguística para corrente injetada	Corrente injetada Fuzzy (pu/A)	Corrente injetada DIGSILENT (pu/A)
1/DFIG1	PATAMAR 9	7,62/25,94	8,74/29,78
2/DFIG1	PATAMAR 7	4,2/14,32	4,2/14,31
3/DFIG2	PATAMAR 7	4,36/14,85	5,68/19,36
3/DFIG3	PATAMAR 8	5,93/20,22	7,66/26,08
4/DFIG2	PATAMAR 7	4,24/14,45	5,51/18,77
4/DFIG2	PATAMAR 7		
4/DFIG3	PATAMAR 8	5,93/20,22	7,46/25,40
5/DFIG1	PATAMAR 6	2,68/9,13	3,62/12,35
6/ DFIG1	PATAMAR 5	1,31/4,48	1,48/5,05
6/ DFIG2	PATAMAR 5	1,33/4,52	1,8/6,13
6/ DFIG2	PATAMAR 5		
6/ DFIG3	PATAMAR 5	1,33/4,529	1,83/6,23

Fonte: Próprio autor.

4.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA ESTIMAÇÃO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO INJETADA PELOS GDS NO SDEE OBTIDOS ATRAVÉS DA MODELAGEM FUZZY

Buscou-se na literatura especializada um método para estimar a corrente de curto-circuito injetada pelos geradores distribuídos, mas nenhum utilizava somente dados pré-falta. Então, aplicando a LF a este problema conseguiu-se estimar a corrente dos GDs durante o curto-circuito utilizando apenas dados pré-falta.

Percebe-se que ao longo do capítulo 4 o método desenvolvido através da LF foi submetido a vários testes. Através das Tabelas 18, 22 e 26, para o gerador fotovoltaico, das Tabelas 33, 37 e 41, para o gerador assíncrono, e das Tabelas 45, 49 e 53, para o gerador de indução duplamente alimentado, nota-se que os valores dos módulos das

correntes injetadas durante os curtos-circuitos abordados obtidos com a utilização da LF são muito próximos dos valores obtidos das simulações do DIGSILENT®.

Ao calcular o erro absoluto envolvendo estes valores obtém-se o erro absoluto máximo de 8,4964 ampéres para o gerador fotovoltaico na condição de curto-circuito monofásico para o teste 6. Neste teste o valor da corrente obtida pela LF para o GF1 foi de 37,6524 ampéres enquanto o valor obtido através da simulação no DIGSILENT foi de 29,156 ampéres.

4.5 INTEGRAÇÃO DA LÓGICA FUZZY COM AS EQUAÇÕES ANALÍTICAS

Após a validação das equações analíticas (31), (32) e (33) e da validação do método para estimar a corrente injetada pelos GFs, GAs e DFIGs durante um curto-circuito utilizando LF, a metodologia proposta para adaptação da proteção pode ser estabelecida. Neste caso, primeiramente determina-se a corrente injetada pelo GD e este valor é utilizado nas equações analíticas resultando na variação da corrente de curto-circuito nas linhas do SDEE. A combinação das equações analíticas e do método de cálculo da corrente de curto-circuito utilizando LF dá-se o nome de método LF-EA.

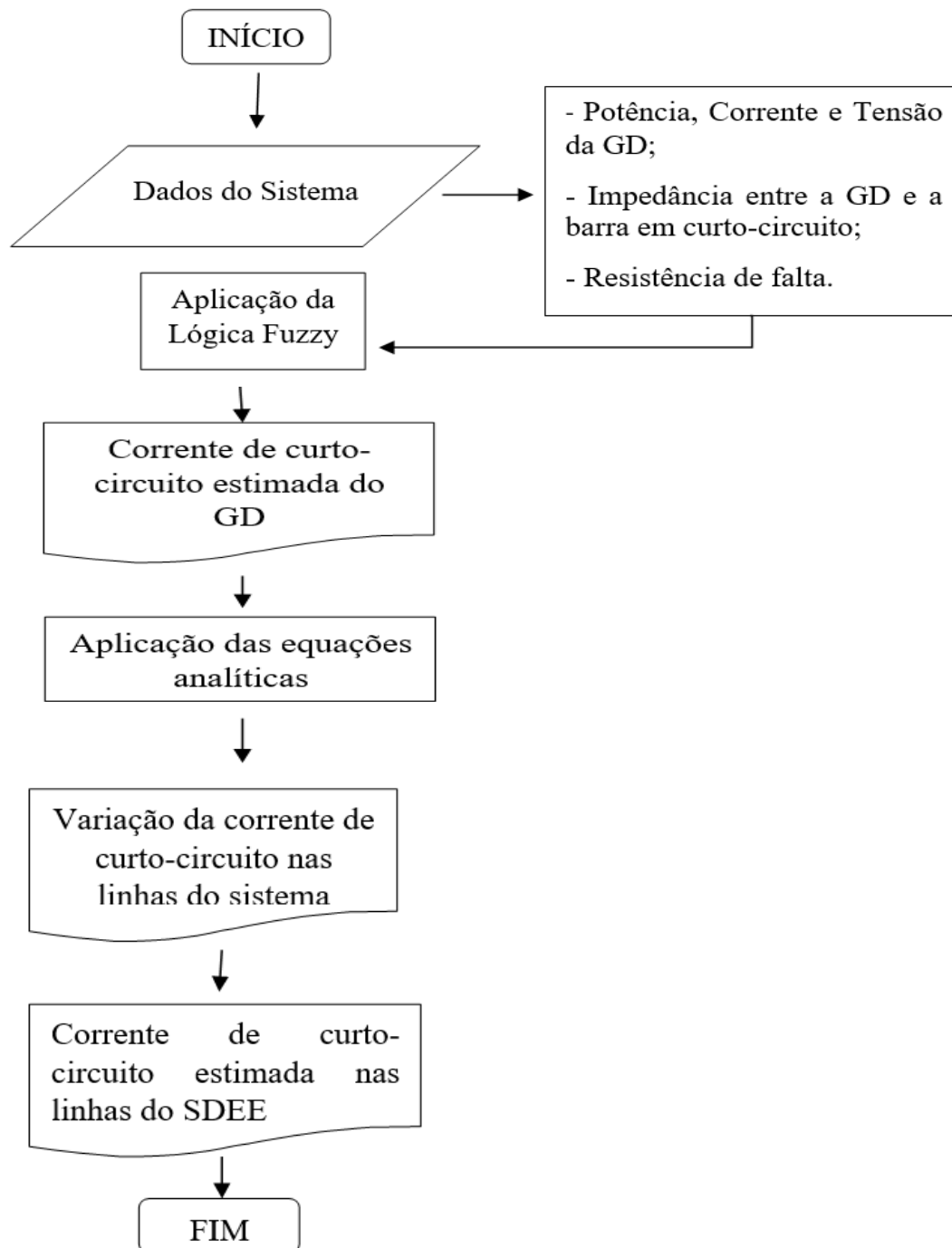
Nota-se que a variável da corrente injetada pelos GDs durante a falta é composta por módulo e fase nas equações analíticas, entretanto, o método da LF fornece apenas o módulo. Para solucionar este problema, utilizou-se a proposta de (ShaofeiShen et al, 2017) que determina a fase da corrente de curto-circuito de forma aproximada como sendo o ângulo da tensão pré-falta do PCC subtraído de 90 graus, equação (34).

$$\angle I_{GD_i}^{fABC} = \angle V_{PCC_{GD_i}}^{pfABC} - 90^\circ \quad (34)$$

Sendo: $\angle I_{GD_i}^{fABC}$ ângulo da corrente trifásica de curto-circuito da GD conectada na barra i e $\angle V_{PCC_{GD_i}}^{pfABC}$ ângulo da tensão trifásica pré-falta do PCC da GD conectada na barra i.

Para ilustrar os passos utilizados pelo método completo deve-se observar o diagrama de blocos da Figura18.

Figura 18: Diagrama de blocos referente a aplicação da Lógica Fuzzy com as Equações analíticas.



Fonte: Próprio autor.

5 TESTES E RESULTADOS PARA A APLICAÇÃO DA LÓGICA FUZZY COM AS EQUAÇÕES ANALÍTICAS – MÉTODO LF-EA.

Para a aplicação do método LF-EA é necessário coletar os dados pré-falta do sistema da Figura 8 através da simulação no DIGSILENT® armazenando-os no EXCEL®. Através do MATLAB®, os dados do EXCEL® são adquiridos e processados para obter as correntes estimadas dos GDs na condição de curto-circuito sendo específica para um dos três tipos de GDs modelados no capítulo 4. Com isso, novamente utilizando-se o MATLAB®, onde as equações (31), (32) e (33) foram implementadas, determina-se a variação da corrente de falta em cada linha do sistema elétrico estudado.

Além disso, a partir da equação (21) é possível obter as correntes nas linhas do SDEE na condição de curto-circuito com a inserção dos GDs (I_{ij}^{GD}) considerando que as variações (ΔI_{ij}) são obtidas pelas equações (31), (32) e (33) e as correntes de curto-circuito sem a inserção dos GDs (I_{ij}) são conhecidas e obtidas a partir do DIGSILENT®.

5.1 TESTES E RESULTADOS PARA O SDEE COM INSERÇÃO DE GFs

5.1.1 Curto-circuito trifásico

Na Tabela 54 são apresentados quatro cenários para validar o método 1. A idéia é estabelecer cenários diferentes daqueles apresentados na Tabela 15 para explorar a robustez do modelo Fuzzy proposto. Para cada teste da Tabela 54 obteve-se os valores pré-falta, Tabela 55, utilizados como entrada para o modelo Fuzzy. E, na Tabela 56, a caracterização dos valores pré-falta do modelo Fuzzy nas respectivas variáveis linguísticas. E na Tabela 57 está presente o valor da corrente de saída do modelo Fuzzy.

Tabela 54: Cenários para validar o método completo para o curto-circuito trifásico com GFs conectados.

Teste	Barras com GF conectado	Barra em falta	Cargas
1	1, 2, 3 e 4	4	Igual da Tabela 4
2	1 e 3	4	SEM C1 C2-TABELA 4 C3-P=800kW ; Q=500kVar C4-P=600kW ; Q=200kVar
3	1, 3 e 4	2	SEM C1 C2-TABELA 4 C3-P=800kW ; Q=500kVar C4-P=600kW ; Q=200kVar
4	2, 3 e 4	3	SEM C1 C2-TABELA 4 C3-P=800kW ; Q=500kVar C4-P=600kW ; Q=200kVar

Fonte: Próprio autor.

Tabela 55: Valores obtidos com o DIGSILENT® para formar a entrada da Lógica Fuzzy para o curto-circuito trifásico com GF conectado.

Teste/GF	Corrente (pu)	Potência (pu)	Tensão (pu)	D GD-BF (Ω)	RF (Ω)
1/GF1	1	1	0,99	4,37	0
1/GF2	1,01	1	0,98	2,62	0
1/GF3	1,01	1	0,98	0,87	0
1/GF4	1,01	1	0,98	0	0
2/GF1	1,02	1	0,97	4,37	0
2/GF3	1,05	1	0,95	0,87	0
3/GF1	1,01	1	0,98	1,75	0
3/GF3	1,04	1	0,96	*	0
3/GF4	1,04	1	0,95	*	0
4/GF2	1,02	1	0,97	1,75	0
4/GF3	1,03	1	0,96	0	0
4/GF4	1,4	1	0,96	*	0

Fonte: Próprio autor.

Tabela 56: Variáveis linguísticas referentes aos dados de entrada da Lógica Fuzzy para o curto-circuito trifásico com GF conectado.

Teste/DFIG	Corrente	Potência	Tensão	D GD-BF	RF
1/GF1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	ML	BAIXA
1/GF2	ALTA	ALTA	ADEQUADA	L	BAIXA
1/GF3	ALTA	ALTA	ADEQUADA	P	BAIXA
1/GF4	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MP	BAIXA
2/GF1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	ML	BAIXA
2/GF3	ALTA	ALTA	ADEQUADA	PERTO	BAIXA
3/GF1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	PERTO	BAIXA
3/GF3	ALTA	ALTA	ADEQUADA	*	BAIXA
3/GF4	ALTA	ALTA	ADEQUADA	*	BAIXA
4/GF2	ALTA	ALTA	ADEQUADA	PERTO	BAIXA
4/GF3	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MP	BAIXA
4/GF4	ALTA	ALTA	ADEQUADA	*	BAIXA

(*) GF a jusante do ponto de curto-circuito.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 57: Dados referente ao resultado da Lógica Fuzzy para o curto-circuito trifásico com GF conectados comparados com valores do DIGSILENT®.

Teste/GF	Variável linguística para corrente injetada	Corrente injetada Fuzzy (pu/A)	Corrente injetada DIGSILENT (pu/A)
1/GF1	PATAMAR 5	1/20,91	1,044/21,83
1/GF2	PATAMAR 5	1/20,91	1,335/27,91
1/GF3	PATAMAR 6, 7 e 8	1,4/29,28	1,732/36,22
1/GF4	PATAMAR 10	1,933/40,43	1,956/40,91
2/GF1	PATAMAR 5	1/20,91	1,01/21,32
2/GF3	PATAMAR 6, 7 e 8	1,4/29,28	1,72/36,01
3/GF1	PATAMAR 5	1/20,91	1,3/27,27
3/GF3	PATAMAR 10	1,933/40,43	1,93/40,45
3/GF4	PATAMAR 10	1,933/40,43	1,93/40,32
4/GF2	PATAMAR 6, 7 e 8	1,4/29,28	1,46/30,58
4/GF3	PATAMAR 10	1,933/40,43	1,956/40,92
4/GF4	PATAMAR 10	1,933/40,43	1,95/40,8

Fonte: Próprio autor.

Após estimar o módulo da corrente injetada pelo GF durante uma falta trifásica pela modelagem Fuzzy, utilizou-se o ângulo da tensão pré-falta dos GFs para determinar a fase da corrente estimada conforme apresentado na Tabela 58. Com os dados do sistema teste da Figura 8 e que estão contidos na Tabela 58 torna-se possível a aplicação das equações (31), (32) e (33) obtendo como resultado a variação da corrente nas linhas do sistema elétrico devido à inserção do GF, Tabela 59.

Tabela 58: Módulos obtidos da Lógica Fuzzy e ângulos utilizados nas equações (31), (32) e (33) para o curto-circuito trifásico com GFs conectados.

TESTE	GFs	CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO DOS GFs	
		MÓDULO (AMPÉRES)	ÂNGULO (GRAUS)
1	GF1	20,91	-59,17 (A); -179,337 (B); 60,28 (C)
	GF2	20,91	-58,8 (A); -179,1 (B); 60,31 (C)
	GF3	29,28	-58,51 (A); -178,79 (B); 60,6 (C)
	GF4	40,43	-58,44 (A); -178,72 (B); 60,68 (C)
2	GF1	20,91	60,26 (A); -180,44 (B); 61,17 (C)
	GF3	29,28	60,82 (A); -181,18 (B); 62,17 (C)
3	GF1	20,91	-59,87 (A); -180,05 (B); 61,56 (C)
	GF3	29,28	-60,02 (A); -180,31 (B); 61,05 (C)
	GF4	40,43	-60,02 (A); -180,3 (B); 61,06 (C)
4	GF2	29,28	-59,8 (A); -180,08 (B); 61,29 (C)
	GF3	40,43	-59,79 (A); -180,07 (B); 61,29 (C)
	GF4	40,43	-59,78 (A); -180,07 (B); 61,3 (C)

Fonte: Próprio autor.

Tabela 59: Resultado das equações (31), (32) e (33) para o curto-circuito trifásico com GFs conectados em cada teste.

TESTE	FASE	MÓDULO DO DELTA I NAS LINHAS EM AMPÉRES - FUZZY			
		LINHA 01	LINHA12	LINHA23	LINHA34
1	A	29,58	8,66	14,34	43,63
	B	29,58	8,66	14,34	43,63
	C	29,58	8,66	14,34	43,63
2	A	20,17	0,74	0,748	32,12
	B	20,17	0,74	0,74	32,12
	C	20,17	0,74	0,74	32,12
3	A	10,98	18,3	83,67	41,83
	B	10,98	18,3	83,67	41,83
	C	10,98	18,3	83,67	41,83
4	A	7,98	7,98	21,29	41,83
	B	7,98	7,98	21,29	41,83
	C	7,98	7,98	21,29	41,83

Fonte: Próprio autor.

Com a finalidade de validar os valores da Tabela 59, obtiveram-se também, os valores da variação da corrente para cada linha do sistema elétrico com a utilização do DIGSILENT®, Tabela 60. Nota-se que os valores obtidos na Tabela 59 e na Tabela 60 são muito próximos, corroborando para validação do método 1 proposto nesta tese, pois os erros absolutos apresentam valores inferiores a 4 ampéres, Tabela 61.

Tabela 60: Resultados da variação da corrente nas linhas do SDEE obtidos através do DIGSILENT® para o curto-circuito trifásico com GFs conectados em cada teste.

TESTE	FASE	MÓDULO DO DELTA I NAS LINHAS EM AMPÉRES - DIGSILENT			
		LINHA 01	LINHA12	LINHA23	LINHA34
1	A	31,09	11,51	15,86	47,39
	B	31,02	11,47	15,75	47,31
	C	31	11,42	15,75	47,27
2	A	19,67	4,05	4,16	32,2
	B	19,65	4,08	4,12	32,17
	C	19,64	4,05	4,15	32,02
3	A	10,26	17,22	80,03	39,83
	B	10,26	17,22	80,03	39,83
	C	10,26	17,21	80,04	39,84
4	A	8,46	8,35	22,63	40,55
	B	8,46	8,35	22,59	40,55
	C	8,42	8,47	22,48	40,55

Fonte: Próprio autor.

Tabela 61: Valores do erro absoluto da variação da corrente nas linhas do sistema elétrico contendo GF conectado devido ao curto-circuito trifásico.

TESTE	FASE	ERRO ABSOLUTO DO DELTA I NAS LINHAS EM AMPÉRES			
		LINHA 01	LINHA12	LINHA23	LINHA34
1	A	1,51	2,84	1,52	3,76
	B	1,43	2,8	1,41	3,68
	C	1,42	2,76	1,41	3,63
2	A	0,49	3,3	3,41	0,07
	B	0,519	3,34	3,37	0,05
	C	0,52	3,3	3,4	0,1
3	A	0,71	1,07	3,64	2
	B	0,71	1,07	3,64	1,99
	C	0,71	1,08	3,63	1,99
4	A	0,47	0,36	1,33	1,28
	B	0,47	0,36	1,29	1,28
	C	0,44	0,48	1,18	1,28

Fonte: Próprio autor.

Sendo assim, o método proposto possibilita estimar a corrente de curto-circuito que passa pelas linhas do sistema elétrico aplicando a equação analítica (21). Portanto, ao realizar o cálculo da equação (21) obteve-se uma estimativa dos valores para cada teste da corrente que irá passar pelas linhas do sistema elétrico durante o curto-circuito, Tabela 62. Os valores da Tabela 62 podem ser comparados com os valores da Tabela 63, a qual contém os valores da corrente de curto-circuito nas linhas do sistema elétrico com GFs conectados obtidos a partir do DIGSILENT®. Estes valores são bem próximos, os quais podem ser confirmados na Tabela 64 que contém os erros absolutos da corrente na linha quando há GF conectado. Portanto, o método proposto possibilita analisar a corrente de falta circulante nas linhas de um sistema elétrico contendo GF quando ocorre uma falta trifásica.

Além disso, nota-se que na Tabela 62 há valores negativos nos testes 3 e 4 indicando que há corrente em fluxo reverso no sistema, evidenciando que há GFs conectados a jusante do ponto de falta.

Tabela 62: Valor da corrente em cada linha obtida através da equação (21), com GF conectado, para um curto-circuito trifásico.

TESTE	FASE	Corrente em ampéres NAS LINHAS EM AMPÉRES - FUZZY			
		LINHA 01	LINHA12	LINHA23	LINHA34
1	A	926,27	956,72	960,80	957,88
	B	922,5	952,98	965,77	962,82
	C	921,43	951,95	967,26	964,39
2	A	948,41	978,69	960,74	957,48
	B	944,61	974,91	965,78	962,48
	C	943,52	973,87	967,27	964,07
3	A	1682,09	1696,66	-3,64	-2
	B	1682,09	1696,67	-3,64	-1,99
	C	1682,07	1696,70	-3,63	-1,99
4	A	1229,75	1222,08	1227,54	-1,28
	B	1228,22	1220,58	1231,55	-1,28
	C	1227,77	1220,17	1232,79	-1,28

Fonte: Próprio autor.

Tabela 63: Valor da corrente em cada linha obtida através do DIGSILENT, com GF conectado para um curto-circuito trifásico.

TESTE	FASE	Corrente em ampères NAS LINHAS EM AMPÉRES - DIGSILENT			
		LINHA 01	LINHA12	LINHA23	LINHA34
1	A	926,05	956,78	960,54	957,57
	B	922,36	953,07	965,62	962,59
	C	921,3	952,1	967,11	964,21
2	A	948,9	975,39	957,32	957,41
	B	945,12	971,57	962,4	962,43
	C	944,04	970,56	963,87	964,18
3	A	1682,81	1697,74	0	0
	B	1682,8	1697,75	0	0
	C	1682,79	1697,78	0	0
4	A	1229,27	1221,71	1226,2	0
	B	1227,74	1220,21	1230,25	0
	C	1227,33	1219,68	1231,6	0

Fonte: Próprio autor.

Tabela 64: Valor do erro absoluto referente à corrente em cada linha do sistema quando há GF conectado e sob um curto-circuito trifásico.

TESTE	FASE	Erro absoluto em ampères referente à corrente NAS LINHAS			
		LINHA 01	LINHA12	LINHA23	LINHA34
1	A	0,22	0,05	0,25	0,3
	B	0,14	0,09	0,15	0,22
	C	0,13	0,14	0,14	0,17
2	A	0,49	3,30	3,41	0,07
	B	0,51	3,34	3,37	0,05
	C	0,52	3,30	3,4	0,1
3	A	0,71	1,07	3,64	2
	B	0,71	1,07	3,64	1,99
	C	0,71	1,08	3,63	1,99
4	A	0,47	0,36	1,33	1,28
	B	0,47	0,36	1,29	1,28
	C	0,44	0,48	1,18	1,28

Fonte: Próprio autor.

5.1.2 Curto-circuito bifásico

Na Tabela 65 são apresentados os cenários de curto-circuito entre as fases A e B do sistema elétrica da Figura 9, criados para testar o método proposto. Com o auxílio do DIGSILENT® obteve-se os dados pré-falta para alimentar o modelo Fuzzy, Tabela 66.

Tabela 65: Cenários para validar o método completo para curto-circuito bifásico entre as fases A e B com GFs conectados.

Teste	Barra que há GF conectada	Barra em falta	Configuração das cargas
1	1, 3 e 4	4	Igual da Tabela 4
2	1, 2, 3 e 4	3	Igual da Tabela 4
3	2, 3 e 4	2	Igual da Tabela 4
4	1 e 4	1	Igual da Tabela 4

Fonte: Próprio autor.

Tabela 66: Valores obtidos com o DIGSILENT® para formar a entrada do método completo para curto-circuito bifásico com GF conectado.

Teste/GF	Corrente (pu)	Potência (pu)	Tensão (pu)	D GD-BF (Ω)	RF (Ω)
1/GF1	1,01	1	0,98	4,37	0
1/GF3	1,02	1	0,97	0,87	0
1/GF4	1,02	1	0,97	0	0
2/GF1	1	1	0,99	3,5	0
2/GF2	1,01	1	0,98	1,75	0
2/GF3	1,01	1	0,98	0	0
2/GF4	1,01	1	0,98	*	0
3/GF2	1,01	1	0,98	0	0
3/GF3	1,01	1	0,98	*	0
3/GF4	1,01	1	0,98	*	0
4/GF1	1,01	1	0,98	0	0
4/GF4	1,01	1	0,97	*	0

(*) GF a jusante do ponto curto-circuito.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 67: Variáveis linguísticas referente aos dados de entrada da Lógica Fuzzy para curto-circuito bifásico com GF conectado.

Teste/GF	Corrente	Potência	Tensão	D GD-BF	RF
1/GF1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	ML	BAIXA
1/GF3	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MP	BAIXA
1/GF4	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MP	BAIXA
2/GF1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	LONGE	BAIXA
2/GF2	ALTA	ALTA	ADEQUADA	PERTO	BAIXA
2/GF3	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MP	BAIXA
2/GF4	ALTA	ALTA	ADEQUADA	*	BAIXA
3/GF2	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MP	BAIXA
3/GF3	ALTA	ALTA	ADEQUADA	*	BAIXA
3/GF4	ALTA	ALTA	ADEQUADA	*	BAIXA
4/GF1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MP	BAIXA
4/GF4	ALTA	ALTA	ADEQUADA	*	BAIXA

Fonte: Próprio autor.

Com estes dados, têm-se as variáveis linguísticas referentes a cada dado de entrada, Tabela 67. Aplicando a Lógica Fuzzy, estima-se a corrente de curto-circuito injetada pelo GF em cada cenário, Tabela 68.

Tabela 68: Dados referentes aos resultados da Lógica Fuzzy para um curto-circuito bifásico com GF conectados comparados com os valores do DIGSILENT®.

Teste/GF	Variável linguística para corrente injetada	Corrente injetada Fuzzy (pu/A)	Corrente injetada DIGSILENT (pu/A)
1/GF1	PATAMAR 4 E 5	0,9/18,82	19,90
1/GF3	PATAMAR 5 E 6	1,1/23	22,94
1/GF4	PATAMAR 5 E 6	1,1/23	24,32
2/GF1	PATAMAR 5	1/20,91	20,07
2/GF2	PATAMAR 5	1/20,91	21,55
2/GF3	PATAMAR 5 E 6	1,1/23	24,33
2/GF4	PATAMAR 5 E 6	1,1/23	24,32
3/GF2	PATAMAR 5 E 6	1,1/23	24,29
3/GF3	PATAMAR 5 E 6	1,1/23	24,23
3/GF4	PATAMAR 5 E 6	1,1/23	24,20
4/GF1	PATAMAR 5 E 6	1,1/23	24,12
4/GF4	PATAMAR 5 E 6	1,1/23	24,14

Fonte: Próprio autor

Com os valores de corrente de curto-circuito estimados e com o valor das fases da tensão de cada GF, determinou-se o fator da corrente estimada do GF para cada cenário apresentado, Tabela 69. Estes valores, juntamente com os valores de impedância do sistema elétrico são responsáveis pelos dados de entrada das equações analíticas possibilitando estimar a variação da corrente de curto-circuito nas linhas do sistema elétrico, equações (31), (32) e (33) cujos resultados são apresentados na Tabela 70.

Tabela 69: Valor do módulo e ângulo utilizado nas equações (31), (32) e (33) para um curto-circuito bifásico com GFs conectados em cada teste.

TESTE	GF	CORRENTE EM AMPÉRES DO GF USADO NAS EQUAÇÕES	
		MÓDULO	ÂNGULO (EM GRAUS)
1	GF1	18,826	-59,55 (A); -179,79 (B); 59,98 (C)
	GF3	23,009	-59,11 (A); -179,39 (B); 59,68 (C)
	GF4	23,009	-59,31 (A); -179,32 (B); 60,06 (C)
2	GF1	20,918	-59,17 (A); -179,84 (B); 60,28 (C)
	GF2	20,918	-58,8 (A); -179,08 (B); 60,3 (C)
	GF3	23,009	-58,5 (A); -178,79 (B); 60,6 (C)
	GF4	23,009	-58,44 (A); -178,72 (B); 60,68 (C)
3	GF2	23,009	-59,18 (A); -179,46 (B); 59,92 (C)
	GF3	23,009	-58,89 (A); -179,16 (B); 60,22 (C)
	GF4	23,009	-58,73 (A); -179,01 (B); 60,37 (C)
4	GF1	23,009	-59,92 (A); -180,1 (B); 59,51 (C)
	GF4	23,009	-59,88 (A); -180,17 (B); 59,21 (C)

Fonte: Próprio autor.

Os valores da Tabela 70 são comparados com os valores da Tabela 71 referentes aos valores da variação da corrente de curto-circuito nas linhas obtidas através do DIGSILENT®. Comparando estes valores nota-se que o erro absoluto máximo, Tabela 72, é de aproximadamente 30 ampéres no teste 2, fase C da linha 01, fase esta que não está sob curto-circuito. Entretanto, no teste 1, linha 34, na fase A e na fase B, o erro é aproximadamente 30 ampéres. Este erro causa um erro absoluto elevado na determinação das correntes de curto-circuito nas fases desta respectiva linha, Tabela 75.

Os erros absolutos mencionados podem diminuir quando se aplica na fase C o valor do módulo da corrente injetada pela GF em regime permanente, Tabela 76. Vale ressaltar que o ângulo da corrente neste caso foi obtido através do ângulo da tensão, equação 34. Desde que se tenha disponível as correntes dos GFs em regime permanente na condição pré-falta, pode-se utilizar o módulo da corrente injetada pelo GF em regime

permanente presente na fase sem falta. Considerando isso, aumenta-se a exatidão na estimação das correntes nas fases sob curto-circuito e o ângulo pode ser utilizado o que foi calculado através da equação 34.

Tabela 70: Resultado das equações (31), (32) e (33) para um curto-circuito bifásico com GFs conectados em cada teste.

TESTE	FASE	MÓDULO DO DELTA I NAS LINHAS EM AMPÉRES - FUZZY			
		LINHA 01	LINHA12	LINHA23	LINHA34
1	A	24,24	35,69	35,69	55,46
	B	31,69	33,62	33,62	47,56
	C	65,02	46,19	46,19	23,09
2	A	29,06	38,47	54,62	23,09
	B	33,42	37,62	50,94	23,09
	C	59,19	67,11	46,19	23,09
3	A	43,7	43,7	46,19	23,09
	B	43,7	43,7	46,19	23,09
	C	69,29	69,29	46,19	23,09
4	A	29,13	23,09	23,09	23,09
	B	29,13	23,09	23,09	23,09
	C	46,19	23,09	23,09	23,09

Fonte: Próprio autor.

Tabela 71: Resultado da variação da corrente de curto-circuito nas linhas obtidos através do DIGSILENT® para um curto-circuito bifásico com GFs conectados em cada teste.

TESTE	FASE	MÓDULO DO DELTA I NAS LINHAS EM AMPÉRES – DIGSILENT®			
		LINHA 01	LINHA12	LINHA23	LINHA34
1	A	31,634	27,182	27,125	29,292
	B	38,442	20,909	20,85	24,409
	C	65,625	47,548	47,366	24,408
2	A	43,183	37,488	37,159	24,25
	B	50,196	32,886	26,976	24,382
	C	88,92	70,242	48,832	24,408
3	A	36,124	36,173	48,183	24,073
	B	36,646	36,602	48,198	24,075
	C	72,77	72,775	48,431	24,208
4	A	23,916	23,86	23,927	24,024
	B	24,439	23,747	23,846	23,978
	C	48,355	24,233	24,141	24,143

Fonte: Próprio autor.

Tabela 72: Valores do erro absoluto da variação da corrente de curto-circuito nas linhas do sistema elétrico contendo GF conectado devido a um curto-circuito bifásico.

TESTE	FASE	ERRO ABSOLUTO DO DELTA I NAS LINHAS EM AMPÉRES			
		LINHA 01	LINHA12	LINHA23	LINHA34
1	A	7,387	8,511	8,567	26,17
	B	6,749	12,711	12,77	23,153
	C	0,603	1,352	1,17	1,31
2	A	14,114	0,988	17,46	1,152
	B	16,773	4,734	23,965	1,284
	C	29,73	3,128	2,636	1,31
3	A	7,576	7,527	1,987	0,975
	B	7,054	7,098	2,002	0,977
	C	3,476	3,481	2,235	1,11
4	A	5,218	0,762	0,829	0,926
	B	4,694	0,649	0,748	0,88
	C	2,159	1,135	1,043	1,045

Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 73 observam-se os valores das correntes de curto-circuito nas linhas do sistema elétrico obtidos através da equação (21). Estes valores são comparados com os resultados obtidos através do DIGSILENT® com GF conectado no sistema elétrico, Tabela 74. Com isso foi possível calcular o erro absoluto da corrente de curto-circuito nas linhas do sistema elétrico, Tabela 75. Percebe-se que o erro absoluto maior é de aproximadamente 77 ampères na linha34, o qual foi reduzido com a utilização da corrente do GF em regime permanente da fase que não está envolvida no curto-circuito, Tabela 76, para 76,4579 ampères. Apesar do erro de aproximadamente de 77 ampères, para análise de curto-circuito este valor não influencia muito pois a corrente de falta é por volta de 900 ampères.

Tabela 73: Valor da corrente de curto-circuito em cada linha obtida através da equação (21), com GF conectado, para um curto-circuito bifásico.

TESTE	FASE	Corrente em ampères NAS LINHAS EM AMPÉRES - FUZZY			
		LINHA 01	LINHA12	LINHA23	LINHA34
1	A	956,991	934,811	900,383	875,817
	B	899,455	892,953	889,86	877,416
	C	18,308	22,161	-14,784	-7,378
2	A	1077,131	1057,655	1009,222	-15,148
	B	1023,325	1015,269	1000,342	-15,339
	C	24,584	1,636	-14,805	-7,389
3	A	1455,492	1447,517	-30,345	-15,166
	B	1408,174	1406,495	-30,723	-15,355
	C	16,023	0,863	-14,872	-7,423
4	A	2346,481	24,522	-7,298	-15,191
	B	2299,105	0,129	-7,574	-15,329
	C	39,107	47,047	8,224	-7,423

Fonte: Próprio autor.

Tabela 74: Valor da corrente de curto-circuito em cada linha obtida através do DIGSILENT®, com GF conectado, para um curto-circuito bifásico.

TESTE	FASE	Corrente em ampères NAS LINHAS EM AMPÉRES - DIGSILENT			
		LINHA 01	LINHA12	LINHA23	LINHA34
1	A	961,587	970,862	936,942	953,643
	B	927,833	931,947	929,331	948,759
	C	33,868	39,263	19,812	11,063
2	A	1082,399	1092,64	1081,88	18,976
	B	1053,681	1059,398	1072,772	24,107
	C	34,476	36,893	21,85	10,875
3	A	1496,218	1488,461	37,602	18,795
	B	1453,837	1452,526	47,736	23,822
	C	42,411	39,212	21,484	10,693
4	A	2374,46	26,557	15,245	18,567
	B	2328,836	30,612	26,376	24,039
	C	50,917	51,628	12,343	11,031

Fonte: Próprio autor.

Observando as fases A e B da Tabela 75 nota-se alguns valores negativos de corrente de curto-circuito nas linhas, isso indica o fluxo de corrente no sentido inverso, isso fica evidenciado que iria ocorrer na Tabela 67, pois apresenta GF conectada a jusante da falta.

Tabela 75: Valor do erro absoluto referente à corrente de curto-circuito em cada linha do sistema quando há GF conectado e sob curto-circuito bifásico.

TESTE	FASE	Erro absoluto em ampéres referente à corrente NAS LINHAS			
		LINHA 01	LINHA12	LINHA23	LINHA34
1	A	4,595	36,051	36,558	77,825
	B	28,378	38,994	39,47	71,343
	C	15,56	17,102	5,028	3,684
2	A	5,268	34,985	72,658	3,828
	B	30,356	44,129	72,43	8,768
	C	9,892	35,257	7,045	3,485
3	A	40,726	40,944	7,256	3,629
	B	45,663	46,031	17,013	8,467
	C	26,388	38,349	6,612	3,269
4	A	27,979	2,035	7,946	3,376
	B	29,731	30,482	18,801	8,709
	C	11,81	4,58	4,118	3,607

Fonte: Próprio autor.

Tabela 76: Resultados para a substituição do valor da corrente do GF em regime permanente na fase C.

TESTE	FASE	Resultados para o teste 1 com a corrente do GF em Regime Permanente na fase C			
		LINHA 01	LINHA12	LINHA23	LINHA34
Delta calculado	A	22,916	34,234	34,234	54,094
	B	30,375	32,169	32,169	46,363
	C	63,902	42,72	42,720	21,364
Erro do delta	A	8,717	7,052	7,108	24,802
	B	8,066	11,26	11,319	21,953
	C	1,723	4,827	4,645	3,044
Corrente nas linhas	A	958,321	936,27	901,842	877,185
	B	900,772	894,404	891,311	878,616
	C	19,427	25,636	-11,309	-5,644
Erro nas linhas	A	3,265	34,592	35,099	76,457
	B	27,061	37,542	38,019	70,143
	C	14,44	13,627	31,121	16,708

Fonte: Próprio autor.

Os resultados apresentados na Tabela 76 não são significativos para o caso do GF utilizado pois a contribuição dele na fase C durante o curto-circuito é próxima ao valor da corrente pré-falta, quando este valor for muito diferente tem-se erros menores, como os observados para os GAs e DFIGs.

5.1.3 Curto-circuito monofásico

Para curto-circuito monofásico simulou-se o sistema elétrico da Figura 8 segundo os cenários apresentados na Tabela 77. O curto-circuito foi simulado na fase A do sistema elétrico com resistência de falta de 0 ohms para os testes 1, 2 e 3, e de 40 ohms para o teste 4. Os dados de entrada da LF foram retirados do DIGSilent®, Tabela 78, cujas variáveis linguísticas são apresentadas na Tabela 79. Na Tabela 80 estão presentes os resultados do modelo Fuzzy possibilitando, juntamente com o cálculo do ângulo aproximado, equação 34, para a corrente de falta do GF obter o fator da corrente estimada injetada pelo GF, Tabela 81.

Tabela 77: Cenários para validar o método completo para o curto-circuito monofásico com GFs conectados.

Teste	Barra que há GF conectada	Barra em falta	Configuração das cargas
1	1, 3 e 4	4	Igual da Tabela 4.
2	1	3	Igual da Tabela 4.
3	1, 3 e 4	2	Igual da Tabela 4.
4	1, 2 e 3	1	Igual da Tabela 4.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 78: Valores obtidos com o DIGSILENT® para formar a entrada da LF o curto-circuito monofásico com GF conectado.

Teste/GF	Corrente (pu)	Potência (pu)	Tensão (pu)	D GD-BF (Ω)	RF (Ω)
1/GF1	1,01	1	0,98	4,37	0
1/GF3	1,02	1	0,97	0,87	0
1/GF4	1,02	1	0,97	0	0
2/GF1	1,02	1	0,98	3,5	0
3/GF1	1,01	1	0,98	1,75	0
3/GF3	1,02	1	0,97	*	0
3/GF4	1,02	1	0,97	*	0
4/GF1	1,01	1	0,98	0	40
4/GF2	1,01	1	0,98	*	40
4/GF3	1,02	1	0,97	*	40

(*) GF a jusante do ponto de curto-circuito.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 79: Variáveis linguísticas referente aos dados de entrada da LF para o curto-circuito monofásico com GF conectado.

Teste/GF	Corrente	Potência	Tensão	D GD-BF	RF
1/GF1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	ML	BAIXA
1/GF3	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MP	BAIXA
1/GF4	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MP	BAIXA
2/GF1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	LONGE	BAIXA
3/GF1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	PERTO	BAIXA
3/GF3	ALTA	ALTA	ADEQUADA	*	BAIXA
3/GF4	ALTA	ALTA	ADEQUADA	*	BAIXA
4/GF1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MP	ALTA
4/GF2	ALTA	ALTA	ADEQUADA	*	ALTA
4/GF3	ALTA	ALTA	ADEQUADA	*	ALTA

(*) GF a jusante do ponto de curto-circuito.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 80: Dados referentes ao resultado da lógica Fuzzy do método completo para um curto-circuito monofásico com GF conectados comparados com valores do DIGSILENT®.

Teste/GF	Variável linguística para corrente injetada	Corrente injetada Fuzzy (pu/A)	Corrente injetada DIGSILENT (pu/A)
1/GF1	PATAMAR 5	1/20,918	1,01/21,12
1/GF3	PATAMAR 9	1,8/37,652	1,53/32,16
1/GF4	PATAMAR 9	1,8/37,652	1,71/35,878
2/GF1	PATAMAR 5 e 6	1,1/23,009	1,02/21,377
3/GF1	PATAMAR 6 e 7	1,3/27,19	1,21/25,34
3/GF3	PATAMAR 9	1,8/37,652	1,76/36,84
3/GF4	PATAMAR 9	1,8/37,652	1,71/35,79
4/GF1	PATAMAR 5 e 6	1,1/23,009	1,06/22,25
4/GF2	PATAMAR 5 e 6	1,1/23,009	1,07/22,392
4/GF3	PATAMAR 5 e 6	1,1/23,009	1,074/22,473

Fonte: Próprio autor.

Tabela 81: Valor do módulo e ângulo utilizado nas equações (31), (32) e (33) para um curto-circuito monofásico com GFs conectados em cada teste.

TESTE	GF	CORRENTE EM AMPÉRES DO GF USADO NAS EQUAÇÕES	
		MÓDULO	ÂNGULO (EM GRAUS)
1	GF1	20,918	-59,54 (A); -179,72 (B); 59,9 (C)
	GF3	37,652	-59,11 (A); -179,4 (B); 60 (C)
	GF4	37,652	-59,36 (A); -179,32 (B); 60,1(C)
2	GF1	23,009	-60,3 (A); -180,48 (B); 59,13 (C)
3	GF1	27,19	-59,54 (A); -179,72 (B); 59,9 (C)
	GF3	37,652	-59,11 (A); -179,39 (B); 59,99 (C)
	GF4	37,652	-59,04 (A); -179,39 (B); 60,07 (C)
4	GF1	23,009	-59,54 (A); -179,72 (B); 59,9 (C)
	GF2	23,009	-59,41 (A); -179,69 (B); 59,69 (C)
	GF3	23,009	-59,35 (A); -179,63 (B); 59,75 (C)

Fonte: Próprio autor.

Com os dados da Tabela 81 e com os dados do sistema elétrico foi possível aplicar as equações (31), (32) e (33) para estimar a variação da corrente nas linhas do sistema elétrico, Tabela 82. Para comparar a eficiência do método, o valor da variação da corrente nas linhas do sistema foi obtido também com o DIGSILENT®, Tabela 83, possibilitando calcular o erro absoluto da variação da corrente nas linhas em ampères, Tabela 84.

Tabela 82 Resultado das equações (31), (32) e (33) para um curto-circuito monofásico com GFs conectados em cada teste.

TESTE	FASE	CORRENTE (A)/ SEÇÕES			
		01	12	23	34
1	A	14,072	34,422	34,422	71,899
	B	96,222	75,304	75,304	37,652
	C	96,222	75,304	75,304	37,652
2	A	8,572	14,478	14,478	0
	B	23,009	5,44E-09	5,44E-09	0
	C	23,009	6,31E-09	6,31E-09	0
3	A	25,689	52,524	75,30479	37,652
	B	102,494	75,304	75,30479	37,652
	C	102,494	75,304	75,30472	37,652
4	A	38,038	23,443	23,009	0
	B	69,029	46,0196	23,009	0
	C	69,029	46,0196	23,009	0

Fonte: Próprio autor.

Tabela 83: Resultado da variação da corrente nas linhas obtidos através do DIGSILENT® para um curto-circuito monofásico com GFs conectados em cada teste.

TESTE	FASE	CORRENTE (A)/ SEÇÕES			
		01	12	23	34
1	A	30,417	31,876	31,94	42,311
	B	99,783	73,246	73,106	37,693
	C	27,077	13,234	12,987	5,775
2	A	11,092	12,046	12,076	0,015
	B	27,829	0,215	0,128	0,064
	C	13,597	0,271	0,14	0,07
3	A	35,007	35,14	71,559	35,743
	B	105,413	74,823	74,794	37,379
	C	21,455	11,384	11,202	5,613
4	A	65,003	45,123	22,456	0,592
	B	66,924	44,708	22,374	0,586
	C	63,703	42,89	21,04	0,606

Fonte: Próprio autor.

Tabela 84: Valores do erro absoluto da variação da corrente nas linhas do sistema elétrico contendo GF conectado devido a um curto-circuito monofásico.

TESTE	FASE	CORRENTE (A)/ SEÇÕES			
		01	12	23	34
1	A	16,345	2,546	2,482	29,587
	B	3,56	2,058	2,198	0,04
	C	69,145	62,07	62,317	31,877
2	A	2,52	2,431	2,401	0,015
	B	4,819	0,215	0,128	0,064
	C	9,412	0,271	0,14	0,07
3	A	9,317	17,384	3,745	1,908
	B	2,919	0,481	0,51	0,272
	C	81,039	63,92	64,102	32,039
4	A	26,964	21,68	0,552	0,592
	B	2,105	1,31	0,634	0,586
	C	5,325	3,128	1,969	0,606

Fonte: Próprio autor.

Observando os valores da fase A, nota-se que o erro máximo foi de aproximadamente 30 ampéres na linha 34 do teste 1; e um erro de 16 ampéres no mesmo teste para a linha 01; e os demais não apresentam valores superiores a 10 ampéres.

Com os valores contidos na Tabela 80 e com o valor da corrente em cada linha para faltas com o sistema elétrico sem GF conectados obtido através do DIGSILENT®, calculou-se, através da equação (21), o valor estimado da corrente de falta nas linhas do sistema elétrico quando este apresentar GF conectados, Tabela 85. Comparando estes valores com os obtidos diretamente do DIGSILENT®, Tabela 86, pode-se calcular o erro absoluto da corrente nas linhas do sistema elétrico quando este apresentar GFs conectados, Tabela 87.

Na Tabela 87, fase A do teste 1, nota-se que o erro máximo absoluto apresenta valor de 108,187 ampéres para a corrente estimada na linha 34. Considerando-se a corrente obtida através do DIGSILENT® como referência tem-se um erro percentual de 7,14% na estimação da corrente obtida através da equação (24).

Outro detalhe do método que deve ser observado é o valor negativo presente na fase A das linhas 23 e 34 do teste 3, da Tabela 85. Este valor negativo significa que a corrente flui no sistema elétrico no sentido inverso do convencional, facilmente

observado este fenômeno quando se determinou no teste 3 a presença de GF a jusante do ponto de falta. No teste 4, apesar de existir duas GFs conectadas a jusante do ponto de curto, a corrente que flui nas linhas é positiva devido à impedância de falta ser alta, 40 ohms.

Portanto, para análise de curto-circuito em sistemas elétricos contendo GF conectados, o modelo desenvolvido nesta tese se mostra eficiente para estimar a corrente de falta que flui através das linhas.

Tabela 85: Valor da corrente em cada linha obtida através da equação (21), com GF conectado, para o curto-circuito monofásico.

TESTE	FASE	CORRENTE (A)/ SEÇÕES			
		01	12	23	34
1	A	1502,095	1472,447	448,444	1407,91
	B	-37,302	-30,321	-48,563	-24,328
	C	-28,041	-21,423	-47,384	-23,679
2	A	1708,838	1694,346	1672,897	1,441
	B	35,076	44,342	26,614	13,318
	C	45,008	53,805	27,907	13,965
3	A	2323,586	2290,39	-72,418	-36,208
	B	-46,178	-32,329	-48,723	-24,35
	C	-33,069	-19,809	-47,444	-23,711
4	A	235,974	56,122	7,744	15,389
	B	-0,493	7,4	7,818	15,426
	C	12,853	21,223	8,862	15,949

Fonte: Próprio autor.

Tabela 86: Valor da corrente em cada linha obtida através do DIGSILENT®, com GF conectado, para o curto-circuito monofásico.

TESTE	FASE	CORRENTE (A)/ SEÇÕES			
		01	12	23	34
1	A	1500,822	1512,162	1488,495	1516,097
	B	-42,192	-31,617	-48,077	-25,52
	C	-44,578	-40,866	-17,971	-9,102
2	A	1706,713	1719,324	1697,947	1,433
	B	30,412	44,246	26,557	13,289
	C	57,6	53,652	27,829	13,925
3	A	2339,552	2358,521	-68,803	-34,363
	B	-53,624	-38,031	-50,34	-25,126
	C	-51,	-44,457	-18,255	-9,136
4	A	209,12	42,535	16,218	15,088
	B	-38,438	28,7	16,952	15,131
	C	24,497	25,529	17,694	15,637

O sinal negativo foi inserido observando a potência nas barras do DIGSILENT.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 87: Valor do erro absoluto referente à corrente em cada linha do sistema quando há GF conectado e sob o curto-circuito monofásico.

TESTE	FASE	CORRENTE (A)/ SEÇÕES			
		01	12	23	34
1	A	1,273	39,715	40,051	108,187
	B	4,889	1,295	0,485	1,191
	C	16,537	19,443	29,413	14,577
2	A	2,125	24,978	25,05	0,008
	B	4,664	0,096	0,057	0,028
	C	12,591	0,153	0,077	0,039
3	A	15,966	68,131	3,615	1,844
	B	7,445	5,702	1,617	0,776
	C	17,93	24,647	29,189	14,574
4	A	26,853	13,587	8,473	0,301
	B	37,945	21,299	9,134	0,294
	C	11,644	4,306	8,831	0,312

Fonte: Próprio autor.

5.2 TESTES E RESULTADOS PARA O SDEE COM INSERÇÃO de GAs

Para os testes considerando os GAs, optou-se por utilizar alguns dos cenários descritos na seção 4.2.1. Nas próximas seções estão apresentados os resultados para os três tipos de curto-circuito.

5.2.1 Curto-circuito trifásico

Para o curto-circuito trifásico utilizou-se os cenários descritos nos testes 2, 5, 6 e 7 da Tabela 30. Sendo assim, todo o cálculo para estimar a corrente injetada pelo GA através da lógica Fuzzy está pronto. Então, dando continuidade, utilizou-se o módulo da corrente estimada através da lógica Fuzzy e a equação (34) para obter o fator da corrente estimada do GA durante a falta.

Na Tabela 88 estão contidos os fatores da corrente do GA para serem utilizados nas equações (31), (32) e (33). Estas equações resultaram na variação da corrente de

curto-circuito nas linhas do sistema para cada cenário, Tabela 89. Com a finalidade de observar o quão próximo estes valores estão do valor real, obteve-se do DIGSILENT® o valor da variação das correntes de curto-circuito nas linhas do sistema elétrico, Tabela 90. Lembrando-se que esta variação obtida através do DIGSILENT® é decorrente da subtração dos módulos das correntes do sistema elétrico com e sem GA respectivamente para cada cenário.

Tabela 88: Valor do módulo e ângulo utilizado nas equações (31), (32) e (33) para um curto-circuito trifásico com GAs conectados em cada teste.

TESTE	GA	CORRENTE EM AMPÉRES DO GF USADO NAS EQUAÇÕES	
		MÓDULO	ÂNGULO (EM GRAUS)
2	GA1	20,52	-60,65 (A);-180,83 (B); 58,78 (C)
5	GA1	11,761	-60,57 (A);-180,75 (B); 58,86 (C)
	GA3	20,152	-61 (A);-181,28 (B);58,08 (C)
6	GA1	20,152	-60,5 (A);-180,67 (B);58,94 (C)
	GA2	29,622	-60,75 (A);-181,02 (B);58,34 (C)
	GA3	28,585	-78,63 (A);161,37 (B);41,37 (C)
7	GA3	20,152	-61,65 (A);-182,41 (B);56 (C)

Fonte: Próprio autor.

Tabela 89: Resultado das equações (31), (32) e (33) para um curto-circuito trifásico com GAs conectados em cada teste.

TESTE	FASE	CORRENTE (A)/ SEÇÕES			
		01	12	23	34
2	A	7,695	12,825	0	0
	B	7,695	12,825	0	0
	C	7,695	12,825	0	0
5	A	11,879	0,122	0,122	20,034
	B	11,879	0,124	0,124	20,034
	C	11,879	0,131	0,131	20,034
6	A	7,557	12,595	31,34	0
	B	7,557	12,595	31,34	0
	C	7,557	12,595	31,34	0
7	A	4,317	4,317	4,317	15,832
	B	4,317	4,317	4,317	15,832
	C	4,317	4,317	4,317	15,832

Fonte: Próprio autor.

Tabela 90: Resultado da variação da corrente nas linhas obtidos através do DIGSILENT® para um curto-circuito trifásico com GAs conectados em cada teste.

TESTE	FASE	CORRENTE (A)/ SEÇÕES			
		01	12	23	34
2	A	7,051	11,817	0	0
	B	7,051	11,817	0	0
	C	7,051	11,817	0	0
5	A	12,023	0,752	0,806	21,333
	B	12,018	0,758	0,795	21,329
	C	12,021	0,798	0,762	21,333
6	A	7,035	11,843	28,397	0,103
	B	7,035	11,843	28,398	0,102
	C	7,035	11,842	28,4	0,102
7	A	4,466	4,487	4,596	16,601
	B	4,478	4,501	4,558	16,599
	C	4,482	4,505	4,55	16,602

Fonte: Próprio autor.

Com os valores presentes nas Tabelas 89 e 90 foi possível calcular o erro absoluto da variação da corrente nas linhas do sistema elétrico, Tabela 91. Observa-se que os erros são muito pequenos, inferiores a 2 ampères, corroborando a eficiência do método proposto para calcular a variação da corrente nas linhas do sistema elétrico combinando a lógica Fuzzy e as equações desenvolvidas.

Tabela 91: Valores do erro absoluto da variação da corrente nas linhas do sistema elétrico contendo GA conectado devido ao curto-circuito trifásico.

TESTE	FASE	CORRENTE (A)/ SEÇÕES			
		01	12	23	34
2	A	0,643	1,0074	0	0
	B	0,643	1,0071	0	0
	C	0,643	1,0072	0	0
5	A	0,144	0,63	0,684	1,298
	B	0,139	0,633	0,671	1,294
	C	0,142	0,667	0,63	1,299
6	A	0,521	0,751	2,942	0,103
	B	0,521	0,752	2,941	0,102
	C	0,521	0,752	2,939	0,102
7	A	0,148	0,169	0,278	0,769
	B	0,16	0,183	0,24	0,766
	C	0,164	0,188	0,232	0,769

Fonte: Próprio autor.

Com os valores contidos na Tabela 89 foi possível estimar a corrente de falta que flui nas linhas do sistema elétrico através da equação (21), Tabela 92. Estes valores foram comparados com os valores das correntes das linhas retirados do DIGSILENTE®, Tabela 93. Então, calculou-se o erro absoluto das correntes nas linhas em ampéres, Tabela 94. Nota-se que os valores obtidos para o erro absoluto nas linhas são muito baixos, inferiores a 2 ampéres, possibilitando afirmar que o método proposto é eficiente e robusto para este caso também.

Tabela 92: Valor da corrente em cada linha obtida através da equação (21), com GA conectado, para o curto-circuito trifásico.

TESTE	FASE	CORRENTE (A)/ SEÇÕES			
		01	12	23	34
2	A	1695,607	1710,742	0	0
	B	1695,599	1710,756	0	0
	C	1695,587	1710,776	0	0
5	A	976,544	978,637	960,443	978,304
	B	972,70	974,793	965,536	983,324
	C	971,621	973,735	967,068	984,942
6	A	1695,744	1710,514	31,34	0
	B	1695,736	1710,527	31,34	0
	C	1695,724	1710,548	31,34	0
7	A	984,488	974,997	956,169	972,945
	B	980,428	971,031	961,471	978,27
	C	979,218	969,903	963,146	980,005

Fonte: Próprio autor.

Tabela 93: Valor da corrente em cada linha obtida através do DIGSILENT®, com GA conectado, para o curto-circuito trifásico.

TESTE	FASE	CORRENTE (A)/ SEÇÕES			
		01	12	23	34
2	A	1696,511	1709,246	0	0
	B	1696,502	1709,26	0	0
	C	1696,489	1709,283	0	0
5	A	976,397	978,536	960,515	978,443
	B	972,591	974,731	965,558	983,413
	C	971,507	973,668	967,096	985,036
6	A	1.696,49	1.709,29	31,27	0,11
	B	1.696,48	1.709,31	31,27	0,11
	C	1.696,47	1.709,33	31,27	0,11
7	A	984,507	975,01	956,165	972,987
	B	980,449	971,047	961,481	978,259
	C	979,234	969,914	963,138	980,06

Fonte: Próprio autor.

Tabela 94: Valor do erro absoluto referente à corrente em cada linha do sistema quando há GA conectado e sob um curto-circuito trifásico.

TESTE	FASE	CORRENTE (A)/ SEÇÕES			
		01	12	23	34
2	A	0,904	1,496	0	0
	B	0,903	1,496	0	0
	C	0,902	1,493	0	0
5	A	0,147	0,101	0,071	0,139
	B	0,109	0,062	0,021	0,089
	C	0,114	0,067	0,027	0,094
6	A	0,746	1,224	0,07	0,11
	B	0,744	1,217	0,07	0,11
	C	0,746	1,218	0,07	0,11
7	A	0,019	0,013	0,004	0,041
	B	0,021	0,015	0,01	0,011
	C	0,015	0,01	0,008	0,054

Fonte: Próprio autor.

5.2.2 Curto-circuito bifásico

Utilizando-se dos testes 1, 5, 6 e 7 contidos na Tabela 34 e com os resultados da corrente estimada dos GAs obtidos através da LF, Tabela 37, obteve-se, juntamente com o ângulo calculado através do ângulo da tensão em regime do GA, equação (34), o fator da corrente estimada pelo GA durante uma falta bifásica para os respectivos cenários, Tabela 95.

Tabela 95: Valor do módulo e ângulo utilizado nas equações (31), (32) e (33) para um curto-circuito bifásico com GAs conectados em cada teste.

TESTE	GA	CORRENTE EM AMPÉRES DO GF USADO NAS EQUAÇÕES	
		MÓDULO	ÂNGULO (EM GRAUS)
1	GA3	20,15	-61,04 (A); -181,32 (B); 58,04 (C)
5	GA1	8,964	-60,57 (A); -180,75 (B); 58,86 (C)
	GA3	20,15	-61 (A); -181,28 (B); 58,08 (C)
6	GA1	20,15	-60,57 (A); -180,75 (B); 58,86 (C)
	GA3	25,746	-61 (A); -181,28 (B); 58,08 (C)
7	GA2	14,558	-61,66 (A); -182,66 (B); 55,34 (C)
	GA3	20,15	-62 (A); -183,1 (B); 54,6 (C)

Fonte: Próprio autor.

Com os resultados da Tabela 95 e aplicando as equações (31), (32) e (33) obteve-se a variação da corrente de curto-circuito nas linhas do sistema elétrico utilizado como teste na presença de GAs, Tabela 96, os quais foram comparados com a variação de corrente de curto-circuito obtida através do DIGSILENT®, Tabela 97. Calculou-se o erro absoluto envolvendo os valores apresentados nas Tabela 96 e 97 conforme apresentado na Tabela 98. Nota-se que os erros absolutos apresentados pelas fases A e B não ultrapassam 30 ampéres, sendo que os erros mais elevados ocorrem no teste 6. Sendo assim, substituiu-se o valor da corrente de falta da fase C dos GAs 1 e 3 pela corrente injetada em regime resultando uma melhora no erro da variação da corrente nas linhas, Tabela 102.

Tabela 96: Resultado das equações (31), (32) e (33) para um curto-circuito bifásico com GAs conectados em cada teste.

TESTE	FASE	CORRENTE (A)/ SEÇÕES			
		01	12	23	34
1	A	16,237	16,237	16,237	0
	B	16,237	16,237	16,237	0
	C	25,746	25,746	25,746	0
5	A	8,672	11,223	11,223	28,796
	B	13,531	11,799	11,799	24,958
	C	29,113	20,15	20,15	6,7E-99
6	A	19,61	34,231	25,745	0
	B	23,378	30,029	25,745	0
	C	45,894	25,745	25,745	0
7	A	11,237	11,237	18,152	36,233
	B	15,88	15,88	16,849	31,979
	C	34,707	34,707	20,15	8,5E-99

Fonte: Próprio autor.

Tabela 97: Resultado da variação da corrente nas linhas obtidos através do DIGSILENT® para um curto-circuito bifásico com GAs conectados em cada teste.

TESTE	FASE	CORRENTE (A)/ SEÇÕES			
		01	12	23	34
1	A	1,857	1,864	1,901	0,025
	B	1,869	1,879	1,896	0,024
	C	3,726	3,744	3,797	0,049
5	A	12,377	0,109	0,084	23,418
	B	6,02	3,77	3,737	23,385
	C	6,649	3,74	3,806	0,065
6	A	9,325	8,43353	26,397	0,117
	B	3,033	12,068	22,799	0,065
	C	6,594	3,693	3,727	0,064
7	A	11,433	11,486	4,73	27,16
	B	3,699	3,718	8,674	27,005
	C	7,888	7,924	4,009	0,34

Fonte: Próprio autor.

Tabela 98: Valores do erro absoluto da variação da corrente de curto-circuito nas linhas do sistema elétrico contendo GA conectado devido ao curto-circuito bifásico.

TESTE	FASE	CORRENTE (A)/ SEÇÕES			
		01	12	23	34
1	A	14,38	14,372	14,335	0,025
	B	14,367	14,357	14,341	0,024
	C	22,02	22,002	21,949	0,049
5	A	3,704	11,113	11,139	5,377
	B	7,51	8,028	8,062	1,572
	C	22,464	16,409	16,343	0,065
6	A	10,284	25,798	0,651	0,117
	B	20,345	17,96	2,945	0,065
	C	39,3	22,052	22,017	0,064
7	A	0,196	0,249	13,421	9,073
	B	12,181	12,162	8,175	4,973
	C	26,818	26,783	16,14	0,34

Fonte: Próprio autor.

Tabela 99: Valor da corrente de curto-circuito em cada linha obtida através da equação (21), com GA conectado, para o curto-circuito bifásico.

TESTE	FASE	CORRENTE (A)/ SEÇÕES			
		01	12	23	34
1	A	980,079	969,32	934,805	947,298
	B	925,419	920,757	917,567	937,002
	C	69,108	55,291	16,099	15,719
5	A	975,612	972,672	938,117	950,631
	B	919,831	923,216	919,983	939,417
	C	63,697	55,279	16,086	15,719
6	A	1498,887	1508,415	15,527	7,931
	B	1440,312	1456,564	29,057	7,742
	C	55,347	52,522	14,148	15,674
7	A	1014,53	1003,322	943,854	956,247
	B	899,427	893,87	898,654	917,888
	C	146,683	132,952	59,618	58,109

Fonte: Próprio autor.

Tabela 100: Valor da corrente de curto-circuito em cada linha obtida através do DIGSILENT®, com GA conectado, para o curto-circuito bifásico.

TESTE	FASE	CORRENTE (A)/ SEÇÕES			
		01	12	23	34
1	A	978,26	967,532	933,127	950,831
	B	925,343	920,756	917,649	937,622
	C	80,896	65,785	29,9	15,719
5	A	971,23	972,413	937,987	955,711
	B	918,487	923,6261	920,517	940,513
	C	77,327	65,79	29,904	15,719
6	A	1496,317	1505,162	19,816	7,931
	B	1442,98	1455,928	35,548	7,742
	C	79,504	67,81709	29,787	15,674
7	A	1012,183	1001,016	945,281	961,869
	B	898,622	893,154	896,325	914,066
	C	162,255	147,192	71,269	58,109

Fonte: Próprio autor.

Tabela 101: Valor do erro absoluto referente à corrente de curto-circuito em cada linha do sistema quando há GA conectado e sob um curto-circuito bifásico.

TESTE	FASE	CORRENTE (A)/ SEÇÕES			
		01	12	23	34
1	A	1,819	1,788	1,677	3,533
	B	0,076	0,001	0,082	0,619
	C	11,787	10,494	13,801	0
5	A	4,382	0,259	0,129	5,08
	B	1,344	0,409	0,534	1,096
	C	13,63	10,511	13,817	0
6	A	2,57	3,253	4,289	0
	B	2,668	0,636	6,491	0
	C	24,156	15,294	15,639	0
7	A	2,347	2,306	1,43	5,621
	B	0,804	0,716	2,328	3,822
	C	15,571	14,239	11,651	0

Fonte: Próprio autor.

Tabela 102: Resultados para a substituição do valor da corrente do GA em regime permanente na fase C.

TESTE	FASE	CORRENTE (A)/ SEÇÕES			
		01	12	23	34
Delta calculado	A	5,572	15,519	25,74	0
	B	7,528	14,076	25,74	0
	C	7,392	3,819	3,819	0
Erro do delta	A	3,753	7,086	0,657	0,117
	B	4,494	2,007	2,94	0,065
	C	0,798	0,126	0,091	0,064
Corrente nas linhas	A	1493,622	1503,08	15,522	7,935
	B	1444,353	1460,606	29,052	7,746
	C	79,472	67,216	27,963	15,681
Erro nas linhas	A	3,173	3,822	4,06	0,017
	B	4,489	1,186	6,385	0,035
	C	0,075	0,513	1,779	0,018

Fonte: Próprio autor.

Com os resultados da variação da corrente de curto-circuito nas linhas do sistema elétrico calculou-se o valor aproximado da corrente que percorre as linhas durante a falta para cada cenário, Tabela 99, cujos valores foram comparados com os valores das correntes de curto-circuito obtidas com a simulação no DIGSilent®, Tabela 100. Nota-se que os erros apresentados nas fases A e B não ultrapassaram o valor de 6 ampéres. Com a substituição da corrente de curto-circuito dos GAs 1 e 3 no teste 6, os valores dos erros das linhas aumentaram aproximadamente 1,5 ampéres. Entretanto este aumento é insignificante frente a corrente de falta que flui na linha durante o curto-circuito bifásico.

Conclui-se que, independentemente da corrente utilizada para o cálculo da variação da corrente de curto-circuito nas linhas e da corrente de curto-circuito nelas durante um curto-circuito bifásico, o método desenvolvido se mostra confiável para a análise de curto-circuito bifásico contendo GAs.

5.2.3 Curto-circuito monofásico

Para realizar os testes de curto-circuito monofásico utilizaram-se os cenários 3, 4, 5 e 7 apresentados na Tabela 38. Os valores do módulo e ângulo contidos na Tabela 103 foram obtidos do resultado da lógica Fuzzy, Tabela 41, e do ângulo da tensão do GA em regime permanente subtraído em 90 graus, equação (34), respectivamente.

Tabela 103: Valor do módulo e ângulo utilizado nas equações (31), (32) e (33) para um curto-circuito monofásico com GAs conectados em cada teste.

TESTE	GA	CORRENTE EM AMPÉRES DO GF USADO NAS EQUAÇÕES	
		MÓDULO	ÂNGULO (EM GRAUS)
3	GA1	8,964	-60,55 (A); -180,72 (B); 58,88 (C)
	GA4	25,746	-61 (A); -181,28 (B); 58,08 (C)
4	GA2	20,15	-60,8 (A); -181,08 (B); 58,28 (C)
	GA4	25,746	-60,95 (A); -181,23 (B); 58,13 (C)
5	GA2	14,996	-61,67 (A); -182,66 (B); 55,33 (C)
	GA3	20,15	-61,98 (A); -183,1 (B); 54,6 (C)
7	GA1	4,381	-60,92 (A); -181,53 (B); 57,28 (C)
	GA2	3,909	-61,49 (A); -182,45 (B); 55,56 (C)
	GA3	4,347	-61,76 (A); -182,84 (B); 54,88 (C)
	GA4	3,909	-61,88 (A); -182,84 (B); 54,55 (C)

Fonte: Próprio autor.

Aplicando-se os resultados apresentados na Tabela 103 nas equações (31), (32) e (33) é possível estimar a variação da corrente de curto-circuito nas linhas do sistema elétrico frente a um curto-circuito quando este apresenta GA, Tabela 104. Com a finalidade de comparar a eficiência das equações, calculou-se a variação da corrente de curto-circuito nas linhas do sistema elétrico utilizando as simulações no DIGSILENT®, Tabela 105. Com isso, foi possível calcular o erro absoluto entre estes dois valores, Tabela 106. Nota-se que os erros apresentados na Tabela 106 não foram maiores do que 3 ampéres, corroborando com a eficiência do método proposto.

Tabela 104: Resultado das equações (31), (32) e (33) para um curto-circuito monofásico com GAs conectados em cada teste.

TESTE	FASE	CORRENTE (A)/ SEÇÕES			
		01	12	23	34
3	A	6,389	15,211	15,211	15,211
	B	34,71	25,746	25,746	25,746
	C	34,71	25,746	25,746	25,746
4	A	10,223	10,223	30,175	25,746
	B	45,896	45,896	25,746	25,746
	C	45,896	45,896	25,746	25,746
5	A	5,007	5,007	19,852	39,972
	B	35,146	35,146	20,15	1,6E-198
	C	35,145	35,145	20,15	1,9E-198
7	A	15,43	11,088	7,244	3,15
	B	16,545	12,165	8,256	3,909
	C	16,543	12,165	8,256	3,909

Fonte: Próprio autor.

Tabela 105: Resultados da variação da corrente de curto-circuito nas linhas obtidos através do DIGSILENT® para um curto-circuito monofásico com GAs conectados em cada teste.

TESTE	FASE	CORRENTE (A)/ SEÇÕES			
		01	12	23	34
3	A	5,817	15,926	15,802	15,762
	B	12,346	10,451	10,451	10,435
	C	24,029	15,929	16,040	16,102
4	A	10,521	10,476	29,057	26,334
	B	16,764	16,764	10,396	10,375
	C	28,286	28,333	15,941	16,014
5	A	3,464	3,411	18,06	39,604
	B	12,525	12,531	7,891	0,137
	C	24,147	24,198	13,703	0,304
7	A	17,64	13,73	9,516	4,542
	B	10,168	7,138	4,588	2,045
	C	21,08	16,385	11,287	5,465

Fonte: Próprio autor.

Tabela 106: Valores do erro absoluto da variação da corrente de curto-circuito nas linhas do sistema elétrico contendo GA conectado devido a um curto-circuito monofásico.

TESTE	FASE	CORRENTE (A)/ SEÇÕES			
		01	12	23	34
3	A	0,572	0,714	0,59	0,55
	B	22,364	15,295	15,294	15,311
	C	10,68	9,817	9,705	9,643
4	A	0,298	0,252	1,118	0,587
	B	29,131	29,132	15,35	15,371
	C	17,61	17,562	9,805	9,732
5	A	1,543	1,595	1,792	0,368
	B	22,621	22,614	12,258	0,137
	C	10,998	10,947	6,446	0,304
7	A	2,209	2,641	2,272	1,391
	B	6,377	5,027	3,668	1,863
	C	4,536	4,219	3,03	1,556

Fonte: Próprio autor.

Com os valores da Tabela 104, a equação (21) e o valor da corrente de curto-circuito nas linhas do sistema elétrico sem GAs obtido através do DIGSILENT®, foi possível estimar a corrente de curto-circuito nas linhas do sistema elétrico na presença de GAs, Tabela 107, cujos valores foram comparados com os valores obtidos das simulações do DIGSILENT®, Tabela 108. Calculando-se os erros absolutos dos valores da Tabela 107 e da Tabela 108 obteve-se valores inferiores a 10 ampéres, que não compromete a eficiência do método pois se trata de análise de curto-circuito e, portanto, valores de corrente elevados

Tabela 107: Valor da corrente em cada linha obtida através da equação (21), com GA conectado, para o curto-circuito monofásico.

TESTE	FASE	CORRENTE (A)/ SEÇÕES			
		01	12	23	34
3	A	1522,426	1522,067	1498,061	1495,003
	B	42,677	34,119	22,813	20,765
	C	38,008	31,684	2,254	11,775
4	A	1727,495	1718,906	1717,55	24,305
	B	43,719	39,061	23,523	20,755
	C	28,307	18,009	2,177	11,783
5	A	1518,843	1509,058	1472,878	1489,636
	B	78,807	66,71	37,376	31,372
	C	100,884	87,092	39,289	44,4
7	A	340,674	329,24	233,394	222,375
	B	102,172	90,484	47,36	35,424
	C	158,298	147,182	66,751	54,702

Fonte: Próprio autor.

Tabela 108: Valor da corrente de curto-circuito em cada linha obtida através do DIGSILENT®, com GA conectado, para um curto-circuito monofásico.

TESTE	FASE	CORRENTE (A)/ SEÇÕES			
		01	12	23	34
3	A	1522,262	1523,05	1499,056	1495,999
	B	66,565	52,106	34,487	21,796
	C	49,062	40,091	20,881	12,845
4	A	1727,957	1719,372	1716,131	25,027
	B	69,472	56,639	34,506	21,735
	C	46,502	33,197	21,412	12,829
5	A	1519,779	1509,995	1473,763	1491,019
	B	106,499	92,603	51,324	31,372
	C	108,807	94,229	49,042	44,4
7	A	332,022	321,602	227,057	218,44
	B	111,268	97,017	51,829	37,462
	C	150,548	139,482	64,422	52,483

Fonte: Próprio autor.

Tabela 109: Valor do erro absoluto referente à corrente de curto-circuito em cada linha do sistema quando há GA conectado e sob um curto-circuito monofásico.

TESTE	FASE	CORRENTE (A)/ SEÇÕES			
		01	12	23	34
3	A	0,164	0,983	0,995	0,996
	B	23,888	17,986	11,674	1,031
	C	11,053	8,406	18,627	1,069
4	A	0,462	0,466	1,419	0,722
	B	25,753	17,577	10,983	0,98
	C	18,194	15,187	19,235	1,045
5	A	0,936	0,937	0,885	1,383
	B	27,691	25,893	13,947	0
	C	7,923	7,137	9,752	0
7	A	8,651	7,637	6,337	3,935
	B	9,096	6,532	4,469	2,038
	C	7,749	7,699	2,329	2,218

Fonte: Próprio autor.

5.3 TESTES E RESULTADOS PARA O SDEE COM INSERÇÃO DE DFIGs.

Seguindo o mesmo raciocínio utilizado para os resultados do gerador assíncrono, utilizou-se os cenários e os resultados obtidos na seção 4.3.1 para obter os valores referentes às equações (31), (32) e (33) e à equação (21) para o gerador de indução duplamente alimentado (DFIG).

5.3.1 Curto-circuito trifásico.

Para obter os resultados do DFIG para um curto-circuito trifásico utilizou-se dos cenários 3, 5, 6 e 7 apresentados na Tabela 42. Os valores apresentados na Tabela 45, juntamente com os valores calculados para os ângulos das corrente estimadas, foram agrupados na Tabela 110.

Tabela 110: Valor do módulo e ângulo utilizado nas equações (31), (32) e (33) para um curto-circuito trifásico com DFIGs conectados em cada teste.

TESTE	DFIG	CORRENTE EM AMPÉRES DO GF USADO NAS EQUAÇÕES	
		MÓDULO	ÂNGULO (EM GRAUS)
3	DFIG1	14,321	-60,65 (A); -180,83 (B); 58,78 (C)
5	DFIG2	14,321	-60,9 (A); -181,17 (B); 58,19 (C)
	DFIG3	20,22	-61,05 (A); -181,32 (B); 58,04 (C)
6	DFIG1	11,803	-60,52 (A); -180,69 (B); 58,93 (C)
	DFIG2	14,863	-60,79 (A); -181,05 (B); 58,32 (C)
	DFIG3	20,22	-60,91 (A); -181,17 (B); 58,2 (C)
	DFIG4	29,689	-60,94 (A); -181,02 (B); 58,17 (C)
7	DFIG2	19,835	-61,78 (A); -182,77 (B); 55,25 (C)
	DFIG3	20,22	-62,12 (A); -183,23 (B); 54,49 (C)

Fonte: Próprio autor.

Os valores contidos na Tabela 110 foram aplicados nas equações (31), (32) e (33) para calcular a variação da corrente de curto-circuito do sistema elétrico, ou seja, o quanto a corrente de curto-circuito das linhas do sistema elétrico são afetadas quando se compara os valores de corrente de curto-circuito sem e com DFIG conectado perante um curto-circuito. Com a finalidade de verificar a exatidão dos valores da Tabela 111, obteve-se a variação da corrente de curto-circuito nas linhas do sistema elétrico diretamente do DIGSENT®, Tabela 112. Observa-se na Tabela 113 que os erros absolutos envolvendo os valores das Tabelas 111 e 112 são inferiores a 11 ampéres.

Tabela 111: Resultado das equações (31), (32) e (33) para um curto-circuito trifásico com DFIGs conectados em cada teste.

TESTE	FASE	CORRENTE (A)/ SEÇÕES			
		01	12	23	34
3	A	7,811	6,509	6,509	0
	B	7,811	6,509	6,509	0
	C	7,811	6,509	6,509	0
5	A	8,135	8,135	7,722	27,942
	B	8,135	8,135	7,722	27,942
	C	8,135	8,135	7,722	27,942
6	A	14,858	3,056	11,807	32,027
	B	14,858	3,056	11,807	32,027
	C	14,858	3,056	11,807	32,026
7	A	9,566	9,566	10,268	30,487
	B	9,566	9,566	10,268	30,487
	C	9,566	9,566	10,268	30,487

Fonte: Próprio autor.

Tabela 112: Resultado da variação da corrente de curto-circuito nas linhas obtidos através do DIGSILENT® para um curto-circuito trifásico com DFIGs conectados em cada teste.

TESTE	FASE	CORRENTE (A)/ SEÇÕES			
		01	12	23	34
3	A	8,107	6,819	6,774	0
	B	8,103	6,803	6,781	0
	C	8,1	6,802	6,78	0
5	A	10,591	10,619	9,657	37,448
	B	10,606	10,634	9,69	37,463
	C	10,598	10,627	9,677	37,447
6	A	18,521	5,327	14,969	42,735
	B	18,518	5,357	14,992	42,742
	C	18,498	5,35	14,963	42,708
7	A	10,402	10,425	9,359	37,018
	B	10,429	10,453	9,418	37,044
	C	10,395	10,424	9,365	36,979

Fonte: Próprio autor.

Tabela 113: Valores do erro absoluto da variação da corrente nas linhas do sistema elétrico contendo DFIG conectado devido a uma falta trifásica.

TESTE	FASE	CORRENTE (A)/ SEÇÕES			
		01	12	23	34
3	A	0,295	0,309	0,264	0
	B	0,291	0,294	0,272	0
	C	0,289	0,293	0,27	0
5	A	2,456	2,483	1,9355	9,505
	B	2,47	2,499	1,967	9,52
	C	2,462	2,492	1,954	9,504
6	A	3,662	2,271	3,162	10,708
	B	3,659	2,301	3,185	10,715
	C	3,639	2,293	3,156	10,682
7	A	0,835	0,858	0,908	6,53
	B	0,862	0,886	0,849	6,556
	C	0,828	0,858	0,902	6,492

Fonte: Próprio autor.

Os valores da Tabela 111 e os valores de corrente de curto-circuito obtidos através do DIGSilent® sem DFIG conectado ao sistema de cada teste, foram aplicados na equação (21). Obteve-se uma estimativa da corrente de curto-circuito que flui nas linhas do sistema elétrico na presença do DFIG, Tabela 114. Estes valores foram comparados com os da Tabela 115, que contém os de corrente de curto-circuito nas linhas do sistema elétrico para o trifásico com a presença de DFIG. Com isso calculou-se o erro absoluto presente entre os valores das Tabelas 114 e 115 conforme apresentado na Tabela 116. Nota-se que o valor máximo apresentado na Tabela 116 não ultrapassa 9 ampéres, proporcionando ao método proposto robustez e eficiência tanto no cálculo da variação da corrente de curto-circuito nas linhas, quanto no cálculo estimado da corrente de curto-circuito nas linhas do sistema elétrico com DFIG conectada.

Tabela 114: Valor da corrente em cada linha obtida através da equação (21), com DFIG conectado, para um curto-circuito trifásico.

TESTE	FASE	CORRENTE (A)/ SEÇÕES			
		01	12	23	34
3	A	1238,25	1244,743	1233,27	0
	B	1236,694	1243,22	1237,371	0
	C	1236,221	1242,782	1238,654	0
5	A	1093,108	1084,503	1085,219	1103,658
	B	1090,402	1081,835	1089,973	1108,411
	C	1089,614	1081,078	1091,44	1109,893
6	A	1086,387	1089,58	1089,303	1107,744
	B	1083,681	1086,911	1094,056	1112,497
	C	1082,895	1086,153	1095,524	1113,979
7	A	1098,568	1089,458	1076,317	1094,564
	B	1092,585	1083,611	1086,716	1104,964
	C	1090,888	1082,033	1090	1108,278

Fonte: Próprio autor.

Tabela 115: Valor da corrente de curto-circuito em cada linha obtida através do DIGSILENT®, com DFIG conectado, para curto-circuito trifásico.

TESTE	FASE	CORRENTE (A)/ SEÇÕES			
		01	12	23	34
3	A	1238,466	1244,636	1233,129	0
	B	1236,912	1243,098	1237,232	0
	C	1236,441	1242,663	1238,521	0
5	A	1091,625	1082,982	1086,423	1109,85
	B	1088,895	1080,289	1091,195	1114,557
	C	1088,128	1079,553	1092,663	1116,114
6	A	1084,072	1088,025	1091,517	1114,998
	B	1081,361	1085,32	1096,266	1119,683
	C	1080,603	1084,588	1097,735	1121,24
7	A	1098,881	1089,743	1074,58	1097,305
	B	1092,854	1083,847	1084,998	1107,591
	C	1091,188	1082,3	1088,282	1111,115

Fonte: Próprio autor.

Tabela 116: Valor do erro absoluto referente à corrente de curto-circuito em cada linha do sistema quando há DFIG conectado e sob um curto-circuito trifásico.

TESTE	FASE	CORRENTE (A)/ SEÇÕES			
		01	12	23	34
3	A	0,216	0,107	0,141	0
	B	0,218	0,122	0,139	0
	C	0,22	0,119	0,133	0
5	A	1,483	1,521	1,204	6,192
	B	1,507	1,546	1,222	6,146
	C	1,486	1,525	1,223	6,221
6	A	2,315	1,555	2,214	7,254
	B	2,32	1,591	2,21	7,186
	C	2,292	1,565	2,211	7,261
7	A	0,313	0,285	1,737	2,741
	B	0,269	0,236	1,718	2,627
	C	0,3	0,267	1,718	2,837

Fonte: Próprio autor.

5.3.2 Curto-circuito bifásico

Para realizar a análise de curto-circuito bifásico utilizou-se os testes 1, 3, 4 e 5 apresentados na Tabela 46. A partir destes 4 cenários estimou-se os valores dos módulos das correntes de curto-circuito injetadas pelos DFIGs através da LF, que, juntamente com o ângulo calculado, equação (34), resultou na corrente injetada pelo DFIG, Tabela 117.

Tabela 117: Valor do módulo e ângulo utilizado nas equações (31), (32) e (33) para um curto-circuito bifásico com DFIGs conectados em cada teste.

TESTE	DFIG	CORRENTE EM AMPÉRES DO DFIGs USADO NAS EQUAÇÕES	
		MÓDULO	ÂNGULO (EM GRAUS)
1	DFIG1	25,494	-60,65 (A); -180,83 (B); 58,78 (C)
3	DFIG2	14,892	-61,84 (A); -182,85 (B); 55,15 (C)
4	DFIG2	20,22	-60,97 (A); -181,25(B); 58,11 (C)
5	DFIG2	26,019	-61,78 (A); -182,77 (B); 55,25 (C)
	DFIG3	26,019	-62,12 (A); -183,23 (B); 54,49 (C)

Fonte: Próprio autor.

Aplicando os valores apresentados na Tabela 117 nas equações (31), (32) e (33) obteve-se a variação da corrente de falta nas linhas do sistema elétrico sem e com DFIGs conectados, Tabela 118.

A Tabela 119 contém os valores da variação da corrente de curto-circuito nas linhas do sistema elétrico com e sem DFIG obtidos através do DIGSILENT®. Comparando estes valores com os apresentados na Tabela 118, através do cálculo do erro absoluto entre eles, nota-se que os erros absolutos nas fases A e B, Tabela 120, apresentaram valores inferiores a 15,5 ampéres para os testes 1, 3 e 4. Entretanto, para o teste 5 observou-se um erro absoluto de quase 30 ampéres nas linhas 01 e 12. Isso se deve ao valor muito alto de corrente de curto-circuito injetada pelo DFIG utilizado na fase C. Assim sendo, decidiu-se substituir o valor da corrente de curto-circuito da fase C calculada pela lógica fuzzy pela corrente injetada pelo DFIG em regime permanente resultando em erros de aproximadamente 3,5 ampéres, Tabela 124.

Tabela 118: Resultado das equações (31), (32) e (33) para um curto-circuito bifásico com DFIGs conectados em cada teste.

TESTE	FASE	CORRENTE (A)/ SEÇÕES			
		01	12	23	34
1	A	16,365	0	0	0
	B	16,365	0	0	0
	C	25,949	0	0	0
3	A	6,649	6,649	22,244	0
	B	9,5	9,5	19,287	0
	C	20,22	20,22	4E-99	0
4	A	4,594	4,594	14,309	14,309
	B	6,847	6,847	12,606	12,606
	C	14,892	14,892	3E-99	3E-99
5	A	32,817	32,817	26,019	0
	B	32,817	32,817	26,019	0
	C	52,036	52,036	26,019	0

Fonte: Próprio autor.

Tabela 119: Resultado da variação da corrente de curto-circuito nas linhas obtidos através do DIGSILENT® para um curto-circuito bifásico com DFIGs conectados em cada teste.

TESTE	FASE	CORRENTE (A)/ SEÇÕES			
		01	12	23	34
1	A	1,049	0,074	0,024	0,012
	B	1,073	0,033	0,022	0,011
	C	2,122	0,106	0,047	0,023
3	A	6,601	6,612	14,728	0,019
	B	4,544	4,564	14,758	0,016
	C	2,716	2,69	0,071	0,035
4	A	7,63	7,649	11,093	11,088
	B	5,061	5,081	11,199	11,181
	C	3,502	3,482	0,188	0,152
5	A	3,267	3,246	27,822	0,414
	B	3,309	3,288	25,771	0,266
	C	6,576	6,534	3,392	0,37

Fonte: Próprio autor.

Tabela 120: Valores do erro absoluto da variação da corrente de curto-circuito nas linhas do sistema elétrico contendo DFIG conectado devido a um curto-circuito bifásico.

TESTE	FASE	CORRENTE (A)/ SEÇÕES			
		01	12	23	34
1	A	15,315	0,074	0,024	0,012
	B	15,291	0,033	0,022	0,011
	C	23,826	0,106	0,047	0,023
3	A	0,048	0,037	7,515	0,019
	B	4,956	4,936	4,529	0,016
	C	17,503	17,523	0,071	0,035
4	A	3,042	3,055	3,215	3,221
	B	1,786	1,766	1,407	1,425
	C	11,389	11,409	0,188	0,152
5	A	29,55	29,571	1,803	0,414
	B	29,508	29,529	0,247	0,266
	C	45,46	45,502	22,626	0,37

Fonte: Próprio autor.

Através dos valores da variação da corrente obtidos das equações (31), (32) e (33) e da corrente de curto-circuito nas linhas do sistema elétrico sem DFIG, determinou-se a corrente de curto-circuito que flui nas linhas do sistema elétrico contendo DFIG, Tabela 121. Calculou-se o erro absoluto, Tabela 123, entre os valores da Tabela 121 e da Tabela 122, os quais foram obtidos através de simulações no DIGSI[®]. Observa-se, nas fases A e B, que os erros absolutos calculados apresentaram valores inferiores a 10 ampéres, mesmo no caso em que substitui a corrente de curto-circuito da fase C pela corrente em regime permanente para o teste 5.

Portanto, conclui-se que o método proposto nesta tese pode ser empregado para análise de corrente de curto-circuito bifásico em sistemas elétricos contendo DFIGs pois se mostrou muito eficiente através da observação dos erros.

Tabela 121: Valor da corrente de curto-circuito em cada linha obtida através da equação (21), com DFIG conectado, para o curto-circuito bifásico.

TESTE	FASE	CORRENTE (A)/ SEÇÕES			
		01	12	23	34
1	A	2379,809	47,62	15,799	7,906
	B	2324,633	23,227	15,523	7,768
	C	66,0126	70,14567	31,323	15,674
3	A	1103,808	1093,72	1078,778	7,949
	B	1050,018	1046,098	1062,526	7,758
	C	69,25304	55,30417	31,39	15,708
4	A	1016,935	1005,747	946,64	941,641
	B	905,0641	899,590	904,849	905,629
	C	158,3778	143,888	73,823	58,109
5	A	1535,901	1527,501	27,483	42,959
	B	1421,677	1419,172	33,517	15,458
	C	137,9041	124,425	55,784	57,721

Fonte: Próprio autor.

Tabela 122: Valor da corrente em cada linha obtida através do DIGSILENT®, com DFIG conectado, para o curto-circuito bifásico.

TESTE	FASE	CORRENTE (A)/ SEÇÕES			
		01	12	23	34
1	A	2375,121	47,548	15,775	7,894
	B	2328,683	23,195	15,501	7,757
	C	83,199	70,042	31,277	15,651
3	A	1100,387	1090,314	1077,564	7,931
	B	1052,323	1048,439	1064,86	7,743
	C	81,089	66,104	31,324	15,675
4	A	1013,562	1002,378	947,467	942,502
	B	905,75	900,29	906,972	907,872
	C	164,862	150,025	73,6504	57,96954
5	A	1527,618	1519,357	27,251	42,869
	B	1425,914	1423,665	45,239	15,334
	C	165,179	150,157	70,212	57,41

Fonte: Próprio autor.

Tabela 123: Valor do erro absoluto referente à corrente em cada linha do sistema quando há DFIG conectado e sob um curto-circuito bifásico.

TESTE	FASE	CORRENTE (A)/ SEÇÕES			
		01	12	23	34
3	A	4,688	0,071	0,023	0,012
	B	4,05	0,032	0,021	0,01
	C	17,187	0,103	0,045	0,022
5	A	3,421	3,406	1,214	0,018
	B	2,305	2,341	2,334	0,015
	C	11,836	10,799	0,066	0,033
6	A	3,373	3,369	0,827	0,86
	B	0,686	0,7	2,122	2,243
	C	6,484	6,137	0,173	0,14
7	A	8,283	8,144	0,231	0,09
	B	4,237	4,493	11,722	0,125
	C	27,275	25,732	14,427	0,311

Fonte: Próprio autor.

Tabela 124: Resultados para a substituição do valor da corrente do DFIG em regime permanente na fase C.

TESTE	FASE	CORRENTE (A)/ SEÇÕES			
		01	12	23	34
Delta calculado	A	3,556	3,556	26,019	0
	B	3,556	3,556	26,019	0
	C	5,639	5,639	2,9	0
Erro do delta	A	0,289	0,31	1,803	0,414
	B	0,247	0,268	0,247	0,266
	C	0,936	0,894	0,492	0,37
Corrente nas linhas	A	1524,994	1516,69	24,833	42,959
	B	1421,77	1419,475	-2,854	15,458
	C	165,542	150,414	70,436	57,721
Erro nas linhas	A	2,624	2,667	2,417	0,09
	B	4,144	4,189	42,384	0,125
	C	0,363	0,256	0,224	0,311

Fonte: Próprio autor.

5.3.3 Curto-circuito monofásico

Para a análise de curto-circuito monofásico utilizou-se os testes 2, 3, 4 e 6 apresentados na Tabela 50. Na Tabela 125 estão contidos os valores do módulo e ângulo da corrente estimada dos DFIGs para os respectivos testes. Lembrando-se que o módulo da corrente é obtido através da lógica fuzzy e o ângulo através do ângulo da tensão do DFIG em regime permanente, equação (34).

Utilizando os dados da Tabela 125 nas equações (31), (32) e (33), calculou-se a variação da corrente de curto-circuito que flui nas linhas do sistema elétrico, Tabela 126. Estes dados foram comparados com os valores obtidos através do DIGSILENT®, Tabela 127. Calculando o erro absoluto entre estes valores, Tabela 128, obteve-se, considerando a fase A, 10,94 amperes de erro máximo.

Tabela 125: Valor do módulo e ângulo utilizado nas equações (31), (32) e (33) para o curto-circuito monofásico com DFIGs conectados em cada teste.

TESTE	DFIG	CORRENTE EM AMPÉRES DO GF USADO NAS EQUAÇÕES	
		MÓDULO	ÂNGULO (EM GRAUS)
2	DFIG1	14,322	-60,65 (A); -180,83 (B); 58,78 (C)
3	DFIG2	14,858	-60,7 (A); -181,17 (B); 58,19 (C)
	DFIG3	20,22	-62,12 (A); -183,23 (B); 54,49 (C)
4	DFIG2	14,452	-61,78 (A); -182,77 (B); 55,25 (C)
	DFIG3	20,22	-62,12 (A); -183,23 (B); 54,49 (C)
6	DFIG1	4,48	-61,09 (A); -181,71 (B); 57,11 (C)
	DFIG2	4,529	-61,74 (A); -182,72 (B); 55,31 (C)
	DFIG3	9,086	-62,08 (A); -183,17 (B); 54,55 (C)

Fonte: Próprio autor.

Tabela 126: Resultado das equações (31), (32) e (33) para o curto-circuito monofásico com DFIGs conectados em cada teste.

TESTE	FASE	CORRENTE (A)/ SEÇÕES			
		01	12	23	34
2	A	5,335	9,011	9,01	0
	B	14,321	3,38E-09	3,38E-09	0
	C	14,321	3,93E-09	3,93E-09	0
3	A	3,126	3,126	17,582	37,759
	B	35,078	35,078	20,22	1,62E-08
	C	35,078	35,078	20,22	1,87E-08
4	A	2,818	2,818	16,995	37,183
	B	34,672	34,672	20,22	1,61E-08
	C	34,671	34,671	20,22	1,86E-08
6	A	17,107	12,656	9,086	0
	B	18,094	13,615	9,086	0
	C	18,092	13,615	9,086	0

Fonte: Próprio autor.

Tabela 127: Resultado da variação da corrente de curto-circuito nas linhas obtidos através do DIGSILENT® para o curto-circuito monofásico com DFIGs conectados em cada teste.

TESTE	FASE	CORRENTE (A)/ SEÇÕES			
		01	12	23	34
2	A	5,294	9,016	8,985	0,004
	B	5,554	0,064	0,04	0,02
	C	9,08	0,089	0,036	0,018
3	A	4,1	4,072	22,791	48,704
	B	19,624	19,653	11,611	0,085
	C	25,916	25,914	14,532	0,065
4	A	3,996	3,978	22,017	47,258
	B	19,041	19,07	11,344	0,229
	C	25,203	25,192	14,16	0,239
6	A	17,064	12,124	6,516	0,471
	B	10,388	7,111	3,588	0,23
	C	14,721	10,489	5,24	0,54

Fonte: Próprio autor.

Tabela 128: Valores do erro absoluto da variação da corrente de curto-circuito nas linhas do sistema elétrico contendo DFIG conectado devido ao curto-circuito monofásico.

TESTE	FASE	CORRENTE (A)/ SEÇÕES			
		01	12	23	34
2	A	0,04	0,00592	0,025	0,004
	B	8,766	0,064765	0,04	0,02
	C	5,24	0,089938	0,036	0,018
3	A	0,974	0,945866	5,209	10,945
	B	15,453	15,42451	8,608	0,085
	C	9,162	9,16372	5,687	0,065
4	A	1,177	1,160235	5,021	10,074
	B	15,631	15,60186	8,875	0,229
	C	9,468	9,478931	6,059	0,239
6	A	0,043	0,53272	2,569	0,471
	B	7,705	6,503925	5,497	0,23
	C	3,37	3,125	3,845	0,54

Fonte: Próprio autor.

Usando os valores contidos na Tabela 126 e com os de corrente de curto-circuito nas linhas do sistema elétrico sem DFIG, calculou-se a corrente de curto-circuito nas linhas do sistema elétrico na presença de DFIGs através da equação (21), Tabela 129. A Tabela 130 contém os valores da corrente nas linhas do sistema elétrico com DFIGs conectados retirados das simulações do DIGSilent®. Com isso, foi possível calcular o erro absoluto, Tabela 131, proveniente dos valores das Tabelas 129 e 130, o qual não foi maior que 2,6 ampéres para a fase em falta.

Tabela 129: Valor da corrente de curto-circuito em cada linha obtida através da equação (21), com DFIG conectado, para um curto-circuito monofásico.

TESTE	FASE	CORRENTE (A)/ SEÇÕES			
		01	12	23	34
2	A	1712,136	1717,832	1696,383	1,441
	B	49,58	44,342	26,614	13,318
	C	54,54	53,805	27,907	13,965
3	A	1518,936	1509,635	1500,444	1517,554
	B	42,665	34,306	21,207	13,32
	C	37,783	25,317	7,717	13,972
4	A	1516,534	1506,748	1470,023	1486,846
	B	79,061	66,916	37,41	31,372
	C	101,295	87,49	39,237	44,4
6	A	343,015	332,701	73,742	67,136
	B	99,455	88,426	46,521	39,689
	C	149,465	139,964	62,606	56,66

Fonte: Próprio autor.

Tabela 130: Valor da corrente de curto-circuito em cada linha obtida através do DIGSILENT®, com DFIG conectado, para o curto-circuito monofásico.

TESTE	FASE	CORRENTE (A)/ SEÇÕES			
		01	12	23	34
2	A	1712,5	1717,553	1696,069	1,445
	B	59,649	44,278	26,575	13,298
	C	59,529	53,764	27,877	13,95
3	A	1520,21	1510,879	1504,869	1525,936
	B	69,284	56,737	34,335	13,238
	C	43,73	29,492	18,195	13,918
4	A	1517,894	1508,089	1474,044	1493,886
	B	107,548	94,087	52,5237	31,142
	C	105,397	90,919	46,002	44,202
6	A	344,32	334,59	76,34	66,92
	B	107,25	95,05	52,08	39,48
	C	152,87	143,16	66,46	56,33

Fonte: Próprio autor.

Tabela 131: Valor do erro absoluto referente à corrente em cada linha do sistema quando há DFIG conectado e sob o curto-circuito monofásico.

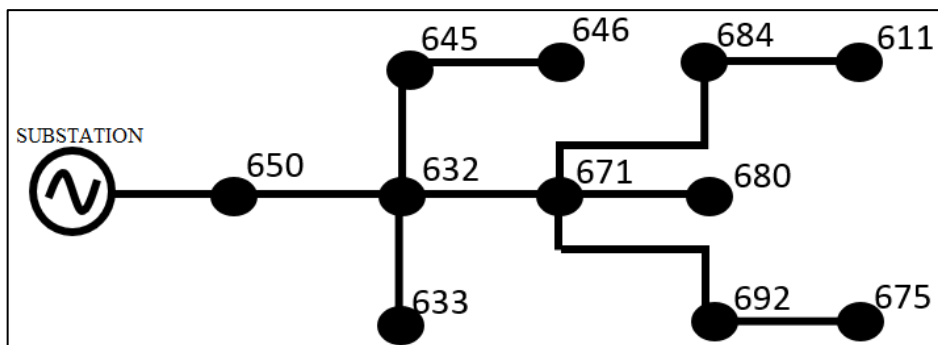
TESTE	FASE	CORRENTE (A)/ SEÇÕES			
		01	12	23	34
2	A	0,364	0,279	0,314	0,004
	B	10,068	0,064	0,038	0,019
	C	4,988	0,04	0,03	0,015
3	A	1,274	1,244	4,425	8,382
	B	26,619	22,431	13,128	0,084
	C	5,946	4,174	10,478	0,054
4	A	1,36	1,341	4,021	7,04
	B	28,487	27,171	15,113	0,229
	C	4,102	3,428	6,765	0,198
6	A	1,302	1,888	2,597	0,216
	B	7,794	6,623	5,558	0,209
	C	3,404	3,195	3,853	0,338

Fonte: Próprio autor.

5.4 VALIDAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO UTILIZANDO O SISTEMA DE 13 BARRAS DO IEEE

O método completo desenvolvido nesta tese é aplicado no sistema elétrico de 13 barras do IEEE (IEEE 13-Node Test Feeder, 2006), Figura 19. O objetivo é validar o método utilizando um sistema maior e largamente utilizado na literatura. O sistema de 13 barras do IEEE é adaptado considerando um sistema trifásico a três fios. Além disso, diferentemente do sistema teste utilizado para desenvolver o método e comprová-lo, o sistema de 13 barras do IEEE possui cargas e ramos desequilibrados.

Primeiramente, determinou-se o tronco principal, formado pelas barras 650, 632, 671, 692 e 675. Em seguida foram realizados testes com os cenários referentes da Tabela 132.

Figura 19: Sistema 13 barras do IEEE adaptado.

Fonte: Adaptado de IEEE test feeder -13 bus.

Para realizar os testes foram criados 6 cenários, Tabela 132, os quais contemplam faltas trifásicas, bifásicas (fase A e B) e monofásicas (fase A), com resistência de falta (RF) igual a zero e 40 ohms, e diferentes tipos de conexão dos geradores cuja descrição está contida na Tabela 133 e a barra em que foi realizado o curto-circuito.

Tabela 132: Cenários para os testes com o sistema de 13 barras do IEEE.

Cenário	GD conectadas	Barra em falta	Tipo de falta
1	GA1 – Barra 671 GF1 – Barra 633	675	Trifásica RF=0 ohms
2	GA1 – Barra 671 GF1 – Barra 633	671	Trifásica RF=0 ohms
3	DFIG1 – Barra 671 GF2 – Barra 645	675	Bifásica RF=0 ohms
4	GA1 – Barra 671 GF1 – Barra 633	671	Bifásica RF=0 ohms
5	DFIG1 – Barra 671 GF1 – Barra 633	671	Monofásica RF=0 ohms
6	GA1 – Barra 671 GF2 – Barra 645	675	Monofásica RF=40 ohms

Fonte: Próprio autor.

Tabela 133: Descrição dos geradores distribuídos que foram utilizados nos testes.

Geradores distribuídos	Potência nominal (kVar)	Tensão nominal(kV)	Corrente nominal(A)	Esquema de ligação
GF1	1000	4,16	138	Trifásico
GF2	500	4,16	120,19	Monofásico
GA1	1070,024	4,16	148,5	Trifásico
DFIG1	1070,024	4,16	148,5	Trifásico

Fonte: Próprio autor.

Através da simulação em regime permanente no DIGSILENT® para cada cenário da Tabela 132, obteve-se os dados de entrada para estimar a corrente de falta do respectivo GD, Tabela 134. Na Tabela 135 estão contidas as variáveis linguísticas para cada variável de entrada possibilitando determinar a variável linguística da corrente de curto-circuito do GD, conseqüentemente, pode-se determinar a corrente injetada pela GD e comparar este valor com o valor obtido através do DIGSILENT®, Tabela 136.

Tabela 134: Valores obtidos com o DIGSILENT® para formar a entrada do modelo completo para os seis cenários.

Cenários/GD	Corrente (pu)	Potência (pu)	Tensão (pu)	D GD-BF (Ω)	RF (Ω)
1/GA1	1,15	1	0,97	0,12	0
1/GF1	1,02	1	0,99	0,647	0
2/GA1	1,15	1	0,97	0	0
2/GF1	1,2	1	0,99	0,456	0
3/DFIG1	1,08	1	0,97	0,12	0
3/GF2	1,09	1	0,98	0,721	0
4/GA1	1,15	1	0,97	0	0
4/GF1	1,2	1	0,99	0,456	0
5/DFIG1	1,07	1	0,97	0	0
5/GF1	1,01	1	0,99	0,456	0
6/GA1	1,07	1	0,97	0,12	40
6/GF2	1,09	1	0,98	0,721	40

Fonte: Próprio autor.

Tabela 135: Variáveis linguísticas referentes aos dados de entrada do modelo completo para os 6 cenários.

Teste/GD	Corrente	Potência	Tensão	D GD-BF	RF
1/GA1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MP	BAIXA
1/GF1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MP	BAIXA
2/GA1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MP	BAIXA
2/GF1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MP	BAIXA
3/DFIG1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MP	BAIXA
3/GF2	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MP	BAIXA
4/GA1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MP	BAIXA
4/GF1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MP	BAIXA
5/DFIG1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MP	BAIXA
5/GF1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MP	BAIXA
6/GA1	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MP	ALTA
6/GF2	ALTA	ALTA	ADEQUADA	MP	ALTA

Fonte: Próprio autor.

Tabela 136: Dados referentes ao resultado da lógica Fuzzy do modelo completo, para os 6 cenários, comparados com valores do DIGSILENT®.

Teste/GF	Variável Linguística da corrente saída	Corrente injetada Fuzzy (pu/A)	Corrente injetada DIGSILENT (pu/A)
1/GA1	PATAMAR 10	8,83/1311,255	8,23/1222,34
1/GF1	PATAMAR 10	1,93/232,25	1,51/210,13
2/GA1	PATAMAR 10	8,83/1311,255	10,39/1490,86
2/GF1	PATAMAR 10	1,93/267,63	1,15/159,544
3/DFIG1	PATAMAR 9	7,69/1142,187	6,99/1038,788
3/GF2	PATAMAR 5 e 6	1,1/132	1,08/130,245
4/GA1	PATAMAR 9	7,82/1134,54	8,27/1228,757
4/GF1	PATAMAR 5 e 6	0,95/132	0,96/133,31
5/DFIG1	PATAMAR 9	7,82/1134,54	2,93/435,095
5/GF1	PATAMAR 9	1,8/249,8	2,4/332,89
6/GA1	PATAMAR 5	1,24/184,14	1,14/169,688
6/GF2	PATAMAR 5 e 6	1,1/132	1,02/122,99

Fonte: Próprio autor.

Com os valores de corrente de curto-circuito estimados através da Lógica Fuzzy, Tabela 136, determinou-se a corrente e o ângulo para cada fase das GDs utilizadas em cada cenário, Tabela 137. Estes valores serviram de entrada para as equações (31), (32) e (33) possibilitando estimar a variação da corrente de curto-circuito nas linhas do tronco principal do sistema de 13 barras. Sendo assim, obtiveram-se os valores contidos na Tabela 138.

Tabela 137: Valor do módulo e ângulo utilizado nas equações (31), (32) e (33) para os 6 cenários.

TESTE	GD	CORRENTE EM AMPÉRES DO GF USADO NAS EQUAÇÕES	
		MÓDULO (ampéres)	ÂNGULO (graus)
1	GA1	1311,25 (A), (B) e (C)	-60,64 (A); -180,06 (B); 58,43 (C)
	GF1	232,25 (A) e (B); 0 (C)	-60,5 (A); -180,25 (B); 0 (C)
2	GA1	1311,255 (A), (B) e (C)	-60,64 (A); -180,06 (B); 58,43 (C)
	GF2	267,63 (A), (B) e (C)	-60,5 (A); -180,25 (B); 0 (C)
3	DFIG1	1142,188 (A) e (B); 0 (C)	-60,54 (A); -180,05 (B); 0 (C)
	GF2	132 (A) e (B); 0 (C)	-60,5 (A); -180,24 (B); 0 (C)
4	GA1	1134,54 (A) e (B); 135,91 (C)	-60,06 (A); -179,02 (B); 59,13 (C)
	GF1	132 (A) e (B); 136,081 (C)	-60,26 (A); -178,93 (B); 59,07 (C)
5	DFIG1	1134,54 (A); 133,54 (B); 135,45 (C)	-60,06 (A); -179,02 (B); 59,13 (C)
	GF1	249,8 (A); 155,85 (B); 136,08 (C)	-60,26 (A); -178,93 (B); 59,07 (C)
6	GA1	184 (A); 129,88 (B); 142,43 (C)	-60,65 (A); -180,06 (B); 58,43 (C)
	GF2	132 (A); 122,99 (B); 0 (C)	-60,5 (A); -180,25 (B); 0 (C)

Fonte: Próprio autor.

Os resultados da Tabela 138 foram comparados com os valores da variação da corrente de curto-circuito obtidos através do DIGSILENT®, Tabela 139. Calculou-se o erro absoluto entre estes valores, Tabela 140. Observa-se que os erros ficaram abaixo de 110 ampéres, sendo este erro pertencente ao cenário 5. Este erro se dá devido à corrente de curto-circuito estimada pela LF para o DFIG1 ser 2,6 vezes superior ao valor obtido com o DIGSILENT®, 1134,54 e 435,095 ampéres respectivamente. Apesar desta diferença, nota-se na Tabela 143 um erro de 57,2165 ampéres ao considerar o cálculo da corrente de curto-circuito na linha do sistema. A diminuição do erro dá-se devido às

aproximações realizadas para a obtenção da variação da corrente de curto-circuito nas linhas.

Tabela 138: Resultado das equações (31), (32) e (33) com GDs conectados para os seis cenários.

TESTE	FASE	CORRENTE (A)/ SEÇÕES			
		650-632	632-671	671-692	692-675
1	A	308,677	84,104	1238,035	1238,035
	B	307,665	83,472	1239,421	1239,421
	C	179,579	179,579	1136,528	1136,528
2	A	133,335	133,335	0	0
	B	133,335	133,335	0	0
	C	133,335	133,335	0	0
3	A	262,304	136,689	1019,936	1019,936
	B	232,159	100,174	1042,035	1042,035
	C	141	141	1,39E-08	1,39E-08
4	A	122,042	67,42	0	0
	B	120,01	70,975	0	0
	C	271,987	135,906	0	0
5	A	237,291	18,805	0	0
	B	289,385	133,536	0	0
	C	271,538	135,451	0	0
6	A	313,102	181,156	6,971	6,971
	B	252,867	129,877	1,6E-08	1,6E-08
	C	142,431	142,431	7,24E-09	7,24E-09

Fonte: Próprio autor.

Tabela 139: Resultados da variação da corrente nas linhas obtidos através do DIGSILENT®, com GDs conectados, para os seis cenários.

TESTE	FASE	CORRENTE (A)/ SEÇÕES			
		650-632	632-671	671-692	692-675
1	A	259,248	130,216	1129,655	1129,655
	B	279,191	80,618	1143,405	1143,405
	C	166,776	166,309	1063,758	1063,758
2	A	80,396	80,243	0	0
	B	84,814	84,593	0	0
	C	77,415	77,156	0	0
3	A	293,35	104,028	953,857	953,857
	B	208,792	13,916	953,297	953,297
	C	92,397	91,694	4,061	4,061
4	A	155,936	58,141	4,985	4,985
	B	141,084	103,026	2,758	2,758
	C	230,998	122,662	7,488	7,488
5	A	309,716	129,4	10,3619	10,361
	B	330,456	156,218	7,399	7,399
	C	178,639	300,621	9,036	9,036
6	A	277,32	170,899	17,039	17,039
	B	250,347	131,005	11,569	11,569
	C	143,653	143,457	7,761	7,761

Fonte: Próprio autor.

Tabela 140: Valores do erro absoluto da variação da corrente de curto-circuito nas linhas do sistema elétrico contendo GD conectado para os seis cenários.

TESTE	FASE	CORRENTE (A)/ SEÇÕES			
		650-632	632-671	671-692	692-675
1	A	49,429	46,112	108,379	108,379
	B	28,473	2,854	96,015	96,015
	C	12,802	13,27	72,769	72,769
2	A	52,939	53,091	0	0
	B	48,521	48,742	0	0
	C	55,92	56,179	0	0
3	A	31,047	32,661	66,078	66,078
	B	23,366	86,257	88,737	88,737
	C	48,602	49,305	4,061	4,061
4	A	33,893	9,279	4,985	4,985
	B	21,073	32,051	2,758	2,758
	C	40,988	13,243	7,488	7,488
5	A	72,424	110,595	10,361	10,361
	B	41,07	22,682	7,399	7,399
	C	92,898	165,17	9,036	9,036
6	A	35,782	10,256	10,068	10,068
	B	2,519	1,127	11,569	11,569
	C	1,222	1,026	7,761	7,761

Fonte: Próprio autor.

Através dos valores da Tabela 138 e dos valores da corrente de curto-circuito nas linhas do tronco principal do sistema de 13 barras sem a presença dos GDs obtidos com o DIGSILENT®, para os respectivos cenários, estimou-se a corrente de curto-circuito que circula nas linhas do tronco principal do sistema de 13 barras, Tabela 141.

Os valores da Tabela 141 foram comparados com os valores da Tabela 142, valores obtidos através do DIGSILENT®, e os erros absolutos envolvendo estes dois valores são apresentados na Tabela 143. Nota-se, que, nas fases envolvidas no curto-circuito, os erros ficaram abaixo de 88,24296 ampéres, cenário 4, o que significa um erro percentual máximo de 3,28 %.

Tabela 141: Magnitude das correntes em cada linha/seção do tronco principal do sistema de 13 barras do IEEE empregando o método completo para os seis cenários.

TESTE	FASE	CORRENTE (A) / SEÇÕES			
		650-632	632-671	671-692	692-675
1	A	2418,272	2630,22	3915,822	3915,822
	B	2470,754	2588,528	3883,884	3883,884
	C	2541,864	2532,508	3827,254	3827,254
2	A	3003,856	3252,301	0	0
	B	3041,402	3214,966	0	0
	C	3001,35	3254,807	0	0
3	A	2244,58	2312,999	3341,55	3341,55
	B	2113,411	2196,975	3131,132	3131,132
	C	149,999	122,588	79,161	79,161
4	A	2731,997	2807,663	60,592	60,592
	B	2600,984	2696,205	31,515	31,515
	C	228,009	114,999	79,036	79,036
5	A	1198,396	1425,075	122,971	122,971
	B	163,123	110,185	91,805	91,805
	C	253,651	145,658	90,662	90,662
6	A	324,59	242,937	229,447	229,447
	B	194,771	82,783	105,591	105,591
	C	202,383	172,845	106,64	106,64

Fonte: Próprio autor.

Tabela 142: Magnitude das correntes em cada linha/seção do tronco principal do sistema de 13 barras do IEEE empregando o DIGSILENT para os seis cenários.

TESTE	FASE	CORRENTE (A) / SEÇÕES			
		650-632	632-671	671-692	692-675
1	A	2472,302	2613,573	3818,406	3818,406
	B	2509,043	2587,222	3808,231	3808,231
	C	2556,519	2547,289	3766,529	3766,529
2	A	3055,794	3200,465	0	0
	B	3093,024	3163,196	0	0
	C	3057,782	3198,425	0	0
3	A	2171,055	2322,951	3293,925	3293,925
	B	2085,307	2262,894	3215,177	3215,177
	C	72,61743	22,225	78,905	78,905
4	A	2665,72	2750,196	59,577	59,577
	B	2689,227	2730,806	32,591	32,591
	C	75,428	17,978	78,911	78,911
5	A	1165,46	1482,291	124,408	124,408
	B	145,709	190,226	91,3889	91,3889
	C	38,602	185,779	91,385	91,385
6	A	146,043	140,743	219,725	219,725
	B	106,542	29,117	103,194	103,194
	C	60,697	17,853	107,093	107,093

Fonte: Próprio autor.

Tabela 143: Erro absoluto entre as correntes obtidas a partir do método completo e as obtidas a partir do DIGSILENT para os seis cenários.

CENÁRIOS	FASE	CORRENTE (A) / SEÇÕES			
		650-632	632-671	671-692	692-675
1	A	54,03	16,646	97,416	97,416
	B	38,288	1,305	75,653	75,653
	C	14,654	14,781	60,725	60,725
2	A	51,938	51,835	0	0
	B	51,622	51,77	0	0
	C	56,432	56,381	0	0
3	A	73,525	9,952	47,625	47,625
	B	28,104	65,919	84,045	84,045
	C	77,382	100,362	0,256	0,256
4	A	66,276	57,467	1,015	1,015
	B	88,242	34,6	1,074	1,074
	C	152,581	97,021	0,124	0,124
5	A	32,935	57,216	1,436	1,436
	B	17,414	80,041	0,416	0,416
	C	215,048	40,121	0,723	0,723
6	A	178,547	102,193	9,722	9,722
	B	88,228	53,665	2,396	2,396
	C	141,685	154,991	0,452	0,452

Fonte: Próprio autor.

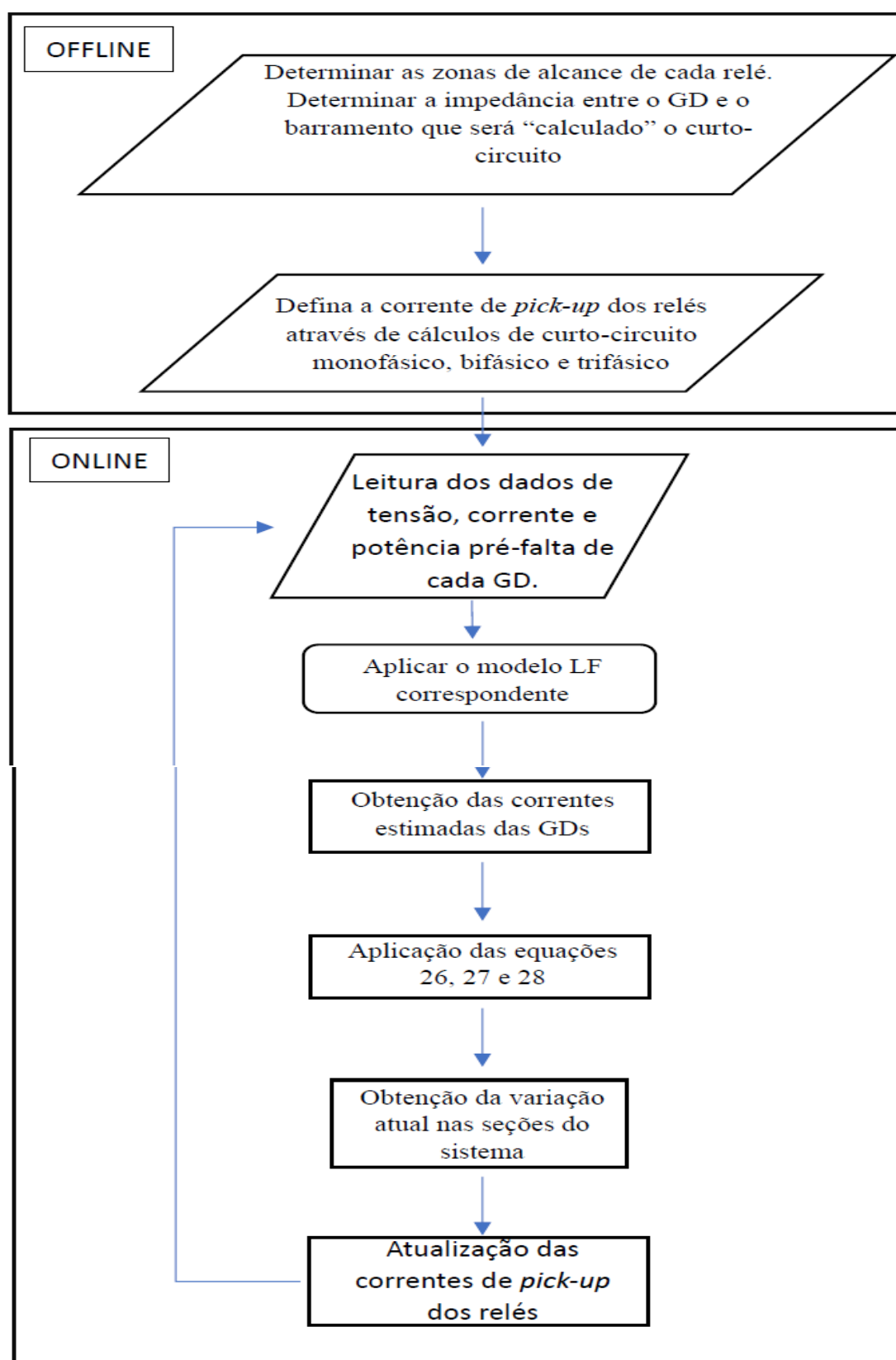
6 APLICAÇÃO DO MÉTODO COMPLETO

O método completo consiste em utilizar o método LF-EA para atualizar a proteção do sistema como ilustrado no fluxograma da figura 20.

Este processo começa com a aquisição dos dados pré-falta e com as correntes de *pick-up* obtidas sem a presença de GDs conectadas. Os dados pré-falta alimentam o sistema da LF que, por sua vez, fornecerá a corrente estimada de contribuição dos GDs durante a falta. Esse valor possui um módulo e um ângulo e serve como dado de entrada nas equações analíticas desenvolvidas para calcular a variação da corrente de curto-circuito nas linhas do SDEE.

Com a variação da corrente, juntamente com a corrente de curto-circuito utilizada para determinar a corrente de *pick-up* dos relés para o sistema sem GDs, estima-se, através da equação 21, a corrente de *pick-up* dos relés para o sistema com GDs a. Este valor é comparado com o valor da corrente de *pick-up* dos relés para o sistema sem GDs caso o valor atualizado da corrente for maior deve-se somar o valor do delta I na corrente de *pick-up* do relé, caso contrário deve-se subtrair o valor da corrente de *pick-up* pelo delta I. Isso é feito para manter a mesma zona de proteção dos relés após a inserção de GDs,

Figura 20: Fluxograma do método completo.



Fonte: Próprio autor.

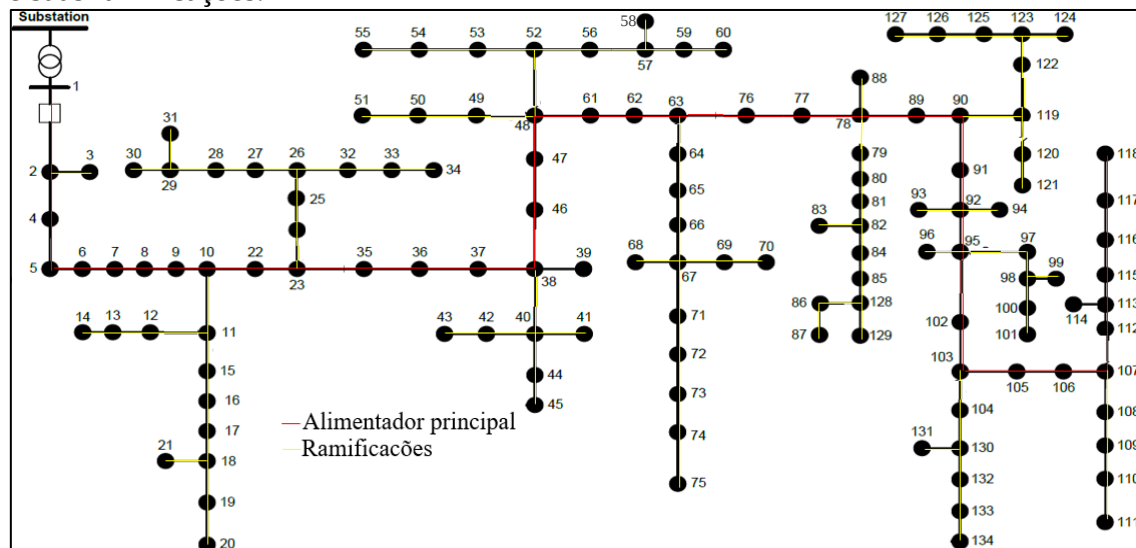
6.1 TESTES COM UM SISTEMA REAL BRASILEIRO

O método proposto ilustrado na Figura 20 é empregado para a adaptação da proteção de sobrecorrente do sistema real brasileiro de 135 barras ilustrado na Figura 21. Definiu-se como tronco principal as linhas destacadas em vermelho enquanto os ramos laterais estão destacados em verde.

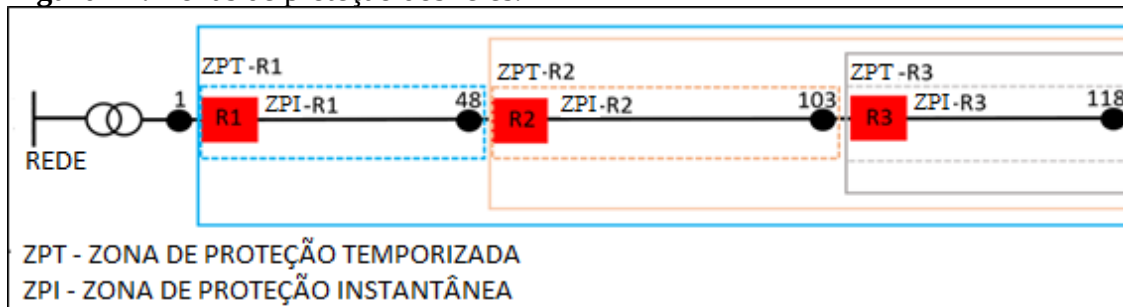
Para a proteção do tronco principal do sistema, são considerados três relés de sobrecorrente direcionais a jusante das barras 1, 48 e 103, respectivamente. Estes relés foram configurados para abranger as zonas de proteção destacadas na Figura 22. Para realizar a parametrização dos relés utilizou-se a norma da CPFL (CPFL ENERGIA, 2016).

Além disso, considerou-se o sistema elétrico sem a presença de GDs conectados. Na parametrização da proteção de fase e de neutro, tanto para a atuação instantânea (ZPI) quanto para a atuação temporizada (ZPT), considerou-se curvas de atuação de tempo definido. A Figura 23 ilustra o coordenograma da proteção de fase e neutro para os três relés.

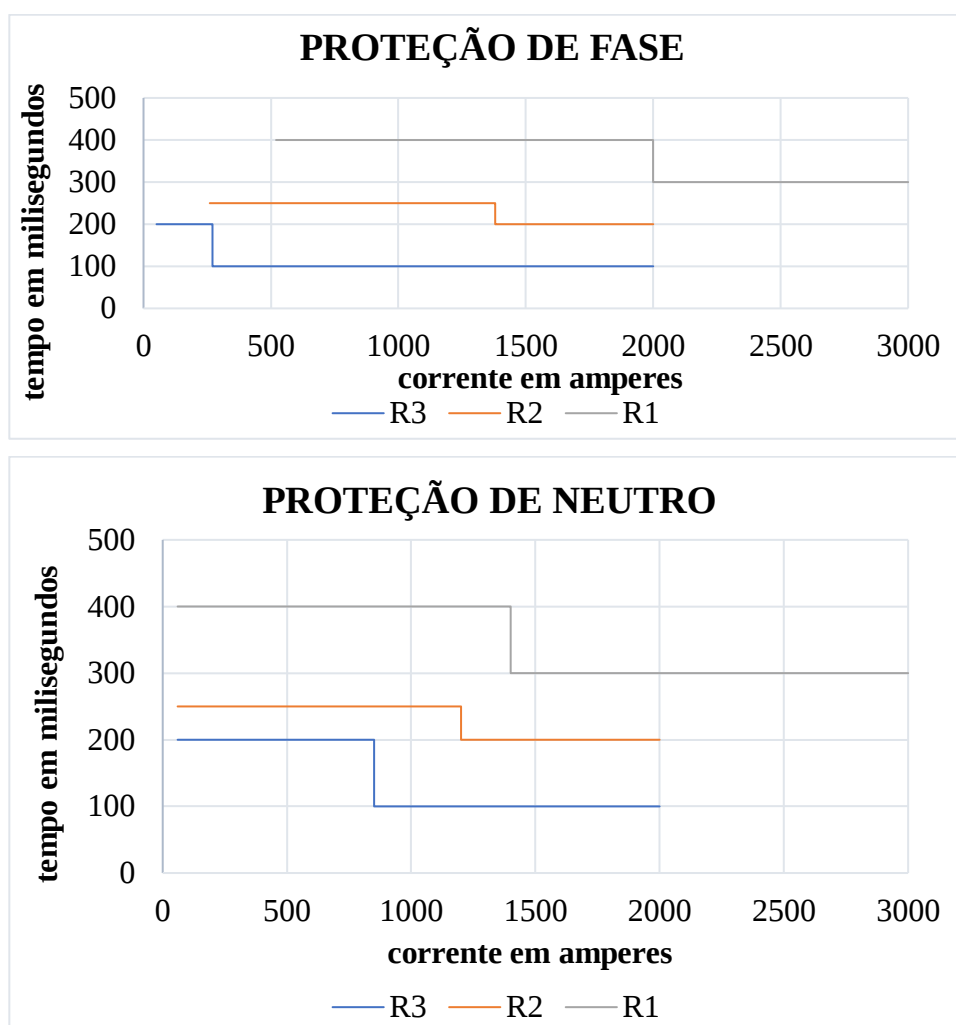
Figura 21: Representação do sistema de 135 barras com o respectivo alimentador principal e suas ramificações.



Fonte: Próprio autor.

Figura 22: Zonas de proteção dos relés.

Fonte: Próprio autor.

Figura 23: Coordenograma da proteção de fase e neutro para o sistema de 135 barras sem GD.

Fonte: Próprio autor.

Para realizar a adaptação da proteção do sistema elétrico em questão foram inseridos 8 GDs. A conexão dos GDs foi feita de forma aleatória nas barras do sistema e os dados de potência e corrente nominal estão presentes na tabela 144.

Tabela 144: Dados das GDs conectadas no sistema de 135 barras.

Tipo	Barra de conexão	Potência nominal (MW)	Corrente nominal (A)
GA1	3	0,5	20,91
GS1	51	0,2	8,367
GF1	58	0,5	20,91
GF2	123	0,3	12,55
GF3	92	0,25	10,459
GA2	98	0,15	6,275
GS2	134	0,1	4,18
GS3	105	0,1	4,18

Para a parametrização das funções instantâneas de fase e neutro (ZPI) é empregada a corrente de curto-circuito trifásica e monofásica com $R_F=0$ ohms, respectivamente. Estas são calculadas na barra de alcance de cada relé conforme a Figura 22. Para as funções temporizadas de fase e neutro (ZPT), é empregada a corrente de curto-circuito bifásica com $R_F=0$ ohms e monofásica com $R_F=40$ ohms, respectivamente, calculadas na barra 118. No apêndice, item 2B, são apresentados os cálculos das correntes de *pick-up* para os 3 relés.

Além disso, foi considerado que os alcances dos relés de proteção devem se manter os mesmos após a inserção da GD. Desta forma o método proposto deve adaptar as correntes de pick-up dos relés de modo a manter os alcances inicialmente definidos para as proteções instantâneas e temporizadas. A partir das barras definidas para os alcances e, portanto, para o cálculo dos níveis e tipos de curto-circuito, pode-se determinar a impedância entre os GDs e o ponto de curto-circuito, a resistência de falta e os tipos de faltas. Na Tabela 145 são apresentados os cenários adotados para determinar a variação da corrente nos pontos de alcance de cada relé do sistema da Figura 22.

Tabela 145: Cenários para determinar a variação da corrente nas linhas onde os relés estão.

Cenário	GD conectadas	Barra em falta	Tipo de falta
1	todas	118	Trifásica RF=0 ohms
2	todas	103	Trifásica RF=0 ohms
3	todas	48	Trifásica RF=0 ohms
4	todas	118	Bifásica RF=0 ohms
5	todas	118	Monofásica RF=0 ohms
6	todas	103	Monofásica RF=0 ohms
7	todas	48	Monofásica RF=0 ohms
8	todas	118	Monofásica RF=40 ohms

Ao simular os casos da Tabela 145 no DIGSILENT®, obteve-se os dados de entrada do modelo Fuzzy. Após realizar a fuzzificação e defuzzificação para cada cenário, as correntes obtidas para as GDs foram inseridas nas equações 26, 27 e 28 para calcular a variação da corrente em todas as linhas do sistema as quais foram selecionadas as variações das correntes nas linhas onde os relés estão alocados.

Com estas variações e com a corrente de pick-up de cada relé determinada sem a presença de GDs no sistema é possível calcular a corrente de pick-up dos relés quando o sistema apresenta GDs conectados. Para isso, precisa-se observar se o delta I causará um aumento ou uma diminuição na corrente de curto-circuito que foi utilizada para determinar a corrente de pick-up para o projeto de proteção sem a inserção de GDs.

A Tabela 146 contém os valores das correntes de curto-circuito obtidas através da equação 21. Comparando os valores da corrente calculada com os valores de corrente utilizados para determinar a corrente de pick-up de R3, R2 e R1, observa-se que os valores em **negrito** são menores. Então, neste caso, deve-se subtrair os valores de *pick-up* pelo

valor do módulo da corrente do delta I e nos demais casos, deve-se somar os valores da corrente de *pick-up* com os valores do delta I respectivo atualizando as correntes de *pick-up*. Isso é feito para manter-se a mesma zona de atuação e a mesma sensibilidade do relé antes da conexão de GDs.

Analisando os resultados da Tabela 147, nota-se que a corrente de *pick-up* dos relés aumenta ou diminui devido ao valor do delta I. Esse fato permite aos relés manterem a mesma sensibilidade à corrente de curto-circuito e à zona de proteção, Figura 24.

Tabela 146: Atualização da corrente de curto-circuito de projeto para observar se o delta I é de crescimento ou diminuição para os 3 relés com 8 GDs.

RELÉ	FUNÇÃO	Corrente de Projeto sem GD	ΔI	Corrente de Projeto atualizada
3	ZPT F	1179,1 -22,7°	22,19 -165,6°	1196
	ZPI F	1383,006 -169°	17,85 -146,22°	1370
	ZPT N	165,886 -12,8°	92,72 -96,2	180
	ZPI N	851,99 -63,9°	12,05 -101,6°	842
2	ZPT F	1179,1 -22,7°	21,27 -178,9°	1198
	ZPI F	1840,698 -63,9°	52,93 -100,8°	1891
	ZPT N	165,886 -12,8°	37,40 -101,92°	169
	ZPI N	1114,285 -72,4°	15,03 -86,2°	1128
1	ZPT F	1179,1 -22,7°	22,2 -165,6°	1196
	ZPI F	2063,587 -64,96°	71,1 -93,2°	2001
	ZPT N	165,886 -12,8°	43,73 -100,5°	169
	ZPI N	1252,76 -72,9°	63,07 -92,7°	1193

Tabela 147: Adaptação da proteção com todas os GDs conectados.

RELÉ	FUNÇÃO	I PICK-UP	ΔI	I PICK-UP NOVA
3	ZPT F	51	21,4	72,4
	ZPI F	270	18,5	251,5
	ZPT N	60	22,7	82,7
	ZPI N	850	8,7	841,3
2	ZPT F	260	20,69	280,69
	ZPI F	1380	184,29	1564,29
	ZPT N	60	19,02	79,02
	ZPI N	1200	37,61	1237,61
1	ZPT F	520	58,87	578,87
	ZPI F	2000	64,88	1935,13
	ZPT N	60	50,91	110,91
	ZPI N	1400	73,18	1326,82

Agora, considerando que as GFs estão desconectadas do sistema, e as outras GDs estão conectadas, tem-se que o delta I muda e consequentemente a contribuição da corrente de falta também. A Tabela 148 contém os valores das novas contribuições da corrente de falta e, consequentemente permite verificar se o delta I é de crescimento ou de diminuição.

Novamente tem-se que os valores na tabela 148 em negrito são referentes aos cenários cujo valores de delta I provocam uma diminuição na corrente de curto-circuito no ponto calculado. Portanto, para esses pontos o valor da corrente de *pick-up* correspondente irá diminuir e, no caso contrário, o valor da corrente de *pick-up* irá aumentar, conforme apresentado na Tabela 149. Sendo assim é possível determinar o coordenograma das correntes de *pick-up* atualizadas.

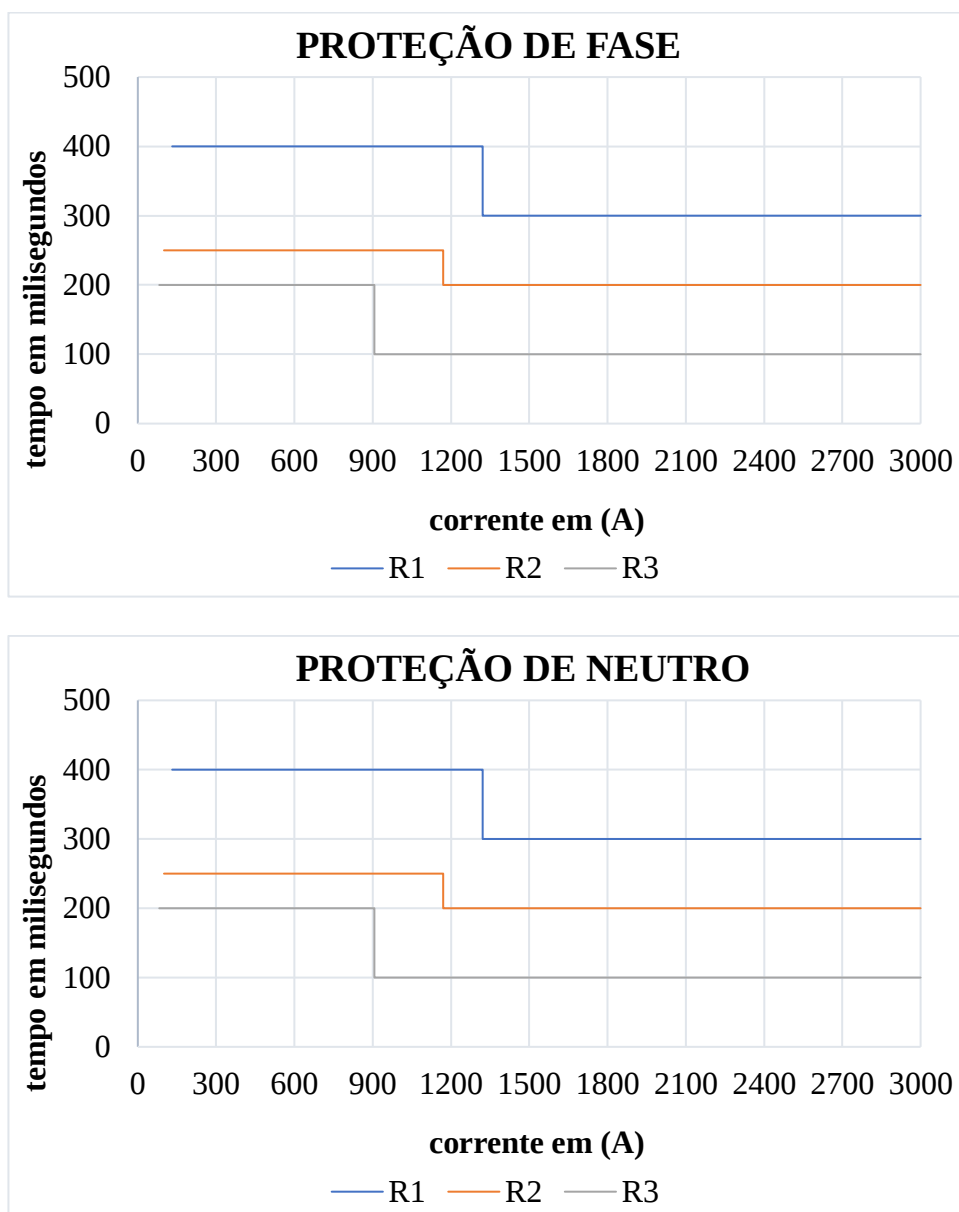
Tabela 148: Atualização da corrente de curto-circuito de projeto para observar se o delta I é de crescimento ou diminuição para os 3 relés com 5 GDs.

RELÉ	FUNÇÃO	Corrente de Projeto sem GD	ΔI	Corrente de Projeto atualizada
3	ZPT F	1179,1 _{-22,7}	57,576 _{-133,6}	1232
	ZPI F	1315,5758 _{-53°}	74,7 _{-108,9°}	1386
	ZPT N	165,886 _{-12,8°}	175,14 _{-96,5°}	228
	ZPI N	851,99 _{-63,9°}	21,02 _{-92,7°}	871
2	ZPT F	1179,1 _{-22,7}	60,14 _{-137,02°}	1205
	ZPI F	1840,698 _{-63,9°}	46,57 _{-104,9°}	1886
	ZPT N	165,886 _{-12,8°}	38,4 _{-110°}	175
	ZPI N	1114,285 _{-72,4°}	25,31 _{-81°}	1089
1	ZPT F	1179,1 _{-22,7}	57,8 _{-133,4}	1232
	ZPI F	2063,587 _{-64,96°}	71,11 _{-93,2}	2001
	ZPT N	165,886 _{-12,8°}	38,4 _{-110°}	175
	ZPI N	1252,76 _{-72,9°}	63,07 _{-92,7°}	1193

Tabela 149: Adaptação da proteção sem os GFs conectados.

RELÉ	FUNÇÃO	I PICK-UP	ΔI	I PICK-UP NOVA
3	ZPT F	51	60,95	111,95
	ZPI F	270	74,7	314,7
	ZPT N	60	22,04	82,04
	ZPI N	850	55,97	905,97
2	ZPT F	260	60,72	199,28
	ZPI F	1380	46,78	1426,78
	ZPT N	60	40,32	100,32
	ZPI N	1200	28,73	1171,27
1	ZPT F	520	107,63	627,63
	ZPI F	2000	64,88	1935,12
	ZPT N	60	71,7	131,7
	ZPI N	1400	78,55	1321,45

Figura 24: Coordenograma da proteção de fase e neutro para o sistema de 135 barras considerando 5 GDs.



Fonte: Próprio autor.

Considerando uma inserção de 13 GDs dispostas aleatoriamente no sistema de 135 barras conforme a Tabela 150, fez-se a adaptação da proteção de sobrecorrente. Ao processar os dados no algoritmo de adaptação da proteção resultou-se em novas correntes de *pick-up*, conforme a Tabela 151.

Tabela 150: Descrição das 13 GDs conectadas no sistema elétrico.

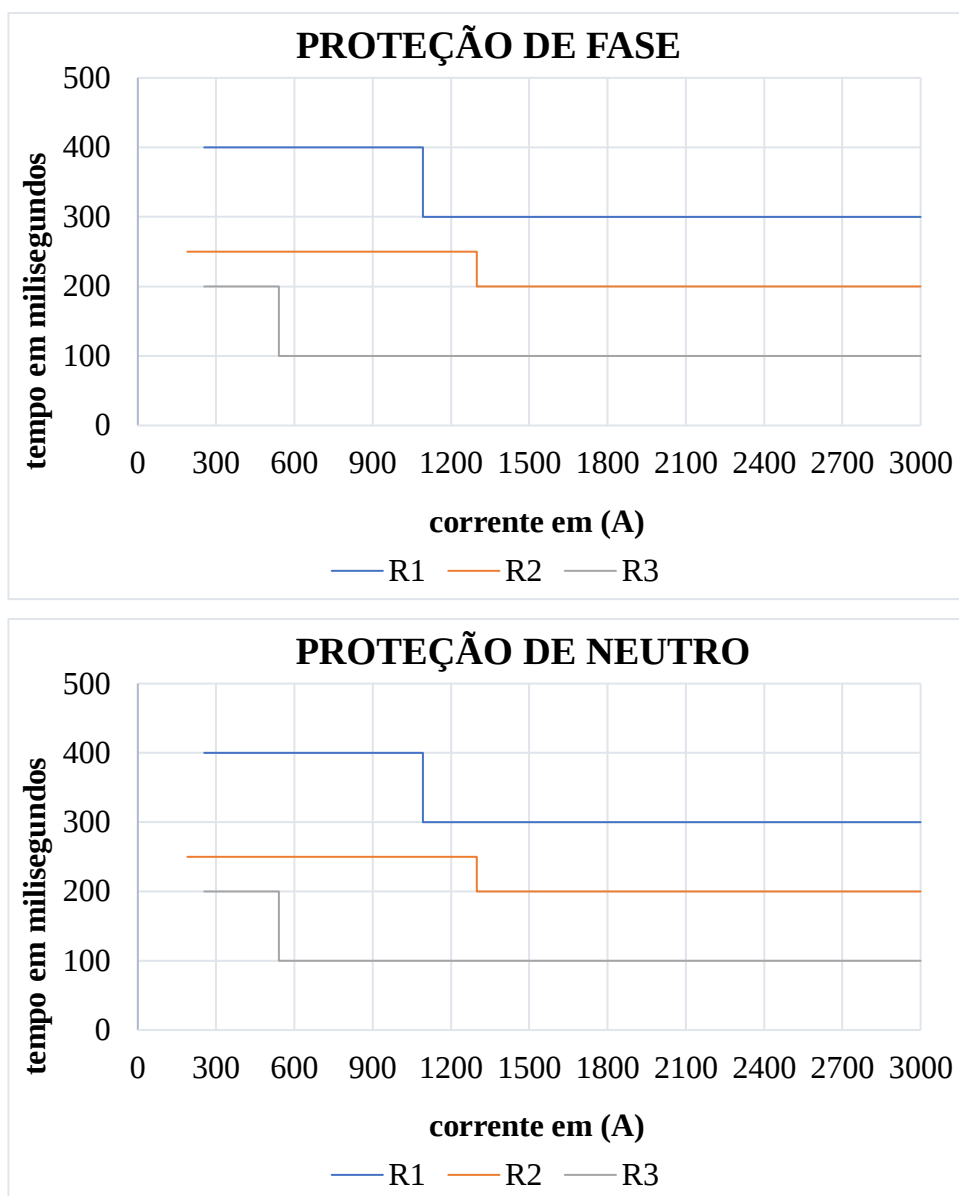
Tipo	Barra de conexão	Potência nominal (MW)	Corrente nominal (A)
GA1	3	0,5	20,91
GS1	23	0,3	12,5
GA2	41	0,15	6,17
GA2	48	0,15	6,17
GS2	51	0,2	8,367
GF1	58	0,5	20,91
GF2	123	0,3	12,55
GF2	121	0,3	12,5
GF3	92	0,25	10,4592
GA2	98	0,15	6,2755
GS1	134	0,3	12,5
GS3	105	0,1	4,18
GF1	115	0,5	20,9

Tabela 151: Obtenção das novas correntes de *pick-up*.

RELÉ	FUNÇÃO	I PICK-UP	ΔI	I PICK-UP NOVA
3	ZPT F	51	172,9	223,9
	ZPI F	270	114,7	384,7
	ZPT N	60	194,5	254,5
	ZPI N	850	308,5	541,5
2	ZPT F	260	51,1	311,1
	ZPI F	1380	101	1281
	ZPT N	60	129,6	189,6
	ZPI N	1200	99,1	1299,1
1	ZPT F	520	170,4	690,4
	ZPI F	2000	114,2	1885,32
	ZPT N	60	194,6	254,5
	ZPI N	1400	308,5	1091,65

Com os resultados da Tabela 151 obtêm-se o coordenograma correspondente a atualização da corrente de *pick-up*, figura 25.

Figura 25: Coordenograma da proteção de fase e neutro para o sistema de 135 barras considerando 13 GDs.



Fonte: Próprio autor.

7 CONCLUSÃO

Nota-se que o método proposto nesta tese é diferente de todos os métodos publicados na literatura, pois utiliza a primeira e a segunda leis de Kirchhoff, juntamente com a Lógica Fuzzy, para analisar o impacto da inserção de GDs nas correntes de curto-circuito em redes de distribuição de energia elétrica. Também apresenta contribuição no estado da arte pois emprega dados pré-falta para estimar as correntes injetadas pelos GDs utilizando a Lógica Fuzzy.

Através do método proposto é possível estimar a variação da corrente de curto-circuito nas linhas de um SDEE contendo GDs conectados, e, se for conhecida a corrente de falta nas linhas do SDEE sem GDs, é possível estimar a corrente que percorrerá as linhas deste sistema na presença de GDs em qualquer situação. Além disso, e o principal objetivo desta tese, é a possibilidade de adaptar a proteção de sobrecorrente antes mesmo da ocorrência de um curto-circuito no sistema.

Nota-se que o método completo apresentou erros pequenos tanto para as simulações para obter a variação da corrente de curto-circuito, quanto para obter a corrente de curto-circuito nas linhas dos SDEEs testados. Portanto, a utilização deste método para realizar a adaptação do sistema de proteção em redes de distribuição considerando a inserção de GDs se mostrou eficiente, uma vez que a corrente de *pick-up* dos relés foram atualizadas possibilitando manter a mesma zona de proteção dos relés.

Além disso, após várias simulações de curto-circuito ao longo do alimentador não foi observado perdas de coordenação e seletividade da proteção.

TRABALHOS FUTUROS:

Apesar da pesquisa ter avançado no estado da arte na proposta de um método de proteção para adaptar a proteção empregando dados pré-falta, os seguintes tópicos podem ser mencionados para desenvolvimento futuro:

- A partir dos resultados obtidos, caso sejam necessárias, propor melhorias no sistema de proteção de forma que o conceito de proteção adaptativa possa ser empregado em redes modernas de distribuição de energia elétrica.

- Testar o método para um sistema de maior porte para verificar a aplicabilidade em sistemas maiores considerando todos os tipos de GDs abordados;

- Testar a aplicabilidade do método em reconfiguração de redes de distribuição.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Nota Técnica nº0056/2017**. Atualização das projeções de consumidores residenciais e comerciais com microgeração solar fotovoltaicos no horizonte 2017- 2024. Brasília, DF, 2017b. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/documents/656827/15234696/Nota+T%C3%A9cnica_0056_PROJE%C3%87%C3%95ES+GD+2017/38cad9ae-71f6-8788-0429-d097409a0ba9. Acesso em: 14 maio 2017.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: módulo 8: qualidade de energia elétrica**. Brasília, DF, 2017. 90 p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Resolução normativa nº 482 de 2012. Brasília, DF, 2012.
- ALAM, M. N. Adaptive Protection Coordination Scheme Using Numerical Directional Overcurrent Relays. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, Piscataway, v. 15, n. 1, p. 64-73, 2019. DOI: 10.1109/TII.2018.2834474.
- ALAM, M. S.; ISLAM, M. A.; RAHMAN, A.; AL-ISMAIL, F. S.; HOSSAIN, M. A. Fault current limiter controller for the protection of inverter based distributed generation. *In: IEEE REGION 10 SYMPOSIUM (TENSYP)*, 2020, Dhaka. **Proceedings [...]** [S. l. s. n.], 2020. p. 646-649, DOI: 10.1109/TENSYP50017.2020.9230664.
- BARRADAS, H. M; BUZO, R. F; LEÃO, F. B. Analysis of voltage and short-circuit current on photovoltaic generation dominated distribution systems. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - SBSE*, 7., 2018, Niterói. Anais [...]
- [S. l.: s. n.], 2018.
- BARRADAS, H. M.; BUZO, R. F.; LEÃO, F. B. Novo método para estimação da corrente de curto-circuito em sistemas de distribuição de energia elétrica considerando a inserção de geração distribuída. **Sociedade Brasileira de Automática (SBA)**, Campinas, v. 1, n. 1, p. 1-6, 2020. DOI: <https://doi.org/10.48011/sbse.v1i1.2483>
- BUZO, R. F.; BARRADAS, H. M.; LEÃO, F. B. Fault Current of PV Inverters Under Grid-Connected Operation: a review. **J Control AutomElectr Syst.**, [s. l.], v. 32, p. 1053–1062, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40313-021-00729-6>.
- CHANDRARATNE, C.; WOO, W. L.; LOGENTHIRAN, T.; NAAYAGI, R. T. Adaptive Overcurrent Protection for Power Systems with Distributed Generators. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER AND ENERGY SYSTEMS (ICPES)*, 8th., 2018, Colombo. **Proceedings [...]** [S. l.: s. n.], 2018. p. 98-103. DOI: 10.1109/ICPESYS.2018.8626908.

CHAUDHARY, M.; BRAHMA, S. M.; RANADE, S. J. Short circuit analysis of type II induction generator and wind farm. **PES T&D**, [s. l.], p. 1-5, 2012. DOI: 10.1109/TDC.2012.6281610.

COFFELE, F.; BOOTH, C.; DYŚKO, A. An Adaptive Overcurrent Protection Scheme for Distribution Networks. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 30, n. 2, p. 561-568, 2015.

CPFL ENERGIA. Proteção de Redes Aéreas de Distribuição: sobrecorrente. nº do doc.2912, Manual, aprovado por: Caius Vinícius S Malagoli, 04/08/2016.

DÍAZ, N.; LUNA, A.; DUARTE, O. Improved MPPT short-circuit current method by a fuzzy short-circuit current estimator. *In*: IEEE ENERGY CONVERSION CONGRESS AND EXPOSITION, 2011, Phoenix. **Proceedings** [...] [S. l. s. n.], 2011. p. 211-218, DOI: 10.1109/ECCE.2011.6063771.

DASHTI, R.; VAHEDI, A.; RANJBAR, B.; DASHTI, R.; BABACHAHI, D. Transient analysis of induction generator jointed to network at balanced and unbalanced short circuit faults. *In*: INTERNATIONAL UNIVERSITIES POWER ENGINEERING CONFERENCE, 42nd., 2007, Brighton. **Proceedings** [...] [S. l. s. n.], 2007. p. 102-108. DOI: 10.1109/UPEC.2007.4468928.

EL-KHATTAM, W.; SIDHU, T. S. Restoration of directional overcurrent relay coordination in distributed generation systems utilizing fault current limiter. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 23, n. 2, p. 576-585, 2008. DOI: 10.1109/TPWRD.2008.915778.

GUARDA, F. G. K.; CARDOSO, G.; SILVA, C. D. L.; MORAIS, A. P. Fault current limiter placement to reduce recloser - fuse miscoordination in electric distribution systems with distributed generation using multiobjective particle swarm optimization. *in* **IEEE Latin America Transactions**, Piscataway, v. 16, n. 7, p. 1914-1920, 2018. DOI: 10.1109/TLA.2018.8447357.

HE, J. H.; CHENG, Y. H.; HU, J.; YIP, D. H. T. An accelerated adaptive overcurrent protection for distribution networks with high DG penetration. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEVELOPMENT IN POWER SYSTEM PROTECTION (DPSP), 13th., 2016, Edinburgh. **Proceedings** [...] [S. l. s. n.], 2016. p. 1-5. DOI: 10.1049/cp.2016.0024.

HOSSEINI, S. A.; SADEGHI, S. H. H.; ASKARIAN-ABYANEH, A.; NASIRI, A. Optimal placement and sizing of distributed generation sources considering network parameters and protection issues. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON RENEWABLE ENERGY RESEARCH AND APPLICATION (ICRERA), 2014, Milwaukee. **Proceedings** [...] [S. l. s. n.], 2014. p. 922-926. DOI: 10.1109/ICRERA.2014.7016521.

IEEE Guide for Control of Small (100 kVA to 5 MVA) Hydroelectric Power Plants – Redline. **Redline**, Bath, v. 1, p. 1-110, 2012.

ISLAM, M. A.; ALAM, M. S. A.; RAHMAN, ABIDO, M. A.; AL-ISMAIL, F. S.; AMINK, M. F. Modified bridge type fault current limiter based protective framework for Inverter Based Distributed Generation system. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING (ICECE)*, 11th., 2020, Dhaka. **Proceedings** [...] [S. l. s. n.], 2020. p. 165-168. DOI: 10.1109/ICECE51571.2020.9393147.

IEEE 13-Node Test Feeder [Online]. Available: <http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/>, 2006.

JAIN, D. K.; GUPTA, P.; SINGH, M. Overcurrent protection of distribution network with distributed generation. *In: IEEE INNOVATIVE SMART GRID TECHNOLOGIES - ASIA (ISGT ASIA)*, 2015, Bangkok. **Proceedings** [...] [S. l.: s. n.], 2015. p. 1-6. DOI: 10.1109/ISGT-Asia.2015.7387143.

JIAO, Y.; NIAN, H.; HE, G. Control strategy based on virtual synchronous generator of DFIG-based wind turbine under unbalanced grid voltage. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL MACHINES AND SYSTEMS (ICEMS)*, 20th., 2017. **Proceedings** [...] [S. l.: s. n.], 2017. p. 1-6. DOI: 10.1109/ICEMS.2017.8056475.

JIN, Q.; ZHANG, S.; LI, Y.-l. **A study on capacity of distributed generation and its effect on short circuit current at microgrid operation mode.** [S. l.: s. n.], 2011. p. 1109-1112.

JO, H.; JOO, S.; LEE, K. Optimal Placement of Superconducting Fault Current Limiters (SFCLs) for Protection of an Electric Power System with Distributed Generations (DGs). **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, Piscataway, v. 23, n. 3, p. 5600304-5600304, 2013. DOI: 10.1109/TASC.2012.2232958.

KALAGE, A. A. N. D.; GHAWGHA, W. E.; DEOKAR, T. V. Optimum location of superconducting fault current limiter to mitigate DG impact. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN ELECTRICAL, ELECTRONICS, INFORMATION, COMMUNICATION AND BIO-INFORMATICS (AEEICB)*, 2nd., 2016, Chennai. **Proceedings** [...] Piscataway: IEEE, 2016. p. 704-707. DOI: 10.1109/AEEICB.2016.7538385.

KIM, Y.; JO, H.; JOO, S. Analysis of Impacts of Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) Placement on Distributed Generation (DG) Expansion. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, Piscataway, v. 26, n. 4, p. 1-5, 2016. DOI: 10.1109/TASC.2016.2550598.

KUMAR, N.; JAIN, D. K. An adaptive inverse-time overcurrent protection method for low voltage microgrid. *In: IEEE POWER INDIA INTERNATIONAL CONFERENCE (PIICON)*, 9th., 2020. **Proceedings** [...] [S. l. s. n.], 2020. p. 1-5. DOI: 10.1109/PIICON49524.2020.9112947.

MAHAT, P.; CHEN, Z.; BAK-JENSEN, B.; BAK, C. L. A simple adaptive overcurrent protection of distribution systems with distributed generation. **IEEE Transactions on**

Smart Grid, Piscataway, v. 2, n. 3, p. 428-437, 2011, DOI: 10.1109/TSG.2011.2149550.

MAKOWSKI, K.; LEICHT, A. Modeling of short-circuit transients at terminals of a single-phase self-excited induction generator. *In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETIC FIELDS IN MECHATRONICS, ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING (ISEF) 18th*, 2017, Lodz. **Proceedings** [...] [S. l.: s. l.], 2017. p. 1-2. DOI: 10.1109/ISEF.2017.8090745.

MUDA, H.; JENA, P. Real time simulation of new adaptive overcurrent technique for microgrid protection. *In: NATIONAL POWER SYSTEMS CONFERENCE (NPSC)*, 2016, Bhubaneswar. **Proceedings** [...] [S. l.: s. n.], 2016. p. 1-6. DOI: 10.1109/NPSC.2016.7858897.

PENG, L.; FRANCOIS, B.; LI, Y. Improved crowbar control strategy of DFIG based wind turbines for grid fault ride-through. *In: ANNUAL IEEE APPLIED POWER ELECTRONICS CONFERENCE AND EXPOSITION*, 24., 2009, Washington. **Proceedings** [...] [S. l.: s. n.], 2009. p. 1932-1938. DOI: 10.1109/APEC.2009.4802937.

RAHMATI, M. A.; DIMASSI, R. A.; BUMBLAUSKAS, D. An Overcurrent protection relay based on local measurements. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 51, n. 3, p. 2081-2085, 2015. DOI: 10.1109/TIA.2014.2385933.

SADIQ, H.; HAMEED, U.; RAFIQUE, H. N.; RAZA, S. A. H.; IMRAN, K. **Impact of PV penetration on short circuit current of radial distributed feeder and existing power system protection of NUST**. [S. l.], 2018.

SHAOFEI SHEN, DA LIN, HUIFANG WANG, PEIJUN HU, KUAN JIANG, DONGYANG LIN, AND BENTENG HE. An Adaptive Protection Scheme for Distribution Systems With DGs Based on Optimized Thevenin Equivalent Parameters Estimation. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 32, n. 1, p. 411-419. 2017.

SHEN, S. *et al.* An Adaptive Protection Scheme for Distribution Systems With DGs Based on Optimized Thevenin Equivalent Parameters Estimation. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 32, n. 1, p. 411-419, 2017, DOI: 10.1109/TPWRD.2015.2506155.

SHIH, M. Y.; CONDE, A.; LEONOWICZ, Z.; MARTIRANO, L. An adaptive overcurrent coordination scheme to improve relay sensitivity and overcome drawbacks due to distributed generation in smart grids. **IEEE Transactions on Industry Applications**, Piscataway, v. 53, n. 6, p. 5217-5228, 2017, DOI: 10.1109/TIA.2017.2717880.

SITHARTHAN, R.; GEETHANJALI, M.; PANDY, T. K. S. Adaptive protection scheme for smart microgrid with electronically coupled distributed generations. **Alexandria Engineering Journal**, Alexandria, v. 55, n. 3, 2016, p. 2539-2550, ISSN 1110-0168, <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.06.025>.

- SIVASANKARAN, M. S.; SUBRAMANIAN, S.; MURUGESAN, S.; MURALI, V. Optimal placement and sizing of distributed generators to ensure protection coordination. 2017 *In: IEEE INDIA COUNCIL INTERNATIONAL CONFERENCE (INDICON)*, 14th, 2017, Roorkee. **Proceedings** [...] [S. l. s. n.], p. 1-6, DOI: 10.1109/INDICON.2017.8487580.
- STREZOSKI, L. V.; DUMNIC, B.; POPADIC, B.; PRICA, M. D.; LOPARO, K. A. Novel fault models for electronically coupled distributed energy resources and their laboratory validation. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 35, n. 2, p. 1209-1217, 2020. DOI: 10.1109/TPWRS.2019.2943123
- STREZOSKI, L. V.; PRICA, M. D. Short circuit analysis in large-scale distribution systems with high penetration of distributed generators. **Journal of Automatica Sinica**, Piscataway, v. 4, n. 2, p. 243-251, 2017.
- STREZOSKI, L. V.; PRICA, M. D.; KATIC, V. A.; DUMNIC, B. Short-circuit modeling of inverter based distributed generators considering the FRT requirements. *In: NORTH AMERICAN POWER SYMPOSIUM (NAPS)*, 2016, Denver. **Proceedings** [...] [S. l.: s. n.], 2016. p. 1-6. DOI: 10.1109/NAPS.2016.7747900.
- STREZOSKI, L.; PRICA, M. D.; LOPARO, K. A. Generalized Δ -circuit concept for integration of distributed generators in online short-circuit calculations. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 32, n. 4, p. 3237-3245, 2017. DOI: 10.1109/TPWRS.2016.2617158.
- STREZOSKI, L.; KATIC, V.; DUMNIC, B.; PRICA, M. D. The sub-transient, transient, and steady-state models for three-phase inverter based distributed generators for the purpose of real-time short-circuit analysis. *In: MEDITERRANEAN CONFERENCE ON POWER GENERATION, TRANSMISSION, DISTRIBUTION AND ENERGY CONVERSION (MEDPOWER)*, 2016, Belgrade. **Proceedings** [...] [S. l. s. n.], 2016. p. 1-8. DOI: 10.1049/cp.2016.0998.
- SULAWA, T.; ZABAR, Z.; CZARKOWSKI, D.; BIRENBAUM, L.; LEE, S.; TEN AMI, Y. Short Circuit Current of Induction Generators. *In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CIRCUITS AND SYSTEMS (ISCAS)*, 2007, New Orleans. **Proceedings** [...] [S. l.: s. n.], 2007. p. 2431-2434, DOI: 10.1109/ISCAS.2007.378611.
- TELUKUNTA, V.; PRADHAN, J.; SINGH, A. A. M.; SRIVANI, S. G. **Protection challenges under bulk penetration of renewable energy resources in power systems: a review**. CSEE Journal of Power and Energy Systems, v. 3, n. 4, 2017.
- TERANO, T.; ASAI, K. SUGENO, M. Fuzzy systems theory and its applications. **Information and Control**, Zadeh, v. 8, p. 338-353, 1965.
- TRUJILLO, K. R. B. **Modelos simplificados de geradores distribuídos para estudos de cálculo de curto-circuito**. 2017. Mestrado (Dissertação) - Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.

XU, K.; LIAO, Y. Intelligent method for online adaptive optimum coordination of overcurrent relays. *In: CLEMSON UNIVERSITY POWER SYSTEMS CONFERENCE (PSC)*, 2018, Charleston. **Proceedings** [...] [S. l.: s. n.], 2018. p. 1-5. DOI: 10.1109/PSC.2018.8664055.

XU, B.; LUO, Y.; ZHANG, Y.; JI, Y. Analysis of influence of wind turbine on short circuit capacity of system. *In: 2019 IEEE CONFERENCE ON ENERGY INTERNET AND ENERGY SYSTEM INTEGRATION (EI2)*, 3rd., 2019. **Proceedings** [...] Piscataway: IEEE, 2019. p. 1704-1709. DOI: 10.1109/EI247390.2019.9061778.

YU, X.; JIANG, Z.; ZHANG, Y. Control of doubly-fed induction generators for distributed wind power generation. *In: IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING - CONVERSION AND DELIVERY OF ELECTRICAL ENERGY IN THE 21ST CENTURY*, 2008, Pittsburgh. **Proceedings** [...] [S. l.: s. n.], 2008. p. 1-6. DOI: 10.1109/PES.2008.4596186.

ZHAN, H.; WANG, C.; WANG, Y.; YANG, X.; ZHANG, X.; WU, C.; CHE, Y. Relay Protection Coordination Integrated Optimal Placement and Sizing of Distributed Generation Sources in Distribution Networks. **IEEE Transactions on Smart Grid**, Piscataway, v. 7, n. 1, p. 55-65, 2016.

ZHAN, H. *et al.* **Relay Protection Coordination Integrated Optimal Placement and Sizing of Distributed Generation Sources in Distribution Networks**. IEEE Transactions on Smart Grid, Piscataway, v. 7, n. 1, p. 55-65, 2016. DOI: 10.1109/TSG.2015.2420667.

APÊNDICE

APLICAÇÃO DA LÓGICA FUZZY.

Utilizando o GF para ilustrar a aplicação da LF para um curto-circuito trifásico com $R_F=0$ ohms tem-se os dados de entrada obtidos através do DigSILENT, Tabela A1.

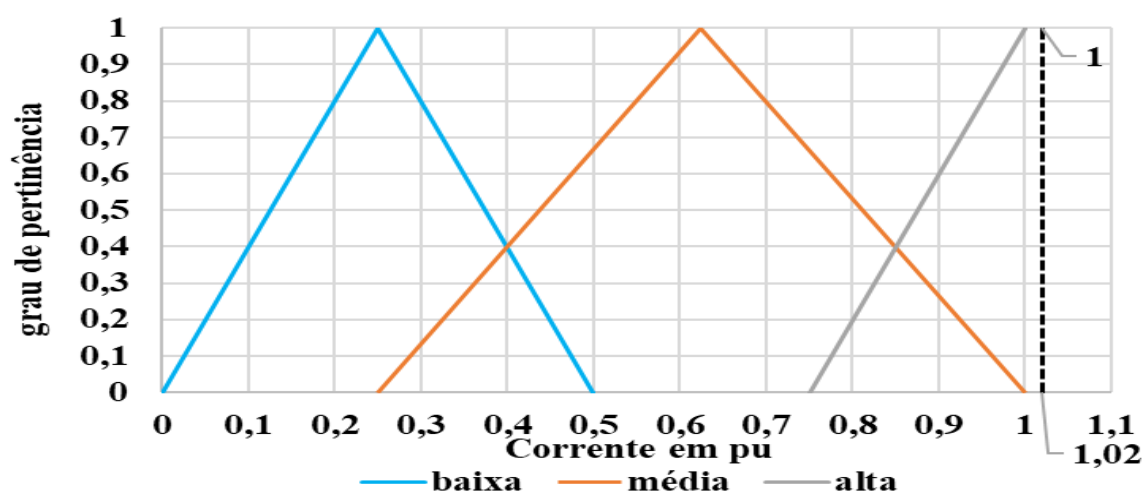
Tabela A1: Dados de entrada do modelo LF para o GF.

Teste/GF	Corrente (pu)	Potência (pu)	Tensão (pu)	D GF-BF (Ω)	RF (Ω)
1/GF1	1,02	1	0,9791	0	0

Fonte: próprio autor.

Realizando a fuzzificação destes dados tem-se:

Figura A1: Corrente injetada pelo GF em regime permanente com o devido grau de pertinência.

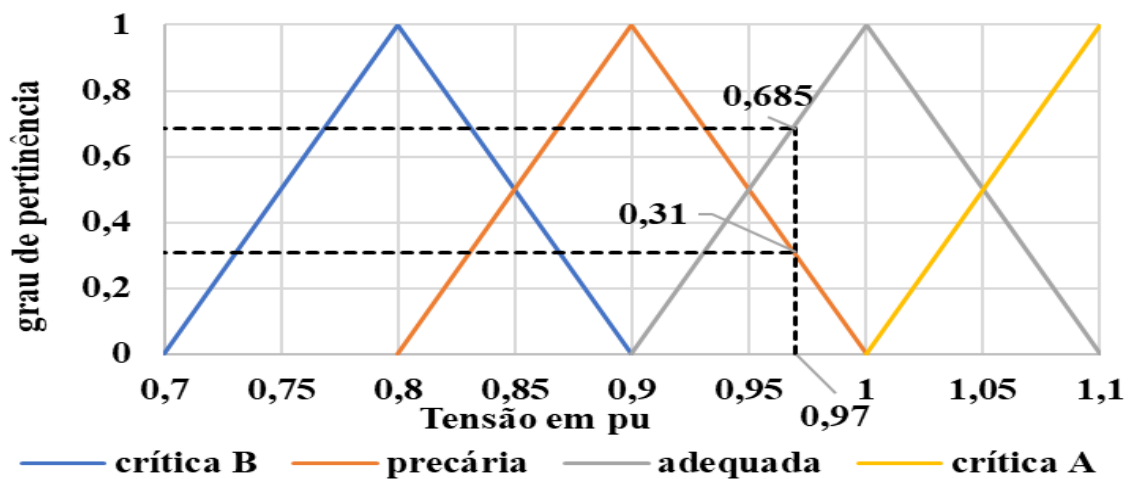


Fonte: próprio autor.

Na figura A1 observa-se que o valor obtido do DigSILENT de 1,02 pu para a corrente injetada antes da reparametrização do sistema de proteção resulta no valor 1 de grau de pertinência de saída. Seguindo esta análise, observa-se que para a tensão tem-se dois valores de pertinência, 0,31 e 0,685, o qual deve ser escolhido o maior, resultando assim na curva de tensão adequada para um valor de 0,97 pu.

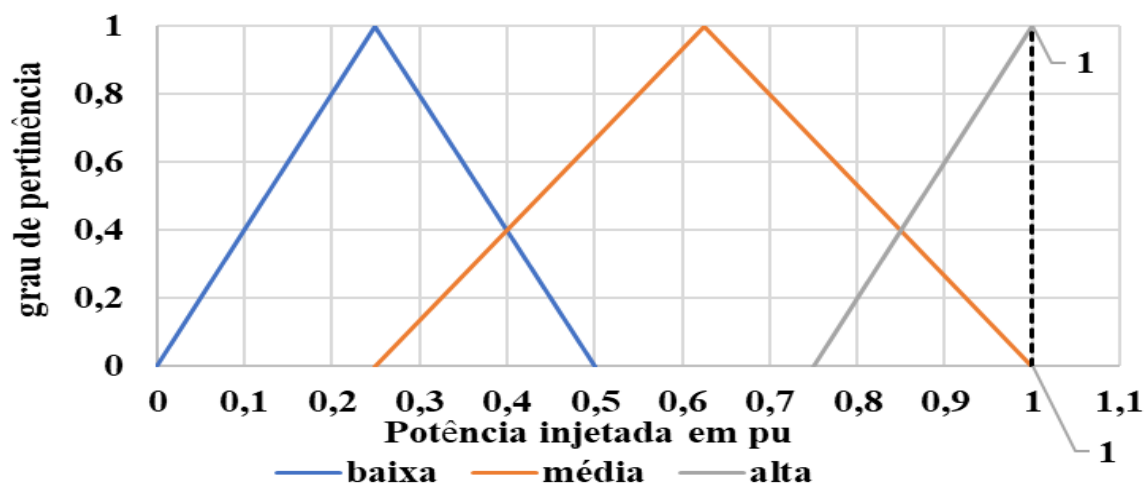
Para a potência injetada pelo GF tem-se os valores de 1 pu e grau de pertinência de 1.

Figura A2: Tensão na barra do GF em regime permanente com o devido grau de pertinência.



Fonte: próprio autor.

Figura A3: Potência injetada pelo GF em regime permanente com o devido grau de pertinência.

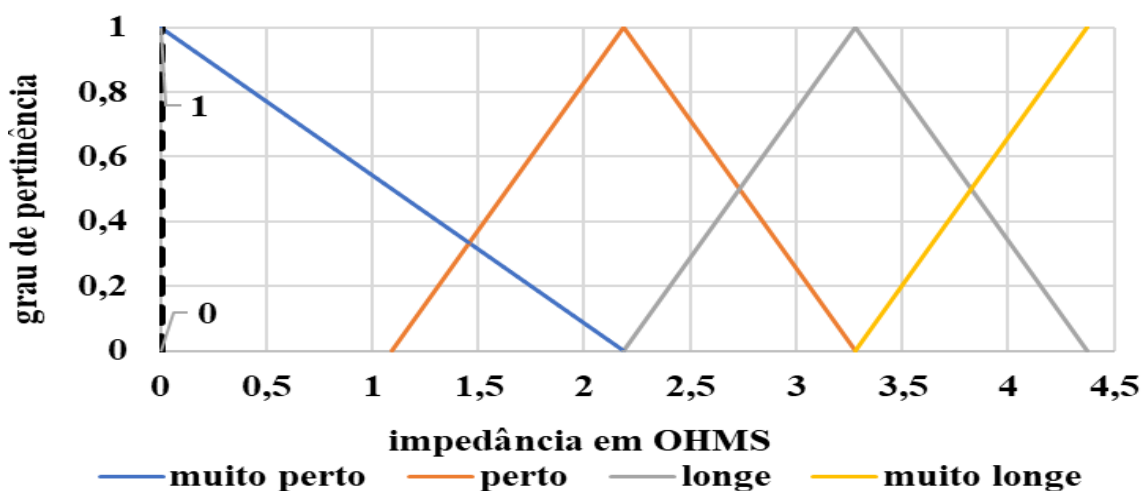


Fonte: próprio autor.

Para a distância entre o gerador e o ponto em falta tem-se o valor 0 ohms consequentemente um grau de pertinência de 1. E, quanto a resistência de falta tem-se 0 ohms e 1 de grau de pertinência.

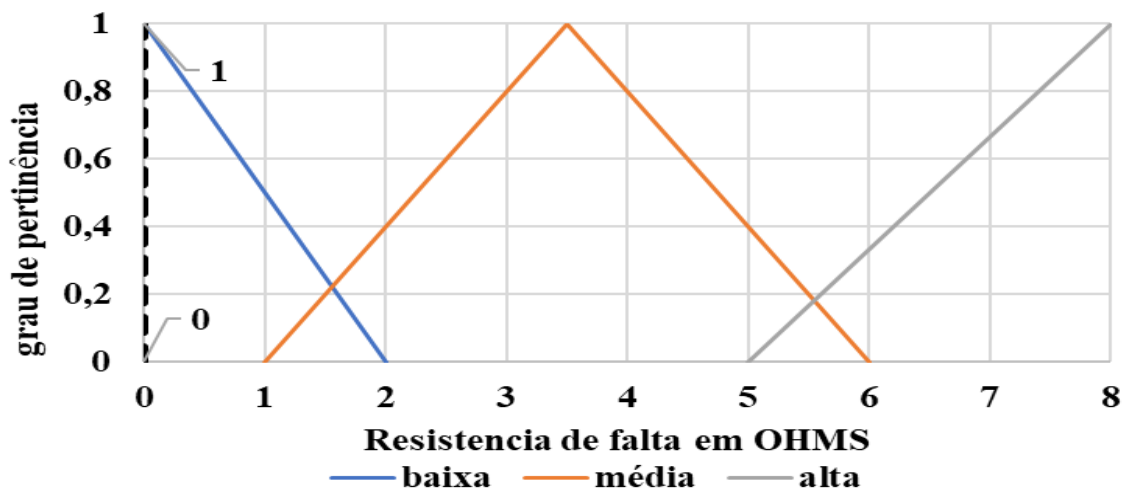
Sendo assim, a variável linguísticas referente a cada variável de entrada é ALTA, ALTA, ADEQUADA, MUITO PERTO e BAIXA respectivamente.

Figura A4: Impedância entre o GF e a barra em falta com o devido grau de pertinência.



Fonte: próprio autor.

Figura A5: Resistência de falta com o devido grau de pertinência.

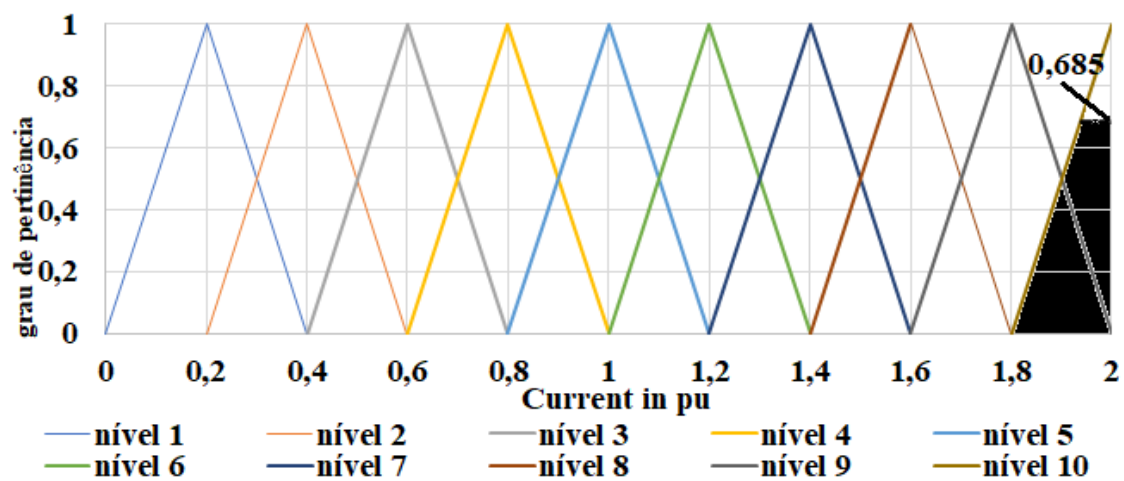


Fonte: próprio autor.

A combinação destas 5 variáveis linguísticas para uma falta trifásica proporciona a regra para o patamar 10, referente a corrente injetada pelo GF.

Portanto, ao aplicar o mínimo entre os valores dos graus de pertinência obtém-se 0,685 para o patamar 10 de corrente injetada. Sendo assim, utiliza-se Mandani para realizar a defuzzificação através do método do centroide. Neste caso, o valor obtido para a corrente injetada pelo GF é de 1,83 pu.

Figura A6: Saída da corrente injetada pelo GF com o devido grau de pertinência.



Fonte: próprio autor.

2) PARAMETRIZAÇÃO DAS CORRENTES DE PICK-UP DOS RELÉS

Considerando o cenário onde não há a presença de GD conectado ao sistema de distribuição seguiu-se a norma utilizada na CPFL (CPFL ENERGIA, 2016) para determinar a corrente de pick-up dos relés existentes no sistema da da Figura 21.

O primeiro passo é definir as zonas de proteção de cada relé, como pode ser observado na Figura 22.

O segundo passo é determinar a corrente de curto-circuito trifásica e monofásica com resistência de falta igual a 0 ohms na última barra da zona de proteção instantânea de cada relé e a corrente de curto-circuito bifásica e monofásica com resistência de falta igual a 40 ohms na última barra da zona de proteção temporizada de cada relé.

Com a aquisição dessas correntes de curto-circuito e com a corrente de carga é possível determinar as correntes de *pick-up* das unidades instantâneas e temporizadas de fase e neutro.

Tabela A1: Correntes de curto-circuito em amperes utilizadas na parametrização dos relés.

Barras	Trifásica	Bifásica	Monofásica RF=0 Ω	Monofásica RF=40 Ω
48	2061	-	1377,5	-
103	1832	-	1160,72	-
118	1284	1261,7	845,5	166

Tabela A2: Corrente de carga em amperes nas linhas de alocação dos relés.

	R1	R2	R3
Corrente de carregamento	220	82	15

Para o relé R1:

- a) Unidade temporizada de fase.

$$1,5.I_n \leq I_{Aj} \leq \frac{I_{CC_Bif}}{1,1} \quad \text{Eq. A1}$$

$$I_{Aj} = 520 \text{ A}$$

I_n : Corrente de carga do alimentador no ponto em que o relé está sendo instalado;

I_{Aj} : Corrente de ajuste do relé;

I_{CC_Bif} : Corrente de curto-circuito bifásico na última barra do alcance da Zona de Proteção Temporizada.

b) Unidade instantânea de fase.

$$8.I_n \leq I_{Aj} \leq I_{CC_Trif} \quad \text{Eq. A2}$$

$$I_{Aj} = 2000 \text{ A}$$

I_{CC_Trif} : Corrente de curto-circuito trifásico na última barra da Zona de Proteção Instantânea.

c) Unidade temporizada de neutro.

Por norma: $I_{Aj} = 60 \text{ A}$

d) Unidade instantânea de neutro.

$$I_{Aj} > I_{CC_Mono} \quad \text{Eq. A3}$$

$$I_{Aj} = 1400 \text{ A}$$

I_{CC_Mono} : Corrente de curto-circuito fase-terra na última barra da Zona de Proteção Instantânea.

Para o relé R2:

a) Unidade temporizada de fase.

Aplica-se Eq. A1

$$\therefore I_{Aj} = 260 \text{ A}$$

- b) Unidade instantânea de fase.

Aplica-se Eq. A2

$$\therefore I_{Aj} = 1380 \text{ A}$$

- c) Unidade temporizada de neutro.

Por norma: $I_{Aj} = 60 \text{ A}$

- d) Unidade instantânea de neutro.

Aplica-se Eq. A3

$$\therefore I_{Aj} = 1200 \text{ A}$$

Para o relé R3:

- a) Unidade temporizada de fase.

Aplica-se Eq. A1

$$\therefore I_{Aj} = 51 \text{ A}$$

- b) Unidade instantânea de fase.

Aplica-se Eq. A2

$$\therefore I_{Aj} = 270 \text{ A}$$

- c) Unidade temporizada de neutro.

Por norma: $I_{Aj} = 60 \text{ A}$

- d) Unidade instantânea de neutro.

Aplica-se Eq. A3

$$\therefore I_{Aj} = 850 \text{ A}$$