DANIEL AMARAL PINHEIRO

CÁLCULO DE CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO E AJUSTE DOS RELÉS DE PROTEÇÃO EM MICRORREDES

Belo Horizonte - MG
Fevereiro/2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

ESCOLA DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CÁLCULO DE CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO E AJUSTE DOS RELÉS DE PROTEÇÃO EM MICRORREDES

DANIEL AMARAL PINHEIRO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Engenharia de Potência
Linha de Pesquisa: Sistemas de Energia Elétrica

Orientador: Dr. Clever Pereira
Coorientador: Dr. Sidelmo Magalhães Silva

Belo Horizonte - MG
Fevereiro/2018

Amaral Pinheiro, Daniel.
A485c Cálculo de correntes de curto-circuito e ajuste dos relés de proteção em microrredes [manuscrito] / Daniel Amaral Pinheiro. - 2018.
xxii, 149 f., enc.: il.

Orientador: Clever Pereira.
Coorientador: Sidelmo Magalhães Silva.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices e anexos: f. 119-149.

Bibliografia: f. 113-117.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Curtos-circuitos - Teses. 3. Relés de proteção - Teses. I. Pereira Filho, Clever Sebastião. II. Silva, Sidelmo Magalhães. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621.3(043)

Dedico este trabalho à memória de meu avô,

Mário Avelino do Amaral

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela iluminação e sabedoria concedidas nesta longa jornada.

Agradeço aos professores Dr. Clever Pereira e Dr. Sidelmo Magalhães Silva pela orientação neste trabalho e experiência. Agradeço também aos amigos e colegas de profissão, que colaboraram através do apoio técnico, disponibilização de materiais de referência, sugestões e incentivo nos momentos mais difíceis.

Enfim, agradeço à minha família por todo esforço que tiveram para eu ter uma excelente educação, pelos ensinamentos e sabedoria que me foram transmitidos ao longo de toda a minha vida, pela paciência, incentivos, compreensão e amor.

“Não existe verdadeira inteligência sem bondade.”

Ludwig van Beethoven

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e implementação de uma metodologia de cálculo de correntes de curto-circuito em microrredes, visando a aplicação nos ajustes de corrente dos relés de proteção. Inicialmente, é apresentada uma revisão bibliográfica, onde são abordadas as legislações internacionais e nacionais utilizadas nas instalações, as tecnologias de geração distribuída e sistemas de armazenamento de energia, os benefícios da implantação referentes à qualidade de energia, confiabilidade e resiliência e as principais características de arquiteturas relativas à operação e controle. Em seguida, é introduzido o tema de proteção de microrredes, onde as principais características de interface com o sistema elétrico, incluindo os impactos de sua conexão no sistema de proteção, são detalhadas. Posteriormente, são abordadas as metodologias presentes na literatura referentes ao cálculo de curto-circuito nas microrredes, onde suas características mais importantes e limitações são analisadas. Tendo como base as referências teóricas estudadas e também o método da superposição de circuitos elétricos, é desenvolvida uma nova metodologia de cálculo das correntes de curto-circuito que ocorrem internamente às microrredes. A superposição de circuitos é aplicada para as fontes provenientes de máquinas síncronas e um novo método de cálculo que utiliza matrizes dinâmicas é desenvolvido para as fontes provenientes de sistemas fotovoltaicos. Todas as etapas envolvidas na concepção da metodologia são detalhadas, incluindo as equações matemáticas que regem o sistema e a implementação em ambiente computacional de um programa para efetuar de forma automática os cálculos. Este programa é utilizado para simulação em uma arquitetura de microrrede proposta e apresenta bons resultados referentes ao cálculo das correntes de curto-circuito nas barras e elementos da instalação. Na etapa final do trabalho, é desenvolvida uma interface gráfica para operação e controle da microrrede, onde os valores de correntes obtidos na simulação são utilizados nos ajustes dos pontos de atuação dos relés de proteção, visando a coordenação e seletividade entre os mesmos.

Palavras-chave: Cálculo de Curto-Circuito, Geração Distribuída, Microrredes, Relés de Proteção.

ABSTRACT

This work presents the development and implementation of a methodology for the calculation of short circuit currents in microgrids, aiming at the application in the protective relay's current adjustments. Initially, a bibliographic review is presented, which addresses the international and national legislation used in the installations, distributed generation technologies and energy storage systems, the benefits of the implantation referring to the power quality, reliability and resilience and the main characteristics of the operation and control architectures. Then, the theme of microgrids protection is introduced, where the main characteristics of the interface with the electrical power grid, including the impacts of its connection in the protection system, are detailed. After this, the methodologies present in the literature regarding the short circuit calculation in microgrids are discussed, where their most important characteristics and limitations are analyzed. Based on the theoretical references studied and also the method of superposition of electric circuits, a new methodology is developed to calculate the short circuit currents that occur internally to the microgrids. The superposition of circuits is applied to the sources from synchronous machines and a new calculation method using dynamic matrices is developed for the sources from photovoltaic systems. All the steps involved in the design of the methodology are detailed, including the mathematical equations that govern the system and the implementation of a program to run automatically the calculations. This program is used for simulation in a microgrid architecture proposed and presents good results regarding the calculation of the short circuit currents in the bars and elements of the installation. In the final stage of the work, a graphical interface is developed for the operation and control of the microgrid, where the values of currents obtained in the simulation are used in the adjustment of the points of operation for the protective relays, aiming the coordination and selectivity between them.

Keywords: Short Circuit Calculation, Distributed Generation, Microgrids, Protective Relays.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Diagrama Esquemático de uma Microrrede 7
Figura 2.2 - Diagrama de uma Microrrede Indicando os Inversores de Frequência 9
Figura 2.3 – Diagrama Esquemático de uma Turbina Eólica 19
Figura 2.4 – Perspectiva em 3D de uma Turbina Eólica 20
Figura 2.5 – Parque Eólico de Osório 21
Figura 2.6 – Aerogerador de Pequeno Porte 21
Figura 2.7 – Composição de Painéis Fotovoltaicos 22
Figura 2.8 – Aplicação Residencial de Painéis Fotovoltaicos 23
Figura 2.9 – Aplicação de Painéis Fotovoltaicos em Estádios 23
Figura 2.10 – Aplicação Industrial de Painéis Fotovoltaicos 24
Figura 2.11 – Aplicação de Painéis Fotovoltaicos em Universidades. 24
Figura 2.12 – Compensador de Qualidade de Energia de Interface para Microrredes 28
Figura 2.13 – Fluxograma de Avaliação da Confiabilidade do Suprimento para Microrredes 30
Figura 2.14 – Níveis de Controle Hierárquico para Microrredes 33
Figura 2.15 – Curvas de Coordenação entre Religador e Fusível 39
Figura 2.16 – Representação Simplificada de um Sistema de Distribuição 40
Figura 2.17 – Perda de Coordenação do Sistema de Proteção 41
Figura 2.18 – Perda de Sensibilidade do Sistema de Proteção 42
Figura 2.19 – Atuação Indevida do Sistema de Proteção 43
Figura 2.20 – Sistema de Proteção Centralizado com Rede de Comunicação 52
Figura 2.21 – Arquitetura de Microrrede para Estudo de Seletividade 55
Figura 2.22 – Algoritmo de Seletividade dos Relés de Proteção 56

Figura 3.1 – Circuito Pré-Falta. 63
Figura 3.2 – Circuito Pré-Falta Alternativo. 63
Figura 3.3 – Circuito Pós-Falta 64
Figura 3.4 – Circuito Pós-Falta Alternativo. 64

Figura 3.5 – Circuito Puro de Falta 64

Figura 3.6 – Circuitos Sequenciais Equivalentes de Thévenin 65

Figura 3.7 – Microrrede Proposta para Estudo e Simulação. 67

Figura 3.8 – Algoritmo para Cálculo de Correntes Totais de Curto-Circuito. 86

Figura 4.1 – Microrrede Proposta para Estudo e Simulação. 94

Figura 4.2 – Simulações para o Elemento 1 da Microrrede. 95

Figura 4.3 – Simulações para o Elemento 3 da Microrrede. 96

Figura 4.4 – Simulações para o Elemento 5 da Microrrede. 97

Figura 4.5 – Simulações para o Elemento 7 da Microrrede. 98

Figura 4.6 – Relatório de Simulação de uma Falta do Tipo AT na Barra 1 da Microrrede. 101

Figura 4.7 – Relatório de Simulação de uma Falta do Tipo BC na Barra 3 da Microrrede. 102

Figura 4.8 – Coordenação e Seletividade dos Relés de Proteção - Exemplo 1. 104

Figura 4.9 – Coordenação e Seletividade dos Relés de Proteção - Exemplo 2. 105

Figura 4.10 – Interface Gráfica para Supervisão e Controle da Microrrede. 107

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Limites dos Parâmetros de Sincronização para a Interligação Síncrona 10

Tabela 2.2 – Resposta do Sistema de Interconexão para Frequências Anormais..... 11

Tabela 2.3 – Requisitos Mínimos em Função da Potência Instalada 13

Tabela 2.4 – Classificação por Faixa de Geração de Usinas Hidrelétricas 18

Tabela 2.5 – Tabela ANSI 44

Tabela 2.6 – Proteções Exigidas pelas Concessionárias para Instalação de GDs 45

Tabela 2.7 – Proteções Exigidas pelas Concessionárias no Ponto de Conexão da GD..... 47

Tabela 3.1 – Características dos Elementos da Microrrede. 69

Tabela 3.2 – Dados de Saída do Cálculo de Curto-Circuito. 79

Tabela 3.3 – Características dos Sistemas Fotovoltaicos. 82

Tabela 3.4 – Dados de Saída do Programa de Cálculo de Curto-Circuito. 90

Tabela 4.1 – Status Operacionais da Microrrede Utilizados nas Simulações. 94

Tabela 4.2 – Simulações para o Elemento 1 da Microrrede. 95

Tabela 4.3 – Simulações para o Elemento 3 da Microrrede. 96

Tabela 4.4 – Simulações para o Elemento 5 da Microrrede. 97

Tabela 4.5 – Simulações para o Elemento 7 da Microrrede. 98

Tabela 4.6 – Ajustes de Corrente dos Relés de Proteção - Exemplo 1..... 104

Tabela 4.7 – Ajustes de Corrente dos Relés de Proteção - Exemplo 2..... 105

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DER	Distributed Energy Resource
EMS	Energy Management System
ESS	Energy Storage System
GD	Geração Distribuída
LT	Linha de Transmissão
PCC	Point of Common Coupling
PCH	Pequenas Centrais Hidrelétricas
SEP	Sistema Elétrico de Potência

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO 1

1.1 Contexto 1
1.2 Motivação e Objetivos 2
1.3 Metodologia de Desenvolvimento do Trabalho 3
1.4 Organização do Trabalho 3

CAPÍTULO 2 - ESTUDOS E TECNOLOGIAS APLICADAS EM MICRORREDES 5

2.1 Considerações Iniciais 5
2.2 Definição de Microrredes 6
2.3 Legislação e Normas Técnicas 10
2.3.1 Normas Internacionais 10
2.3.2 Normas Nacionais 12
2.4 Tecnologias de Geração Distribuída para Microrredes 15
2.4.1 Sistemas de Geração Distribuída de Energia 17
2.4.2 Sistemas de Armazenamento de Energia 25
2.5 Microrredes para Melhoria do Desempenho do Sistema Elétrico 26
2.5.1 Qualidade de Energia 27
2.5.2 Confiabilidade 29
2.5.3 Resiliência 31
2.6 Operação e Controle de Microrredes 32
2.6.1 Controle e Gerenciamento de Energia 32
2.6.2 Arquiteturas de Controle 34
2.6.3 Controles de Tensão e Frequência 35
2.6.4 Microrredes Funcionando no Modo Ilhado 35
2.7 Proteção de Microrredes 37
2.7.1 Características da Proteção do Sistema Elétrico 37
2.7.2 Impactos das Microrredes na Proteção do Sistema Elétrico 40
2.7.2.1 Perda de Coordenação 41
2.7.2.2 Perda de Sensibilidade 42
2.7.2.3 Atuação Indevida da Proteção da Concessionária 43
2.7.3 Funções de Proteção Exigidas pelas Concessionárias de Energia 43
2.7.4 Análise de Faltas em Microrredes e Sistema de Proteção Adaptativo 49
2.7.5 Proteção Baseada em Sistemas de Comunicação 57
2.7.6 Limitação de Corrente de Falta 58
2.8 Considerações Finais 58

CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA PARA CÁLCULO DE CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO 59

3.1 Considerações Iniciais 59
3.2 Estudos de Curto-Circuito 60
3.2.1 Tipos de Curtos-Circuitos 61
3.3 Método da Superposição 62
3.4 Definição do Estudo de Caso 66
3.5 Aplicação da Superposição em Microrredes 70
3.5.1 Modelagem Computacional 70
3.5.1.1 Solução Matricial de Redes 71
3.5.2 Circuito Pré-Falta 71
3.5.3 Cálculo de Curtos-Circuitos 76
3.5.4 Circuito Pós-Falta 80
3.6 Metodologia para Sistemas Fotovoltaicos 81
3.6.1 Matriz de Correntes das Fontes para os Elementos 84
3.6.2 Matriz de Correntes Totais de Curto em Todas as Barras 85
3.7 Cálculo das Correntes Totais de Curto-Circuito 85
3.8 Considerações Finais 88

CAPÍTULO 4 - SIMULAÇÕES E APLICAÇÃO DO PROGRAMA 91

4.1 Considerações Iniciais 91
4.2 Simulação do Programa 92
4.2.1 Simulações nos Modos Conectado e Ilhado 92
4.3 Validação do Programa 100
4.4 Ajustes de Correntes dos Relés de Proteção 103
4.5 Interface Gráfica para Supervisão e Controle 107
4.6 Considerações Finais 108

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE 109

5.1 Conclusões 109
5.2 Propostas de Continuidade 111

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 113

APÊNDICE A - Simulações de Curto-Circuito (Simulação A) 119

APÊNDICE B - Simulações de Curto-Circuito (Simulação B) 125

APÊNDICE C - Simulações de Curto-Circuito (Simulação C) 131

APÊNDICE D - Simulações de Curto-Circuito (Simulação D) 137

APÊNDICE E - Simulações de Curto-Circuito (Simulação E) 143

ANEXO A - Dados dos Paineis Fotovoltaicos 149

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 Contexto

O constante crescimento na demanda da sociedade por energia elétrica, aliado à busca por formas de geração renováveis, aumentou a difusão da instalação de microrredes, que são compostas pela associação de uma ou mais fontes de energia alimentando as cargas. Isto trouxe novos desafios para a monitoração, controle e proteção do sistema elétrico e também do funcionamento interno das microrredes.

Instalações de sistemas fotovoltaicos, assim como outras tecnologias renováveis de energia, presentes em diversas arquiteturas de microrredes, estão cada vez mais difundidas nas residências, comércios e complexos industriais. Isto cria a necessidade de estudos específicos de como estas novas gerações de energia irão interagir com o sistema elétrico e os respectivos impactos de sua implantação [1,2].

Na comunidade científica, existem diversos trabalhos publicados referentes à estudos de caso de implantações de microrredes e as tecnologias utilizadas nas mesmas. Estão sendo avaliados os comportamentos dinâmicos das instalações de acordo com as respectivas arquiteturas e também os fatores ambientais, visto que, muitas fontes de energia renováveis utilizadas nas microrredes, como os sistemas fotovoltaicos, dependem fortemente das condições climáticas da região [3,4].

Com relação à proteção do sistema elétrico, existem tecnologias consolidadas sobre o tema, entretanto, quando são instaladas as microrredes, surgem diversos impactos de interface que também estão sendo estudados pela comunidade científica [5].

Além dos impactos na proteção do sistema elétrico gerados pela conexão das microrredes, também são necessários estudos específicos e desenvolvimento de sistemas de proteção para a parte interna das mesmas. Para esta situação, os conceitos e tecnologias são relativamente recentes e ainda em desenvolvimento.

Em vista deste cenário, existem diversas oportunidades para desenvolvimento de novas tecnologias visando aprimorar o funcionamento e interface das microrredes.

1.2 Motivação e Objetivos

Quando ocorre um curto-circuito numa região interna das microrredes, observa-se que existem contribuições de diversos sistemas de energia, incluindo a rede elétrica principal. Como as gerações distribuídas possuem diferentes tecnologias e por consequência, capacidades diferentes de fornecer correntes em um curto-circuito, torna-se bastante complexa a dinâmica interna de uma microrrede neste cenário.

Considerando que em muitos casos as microrredes podem operar desconectadas das redes elétricas principais, e que os sistemas de geração distribuída podem ter seus funcionamentos variáveis de acordo com as necessidades operacionais e também com as condições climáticas, o comportamento das correntes em situação de curto-circuito torna-se ainda mais dinâmico e complexo.

Com relação aos relés de proteção, utilizados para detectar um curto-circuito e acionar os dispositivos para desconectar as respectivas áreas afetadas, os mesmos são parametrizados com base no cálculo destas correntes. Com isto, torna-se um interessante desafio tecnológico criar os ajustes dos relés, principalmente visando a coordenação e seletividade entre os mesmos, visto que, somente as áreas afetadas pelo curto-circuito devem ser desconectadas pelo sistema de proteção.

Desta forma, o objetivo deste trabalho é desenvolver e implementar uma metodologia de cálculo de correntes de curto-circuito em microrredes e utilizá-la para criar os ajustes dos relés de proteção, visando a coordenação e seletividade entre os mesmos. A metodologia de cálculo deve ser capaz de se adaptar às diversas condições operacionais encontradas em uma microrrede.

1.3 Metodologia de Desenvolvimento do Trabalho

Inicialmente é realizada uma revisão bibliográfica para ambientar o leitor no assunto de microrredes, onde as diversas áreas de pesquisas sobre o tema são comentadas, dando um destaque maior para os sistemas de proteção. Em seguida, são abordados os modelos encontrados na literatura sobre cálculo de curto-circuito em microrredes, onde suas características e limitações são analisadas.

Após a revisão bibliográfica, inicia-se o desenvolvimento da metodologia de cálculo de curto-circuito proposta neste trabalho, onde todas as etapas envolvidas na implementação em ambiente computacional são detalhadas. Posteriormente, são realizadas simulações utilizando uma arquitetura de microrrede proposta, onde os resultados são utilizados para criar os ajustes de corrente dos relés de proteção.

Por fim, é criada uma interface gráfica para supervisão e controle centralizados da microrrede, onde um operador poderá dar os comandos de condições operacionais das gerações distribuídas e visualizar os ajustes de corrente dos relés.

1.4 Organização do Trabalho

A organização do trabalho foi realizada conforme os itens a seguir:

- Capítulo 2: Apresenta uma revisão bibliográfica sobre microrredes, abordando as diversas linhas de pesquisas que contemplam o tema. Cita também os sistemas de proteção da rede elétrica e as propostas relativas à proteção das microrredes.
- Capítulo 3: Apresenta o desenvolvimento da metodologia de cálculo, incluindo as equações matemáticas implementadas em ambiente computacional. Apresenta também uma arquitetura de microrrede proposta como estudo de caso.
- Capítulo 4: Apresenta as simulações executadas, a análise dos resultados e a criação dos ajustes de corrente dos relés de proteção. Em seguida, apresenta a interface gráfica desenvolvida para monitoração e controle da microrrede.
- Capítulo 5: Apresenta as conclusões e propostas de continuidade do trabalho.

Capítulo 2

ESTUDOS E TECNOLOGIAS APLICADAS EM MICRORREDES

2.1 Considerações Iniciais

Este capítulo visa introduzir o assunto de microrredes através de uma revisão bibliográfica abordando diversos estudos e tecnologias aplicadas, iniciando pela sua definição e principais componentes e finalizando com a introdução de estudos sobre proteção de microrredes.

No item 2.2 é abordada a definição de microrredes, seus componentes e características básicas, no item 2.3 são citadas as legislações e normas técnicas envolvidas, no item 2.4 são abordadas as tecnologias de geração distribuídas utilizadas, incluindo os sistemas de armazenamento de energia. O item 2.5 trata da aplicação de microrredes para a melhoria do desempenho do sistema elétrico e o item 2.6 trata da operação e controle de microrredes. O capítulo se encerra com os itens 2.7, que aborda a proteção em microrredes, e 2.8 com as considerações finais.

O capítulo está estruturado de forma que o leitor possa ter uma visão geral sobre o assunto de microrredes e suas diversas linhas de pesquisa, servindo de embasamento teórico para o capítulo posterior, principalmente no assunto de proteção de microrredes. O texto possui diversas referências bibliográficas encontradas na literatura sobre cada tema, de forma a possibilitar posterior consulta caso o leitor queira se aprofundar em outra linha de pesquisa em específico.

2.2 Definição de Microrredes

Microrredes podem ser definidas como um grupo de cargas e gerações distribuídas (GD) de energia, interconectadas e funcionando como um único elemento controlável, conectados à rede elétrica principal através de um único ponto intermediário de acoplamento e com a capacidade de se desconectar e operar de forma ilhada. Ainda conforme esta definição, pode-se citar que uma instalação é considerada uma microrrede se possuir estas 3 características distintas: fronteiras elétricas bem definidas em relação à rede elétrica principal, sistema de controle que pode ser centralizado ou descentralizado para as gerações distribuídas e cargas, e a capacidade da geração distribuída deve exceder os valores de consumo de pico das cargas críticas, permitindo assim o funcionamento da microrrede no modo ilhado [2].

Considerando a capacidade da microrrede operar nos modos conectado ou ilhado, assim como os status de operação ligado e desligado da rede elétrica principal, pode-se citar 3 situações claras de operação para microrredes [1]:

- Modo de operação conectado: Neste modo de operação, as gerações distribuídas estarão suprindo as cargas da microrrede e também injetando na rede elétrica principal a energia excedente gerada.

- Modo de operação ilhado planejado: Neste modo de operação, a microrrede é desconectada da rede elétrica principal de forma intencional. Isto pode ocorrer devido a questões econômicas, pois dependendo do horário, as tarifas de consumo de energia da rede elétrica principal são elevadas e torna-se mais atrativo financeiramente trabalhar no modo ilhado. Ressaltar-se que neste modo de operação pode ocorrer um desequilíbrio entre geração e demanda de energia e, neste caso, o sistema de controle da microrrede realiza um procedimento de alívio de cargas, desconectando as cargas menos críticas.

- Modo de operação ilhado devido às faltas: Neste modo de operação, a microrrede se desconecta da rede elétrica principal devido a uma falta ocorrida externamente à microrrede. Neste caso, a rede principal pode sofrer um desligamento total ou parcial. Assim como no modo ilhado planejado, também pode ser necessário um procedimento de alívio de cargas.

A Figura 1 ilustra um diagrama esquemático de uma microrrede indicando os seus principais componentes, sendo eles definidos em seguida [1,5,6].

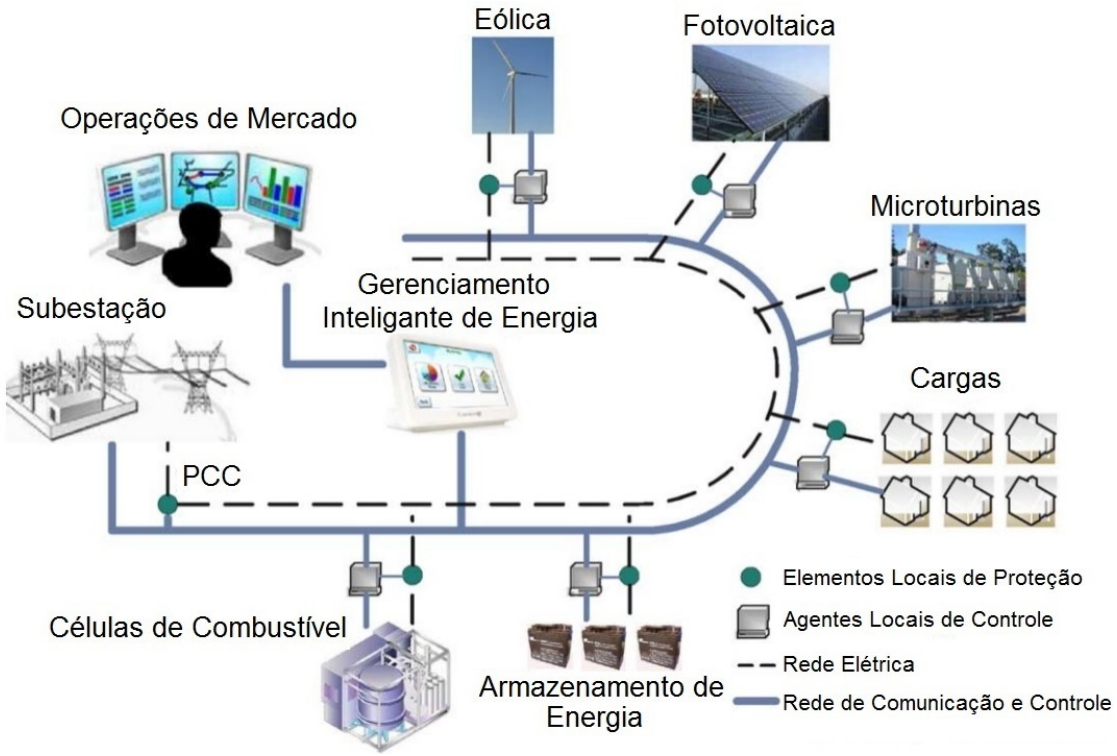


Figura 2.1 – Diagrama Esquemático de uma Microrrede [6].

- Ponto de Acoplamento Comum (PCC - *Point of Common Coupling*):

  É o ponto de conexão da microrrede com o sistema elétrico das concessionárias de energia. Neste ponto existe um equipamento de manobra instalado, podendo ser uma chave estática, disjuntor ou religador. A atuação destes equipamentos possibilita os modos de operação conectado e ilhado da microrrede.

- Sistema Central de Gerenciamento de Energia e Rede de Comunicação:

  Consistem num sistema de supervisão e controle dos equipamentos e cargas conectados na microrrede. Este sistema de controle pode ser centralizado ou descentralizado. Como os equipamentos estão todos interligados em rede, é possível um melhor gerenciamento da energia produzida na microrrede e a monitoração do atendimento às cargas. Também é possível dar os comandos relativos aos modos de operação conectado com a rede elétrica e ilhado.

- Elementos Locais de Proteção:

  São relés de proteção, interligados ao sistema de controle, que detectam faltas que ocorrem nas microrredes e geram sinais de comando para os respectivos disjuntores desconectarem os equipamentos afetados pelas mesmas.

- Agentes Locais de Controle:

  São os disjuntores, comandados pelos relés de proteção, assim como pelo sistema de controle através da rede de comunicação, que permitem a conexão e desconexão dos elementos na microrrede.

- Cargas:

  São os consumidores de energia conectados na microrrede, podendo os mesmos ser de natureza residencial, comercial ou industrial. Junto às cargas, normalmente existem medidores de energia inteligentes para monitoração da qualidade de energia recebida. Assim como os relés e disjuntores, estes medidores também são interligados com o sistema de controle da microrrede.

- Geração Distribuída de Energia (GD):

  São as fontes geradoras de energia conectadas à microrrede, podendo as mesmas serem provenientes de fontes renováveis de energia, como por exemplo, as energias fotovoltaica e eólica, ou também baseadas em combustíveis fósseis, como por exemplo os grupos motor-gerador à diesel.

- Sistemas de Armazenamento de Energia:

  Como algumas gerações distribuídas conectadas às microrredes possuem geração de energia intermitente, como por exemplo os sistemas fotovoltaicos e as turbinas eólicas, em muitos casos são necessários sistemas de armazenamento de energia. Estes sistemas armazenam a energia excedente gerada e alimentam as cargas durante os picos de consumo.

  Uma das formas mais comuns de armazenamento de energia são os bancos de baterias. Quando a microrrede opera no modo ilhado, estes sistemas são fundamentais para o equilíbrio entre a demanda da carga e a capacidade de geração, permitindo assim a continuidade de operação dos equipamentos conectados à microrrede.

Além dos componentes indicados na Figura 2.1, existem também os conversores de interface de energia. A Figura 2.2 ilustra outro diagrama esquemático de uma microrrede, de forma mais simplificada, mas indicando estes conversores.

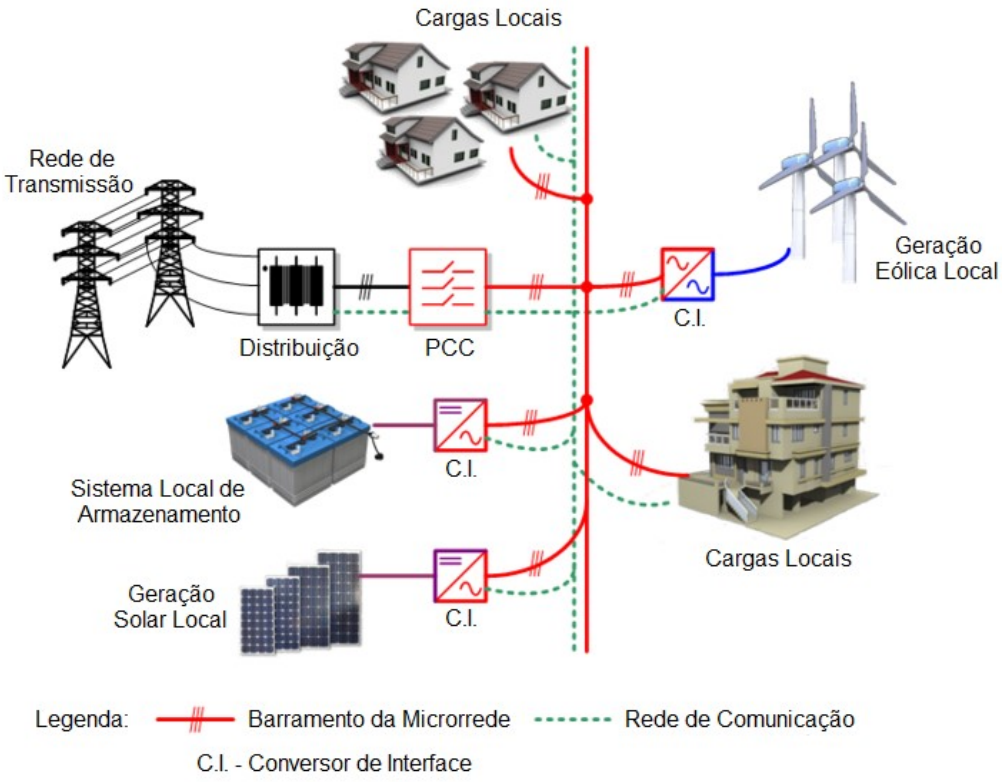


Figura 2.2 - Diagrama de uma Microrrede Indicando os Inversores de Frequência [7].

- Conversores de Interface de Energia:

  Também denominados Inversores de Frequência, são equipamentos que convertem a energia gerada em corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA), normalmente aplicados nos casos de geração fotovoltaica ou sistemas de armazenamento de energia. Os mesmos também podem funcionar adequando um sinal gerado em corrente alternada, proveniente de geradores eólicos, de forma a permitir um acoplamento elétrico sincronizado entre a microrrede e a rede elétrica principal proveniente das concessionárias de energia. Para esta situação, tanto o sinal de entrada, quanto o de saída, são em corrente alternada.

Os componentes principais das microrredes são abordados mais detalhadamente em suas respectivas sessões adiante neste capítulo.

2.3 Legislação e Normas Técnicas

2.3.1 Normas Internacionais

Como a tecnologia de Microrredes é relativamente nova, observa-se uma escassez de normas técnicas específicas sobre o tema. Contudo, no âmbito internacional o padrão IEEE-1547, que é voltado para gerações distribuídas, estabelece alguns parâmetros a serem seguidos para a conexão com a rede elétrica principal [8].

Este padrão, tendo como destaque seus submódulos 1547.2 e 1547.4, é direcionado para os profissionais que trabalharão tanto na execução de projetos e integração de sistemas, quanto na fabricação dos equipamentos necessários. O mesmo fornece conhecimentos e diretrizes técnicas importantes, dentre elas os controles de tensão e frequência para interligação das gerações distribuídas com a rede elétrica principal das concessionárias de energia [5,9,10].

A Tabela 2.1, presente no padrão IEEE-1547, indica as condições de diferença de frequência, tensão e ângulo de fase para fechamento dos disjuntores de conexão entre os recursos energéticos distribuídos (DER - *Distributed Energy Resource*) e a rede elétrica principal. Ou seja, são os limites de sincronização para a interligação síncrona. Segundo a norma, caso algum dos parâmetros esteja fora dos limites indicados, as gerações distribuídas não poderão ser conectadas [1,8,9].

Tabela 2.1 – Limites dos Parâmetros de Sincronização para a Interligação Síncrona [8,9].

Capacidade dos DERs (kVA)	Diferença de Frequência (Δf, Hz)	Diferença de Tensão (ΔV, %)	Diferença do Ângulo de Fase ($\Delta\phi$, Graus)
0 - 500	0,3	10	20
> 500 - 1500	0,2	5	15
> 1500 - 10.000	0,1	3	10

O padrão também aborda questões técnicas importantes relativas à qualidade de energia, monitoramento da rede e troca de informações, sistema de alívio de cargas e também os limites de freqüências transitórias de perturbações na rede.

A Tabela 2.2, presente no padrão IEEE-1547, indica os tempos máximos para desconexão das gerações distribuídas quando ocorrerem perturbações na rede com frequências ultrapassando os limites indicados. Este tempo de abertura refere-se ao tempo entre o início da condição anormal e a desconexão da rede.

Para DERs com potência abaixo de 30 kW, o tempo recomendado de abertura para situações de sobrefrequência e subfrequência é de 0,16 segundos. No caso de DERs com potência superior a 30 kW, o tempo para situações de sobrefrequência e subfrequências abaixo de 57,0 Hz é de 0,16 segundos. Contudo, para situações de subfrequências entre 59,8 e 57,0 Hz os tempos de abertura são ajustáveis pela equipe de campo e coordenados com a equipe de operação do sistema [1,8,9].

Tabela 2.2 – Resposta do Sistema de Interconexão para Frequências Anormais [8,9].

Tamanho do DER	Faixa de Frequência (Hz)	Tempo de Abertura (s)
≤ 30 kW	> 60,5	0,16
	< 59,3	0,16
> 30 kW	> 60,5	0,16
	< (59,8 a 57,0) Ajustável	Ajustável entre 0,16 e 300
	< 57,0	0,16

Ainda estudando o padrão IEEE-1547 e com foco na proteção de microrredes, são citados diversos tópicos relativos à seletividade e coordenação da proteção, que os engenheiros devem considerar na elaboração dos projetos e operação do sistema.

Considerando especificamente as correntes em condições de falta, como existe grande variação de seus valores em função das gerações distribuídas e também das diversas arquiteturas e condições de operação das microrredes, é citado que os conversores de potência utilizados podem ser parametrizados para limitar estas correntes entre 1,0 a 1,2 vezes seus respectivos valores nominais [5,8,9,10].

É importante ressaltar a grande importância em coordenar a proteção da microrrede com o sistema de proteção da rede elétrica principal, observando principalmente que esta normalmente utiliza fusíveis e religadores automáticos e que não prevê o fluxo de potência bidirecional causado pelas gerações distribuídas [5].

2.3.2 Normas Nacionais

Assim como no âmbito internacional, no Brasil também existe uma escassez de normas específicas para microrredes, contudo, já existem normas que tratam da geração distribuída de energia e de sua integração com o sistema elétrico principal.

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) elaborou a resolução normativa N° 482, que estabelece os critérios para as gerações distribuídas serem conectadas ao sistema elétrico principal e também cria um sistema de compensação da energia gerada. Segundo a norma, microgeração distribuída é uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utiliza cogeração ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras. Ainda segundo a norma, minigeração distribuída é uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW para fontes hídricas ou menor ou igual a 5 MW para cogeração ou para as demais fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras [11].

A norma também trata de um sistema de compensação de energia elétrica. O mesmo é definido como um sistema no qual a energia ativa injetada é cedida, por meio de empréstimo gratuito à distribuidora local, e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa. Para fins de compensação, a unidade consumidora que injeta energia na rede elétrica passa a ter um crédito que deve ser consumido num prazo de 60 meses. É importante ressaltar que a concessionária de energia sempre cobrará uma taxa mínima referente ao custo de disponibilidade, que é a demanda contratada, ou seja, mesmo a unidade consumidora tendo crédito a compensar, este valor mínimo sempre será cobrado [5,11].

Com relação à potência instalada da geração distribuída, a mesma é limitada à potência disponibilizada para a unidade consumidora onde a central geradora será conectada, sendo que, se o consumidor desejar instalar uma central geradora com potência superior ao limite estabelecido, o mesmo deve solicitar o aumento da potência disponibilizada, sendo neste caso dispensado o aumento da carga instalada [11].

Ainda segundo a resolução normativa, as distribuidoras devem adequar suas respectivas normas técnicas e sistemas comerciais para tratar do acesso de gerações distribuídas. Devem ser utilizados como referências os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST, as normas técnicas brasileiras e, de forma complementar, as normas internacionais [11,12].

O módulo 3 do PRODIST trata do acesso ao sistema de distribuição, estabelecendo os procedimentos e critérios técnicos e operacionais, requisitos de projeto para implantação de novas conexões, requisitos para operação, manutenção e segurança da conexão e diretrizes para elaboração de contrato de conexão. Além destes pontos, o módulo aborda especificamente o acesso das gerações distribuídas ao sistema elétrico. São descritos os procedimentos técnicos de solicitação de acesso e as responsabilidades de cada um dos envolvidos [5,12].

Com relação à proteção do sistema elétrico mediante a conexão de gerações distribuídas, constam no módulo 3 os requisitos mínimos necessários de acordo com a potência instalada, conforme indicados na Tabela 2.3 [12].

Tabela 2.3 – Requisitos Mínimos em Função da Potência Instalada [12].

Equipamento	Potência Instalada (P, kW)		
	P ≤ 75	75 < P ≤ 500	500 < P ≤ 5.000
Elemento de Desconexão	Sim	Sim	Sim
Elemento de Interrupção	Sim	Sim	Sim
Transformador de Acoplamento	Não	Sim	Sim
Proteção de Sub e Sobretensão	Sim	Sim	Sim
Proteção de Sub e Sobrefrequência	Sim	Sim	Sim
Proteção Contra Desequilíbrio de Corrente	Não	Não	Sim
Proteção Contra Desbalanço de Tensão	Não	Não	Sim
Sobrecorrente Direcional	Não	Sim	Sim
Sobrecorrente com Restrição de Tensão	Não	Não	Sim
Relé de Sincronismo	Sim	Sim	Sim
Anti-Ilhamento	Sim	Sim	Sim
Medição	Sistema de Medição Bidirecional	Medidor 4 Quadrantes	Medidor 4 Quadrantes

O elemento de desconexão indicado na Tabela 2.3 é definido como uma chave seccionadora visível e acessível pela concessionária de energia, de forma a permitir a desconexão da geração distribuída durante manutenção no sistema elétrico principal. Caso as gerações distribuídas se conectam a rede elétrica através de inversores, as proteções podem ser inseridas nos mesmos, sendo desnecessária a redundância de proteções. Já os elementos de interrupção são acionados de forma automática por proteção ou através de comando para gerações distribuídas. Estes elementos podem ser disjuntores ou religadores, por exemplo [12].

O transformador de acoplamento consiste em uma interface entre a unidade consumidora e rede de distribuição [12].

No caso de proteções contra sub e sobretensão e sub e sobrefrequência, não são necessários relés de proteção específicos, pois um sistema eletroeletrônico pode detectar estas anomalias e gerar um sinal de comando para atuar o elemento de interrupção. Da mesma forma, também não são necessários relés de sincronismo de forma específica, pois um sistema eletroeletrônico também pode realizar o sincronismo com a frequência da rede e gerar um sinal de atuação do elemento de interrupção de forma que a conexão com a rede ocorre somente após o sincronismo ter sido atingido [12].

Com relação ao sistema de medição bidirecional, o mesmo deve ser capaz de diferenciar a energia elétrica ativa injetada na rede, assim como a consumida [12].

Um ponto importante a se ressaltar, é a situação de operação ilhada, pois a proteção anti-ilhamento deve garantir a desconexão física entre a rede de distribuição e as instalações elétricas internas à unidade consumidora com geração distribuída, sendo proibida a conexão ao sistema da distribuidora durante a interrupção do fornecimento. Com isto, não é permitido fornecer energia para a rede principal caso a concessionária esteja fora de operação. Entretanto, segundo o PRODIST, as unidades consumidoras com geração distribuída podem operar em modo ilhado, desde que desconectadas fisicamente da rede de distribuição [5,12].

O PRODIST ainda cita os procedimentos de implementação e vistoria das instalações, requisitos para operação, manutenção e segurança da conexão, sistema de medição e os requisitos contratuais necessários [12].

2.4 Tecnologias de Geração Distribuída para Microrredes

As tecnologias de geração distribuída de energia são sistemas de pequena escala instalados nos clientes para um fornecimento local de energia elétrica. Isto causa uma alteração no modelo tradicional de geração e distribuição de energia, no qual a mesma é gerada em grandes usinas centralizadas, transmitida por longas distâncias através de linhas de transmissão de alta tensão, e posteriormente passa por subestações e um sistema local de distribuição das concessionárias de energia [2].

As gerações distribuídas também possibilitam um fornecimento de energia para locais remotos, onde não existem instalações de transmissão e distribuição de energia por questões econômicas. Para esta situação, os baixos custos e tempo de instalação tornam esta solução muito tratativa. Com isto, nos últimos anos ocorreu um crescimento de sua aplicação, principalmente no que concerne às fontes renováveis de energia, como os recursos de energia eólica e solar [2].

Pelo fato de serem recursos não poluentes e sustentáveis, existem diversas políticas governamentais que incentivam a sua utilização, o que aumentou ainda mais a sua aplicação. Contudo, estes recursos são dependentes de fatores climáticos, causando grandes alterações em sua capacidade de gerar energia. A solução para esta situação passa por uma maior integração destes recursos renováveis, a utilização de sistemas de armazenamento de energia e a utilização complementar de outras fontes de geração de energia que utilizem recursos não renováveis.

Esta aplicação conjunta de diversas tecnologias de geração distribuída em microrredes é um tema muito estudado na literatura. Na referência [13], com o objetivo de solucionar o problema de flutuação na geração das fontes renováveis que causam desvios na tensão e frequência da energia gerada, é proposta a sua utilização conjunta com geração através de motores a gás.

Os autores do artigo realizam uma análise considerando o consumo de energia de edifícios com escritórios e também residenciais e suas respectivas condições ótimas de operação das gerações distribuídas. Através de várias simulações é obtido um resultado eficiente na operação conjunta das fontes renováveis com os motores a gás compensando as oscilações.

Na referência [14], é considerada uma microrrede com geração fotovoltaica e sistema de armazenamento de energia instalados num edifício. É proposto também um sistema de controle e gerenciamento, resultando numa solução válida para integração e comunicação da microrrede com a rede principal de energia.

Assim como ocorre o crescimento da aplicação de fontes renováveis de energia para a geração distribuída, também ocorre o crescimento da aplicação dos sistemas de armazenamento de energia (ESS - *Energy Storage System*). Estes sistemas armazenam o excedente de energia gerada e, quando existe a ausência de vento para a geração eólica ou de radiação solar para a geração fotovoltaica, o sistema injeta a energia acumulada, mantendo em funcionamento as cargas da microrrede. Outra aplicação é armazenar a energia para atender as cargas considerando fatores econômicos, desconectando a microrrede do sistema principal nos horários de pico, onde o preço da energia é mais elevado, e alimentando localmente as cargas [1,5].

Da mesma forma que as tecnologias de geração distribuída, a aplicação dos sistemas de armazenamento de energia também é um tema muito estudado na literatura. Na referência [15], é apresentada uma aplicação de controle dos sistemas fotovoltaicos de uma microrrede, integrada de forma a operar no ponto de máxima potência. O trabalho cita que a energia excedente pode ser armazenada para ser utilizada durante condições transitórias de oscilação na geração. A aplicação de controle proposta é validada através de simulação e apresenta bons resultados no controle de operação no ponto de máxima transferência de potência.

Na referência [16], é abordado o tema da qualidade de energia em microrredes. É citado que, em algumas situações, quando são aplicados geradores síncronos, não são necessários sistemas de armazenamento de energia. Contudo, o trabalho aborda mais detalhadamente a aplicação dos sistemas de armazenamento com destaque para a confiabilidade ao fornecer backup durante as faltas. São realizadas simulações para estudo de caso e concluiu-se que o ESS é fundamental quando existe a necessidade de uma qualidade de energia superior para algumas cargas especificamente críticas, como por exemplo, instalações hospitalares.

Nos itens a seguir serão abordadas as principais tecnologias de geração distribuída de energia, assim como os principais sistemas de armazenamento.

2.4.1 Sistemas de Geração Distribuída de Energia

Conforme citado, as fontes distribuídas de energia podem ser de origem renovável, como as gerações eólica e fotovoltaica, ou também de origem não renovável. A seguir, serão citados os diversos tipos de geração distribuídas utilizados em microrredes, dando mais destaque para os sistemas eólicos e fotovoltaicos.

- Grupo Motor-Gerador à Diesel

  Para este tipo de geração, motores à diesel de combustão interna são conectados a geradores elétricos. Estes geradores podem ser síncronos ou também de indução. Este tipo de geração possui eficiência aproximada variando de 30% a 40% e normalmente é utilizado em sistemas de cogeração para indústrias, hospitais e centros comerciais [1,17].

- Célula Combustível

  Este tipo de geração produz energia elétrica a partir da energia química. Como o hidrogênio é o principal combustível utilizado e este método não possui etapas térmicas intermediárias, o mesmo é pouco poluente e possuiu uma eficiência energética de aproximadamente 50%. As células de combustível, por ser uma tecnologia relativamente nova, possuem um custo de produção ainda elevado. São utilizadas principalmente em áreas onde não tem atendimento da rede elétrica convencional, em sistemas de emergência e também em veículos elétricos e equipamentos portáteis. [1,17]

- Turbinas à Gás

  Este tipo de geração normalmente é utilizado em usinas termelétricas e podem ser de ciclo simples ou combinado. Nas usinas de ciclo simples é utilizada a energia térmica do vapor de água ou proveniente de outros gases quentes. O gás em alta pressão aciona uma turbina acoplada mecanicamente a um gerador que produz energia elétrica. No caso das usinas de ciclo combinado, também é utilizada a energia térmica proveniente dos gases de exaustão recuperados das turbinas a gás para acionamento da turbina a vapor, que está acoplada ao gerador de energia elétrica. Este tipo de geração possui eficiência aproximada variando entre 42% e 58% [1,18].

- Geração Geotérmica

  Este tipo de geração utiliza gases subterrâneos provenientes de áreas vulcânicas e gêiseres para acionamento de usinas termelétricas. A eficiência deste método de produção de energia é baixa, ficando entre 10% e 23%. Isto se deve ao fato de que o vapor geotérmico possuiu temperatura inferior a dos vapores gerados nas usinas termelétricas convencionais [1,5].

- Biomassa

  Este tipo de geração utiliza matéria orgânica não fóssil para produção de calor e posterior utilização térmica. A matéria orgânica pode ser origem vegetal ou animal. A eficiência deste método de produção de energia está entre 7% e 27% e o mesmo é muito utilizado em sistema de cogeração e aplicações em áreas remotas, onde não tem atendimento da rede elétrica convencional [1,5].

- Pequena Central Hidrelétrica (PCH)

  São usinas hidrelétricas de porte reduzido que não necessitam de grandes reservatórios de água. Normalmente estas usinas ficam localizadas mais próximas dos centros urbanos (cargas) do que as grandes usinas convencionais. A eficiência deste tipo de geração está entre 70% e 90%. Estas usinas possuem faixas de classificação de acordo com a capacidade de geração, conforme a Tabela 2.4 [1,19]:

Tabela 2.4 – Classificação por Faixa de Geração de Usinas Hidrelétricas [19].

Tipo de Geração Hidrelétrica	Faixa
Pico	0 kW – 5 kW
Micro	5 kW – 100 kW
Mini	100 kW – 1 MW
Pequena	1 MW – 10 MW
Média	10 MW – 100 MW
Grande	100 MW +

No Brasil, conforme o Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas - CERPCH, são consideradas PCHs as usinas que trabalham na faixa de geração entre 1 MW a 30 MW e que possuam reservatórios de água de área inferior a 3 km^2 [20].

- Geração Eólica

  Para este tipo de geração são utilizadas turbinas eólicas ou aerogeradores, que absorvem a energia cinética do vento através de um rotor aerodinâmico e convertem a potência mecânica em potência elétrica. Cada modelo de turbina eólica possuiu sua curva de eficiência. Esta pode variar conforme a velocidade do vento, mas de forma geral, o valor médio não ultrapassa 60% [1].

  As Figuras 2.3 e 2.4 apresentam respectivamente um diagrama esquemático e uma perspectiva em 3D de turbinas eólicas, indicando seus componentes:

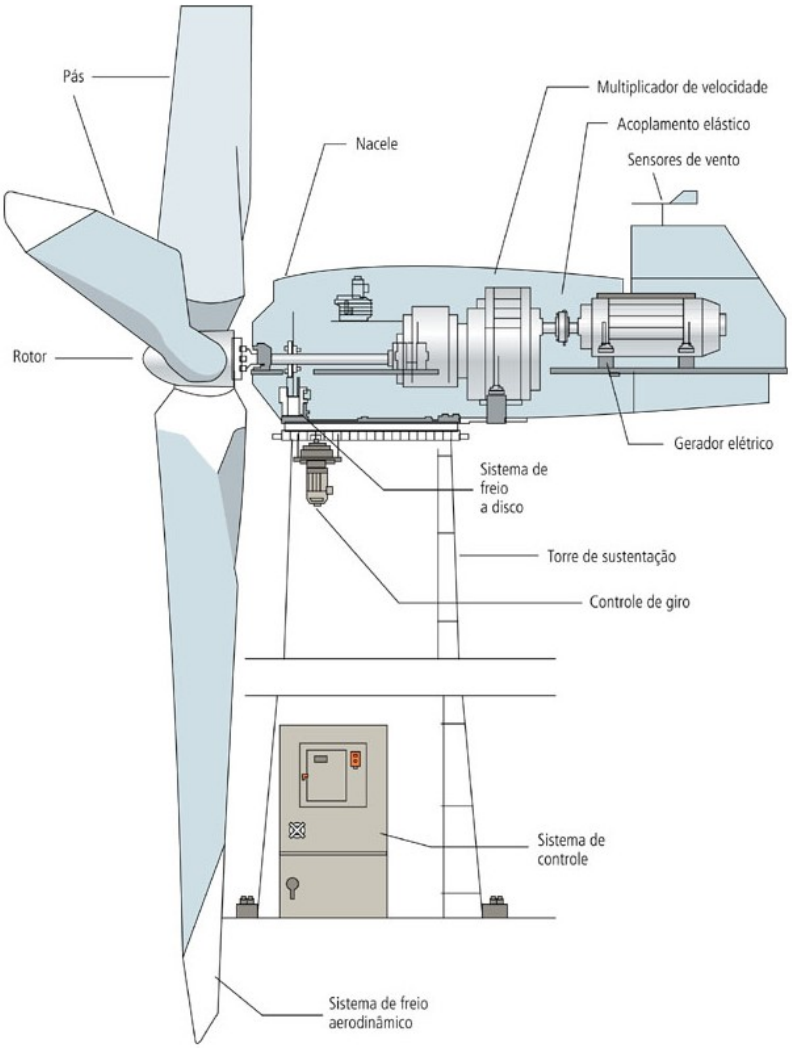


Figura 2.3 – Diagrama Esquemático de uma Turbina Eólica [21].

As turbinas eólicas são divididas em 3 partes: 1 - Rotor, onde são acopladas as pás ou hélices; 2 - Torre de suporte, que podem ultrapassar 100 metros de altura; 3 - Nacele, onde se instalam o gerador e seus principais dispositivos.

Além destes componentes, as turbinas eólicas possuem um sensor de direção, que tem como objetivo girar as hélices no sentido de captar melhor o vento, e um grupo de engrenagens, denominadas multiplicador de velocidade, que faz a interligação mecânica entre o conjunto de giro das hélices e o gerador elétrico. Também existe um sistema de freio, que é utilizado para controlar o giro das hélices de forma que elas não girem numa velocidade acima do limite de segurança especificado, o que pode ocorrer no caso de uma tempestade.

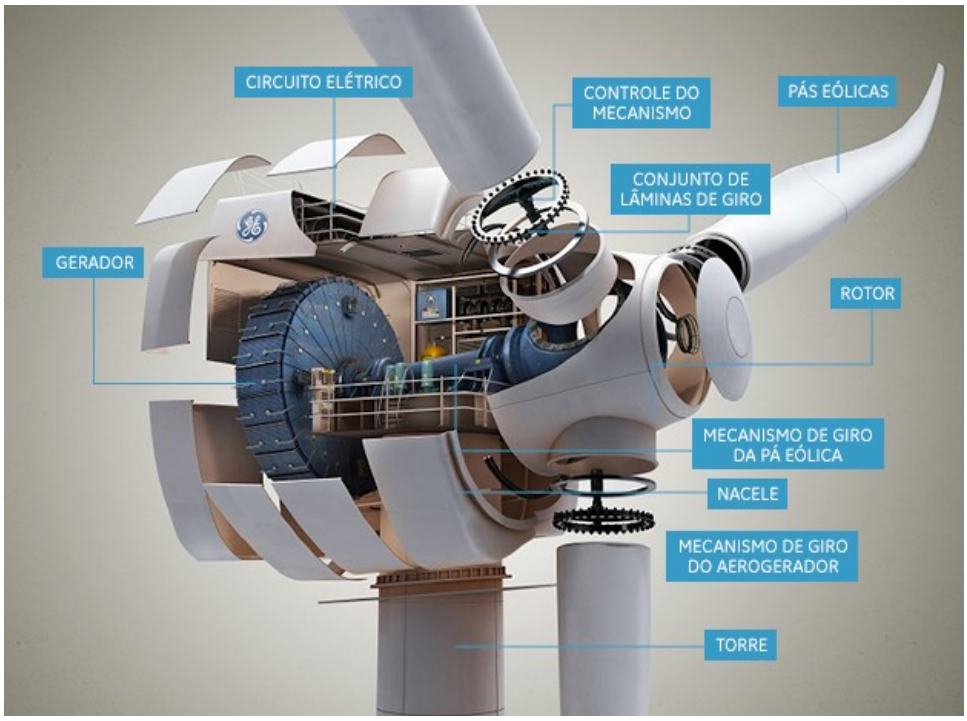


Figura 2.4 – Perspectiva em 3D de uma Turbina Eólica [22].

Assim como na geração fotovoltaica, a geração eólica depende das condições climáticas, no caso a velocidade do vento, para geração de energia. Esta variação do vento resulta em uma das principais dificuldades de integração das turbinas com os sistemas das concessionárias de energia, pois causa variações de tensão e frequência na energia elétrica gerada. Entretanto, os avanços tecnológicos nos inversores de frequência que fazem a interface com o sistema elétrico praticamente eliminaram estes impactos [1].

Atualmente, no Brasil e em diversos outros países, existe uma forte expansão na instalação de torres com turbinas formando parques eólicos. A Figura 2.5 apresenta o parque eólico de Osório, instalado no Rio Grande do Sul.

Figura 2.5 – Parque Eólico de Osório [23].

Existem também aerogeradores de pequeno porte que podem ser utilizados em aplicações residenciais, centros comerciais, indústrias e atividades rurais. A Figura 2.6 apresenta um modelo de aerogerador de pequeno porte.

Figura 2.6 – Aerogerador de Pequeno Porte [24].

- Geração Fotovoltaica

  Para este tipo de geração, a energia elétrica é obtida através do efeito fotovoltaico, que gera corrente elétrica a partir da radiação solar incidente nos painéis. As células fotovoltaicas que compõe os painéis são fabricadas de material semicondutor, normalmente silício, e dopadas positivamente (P) e negativamente (N) formando uma junção PN. Quando a radiação solar incide nas células, ocorre a geração de corrente contínua, que passa por inversores de frequência realizando assim a conversão para corrente alternada [1,25].

  A Figura 2.7 apresenta um painel fotovoltaico e seus componentes.

Figura 2.7 – Composição de Painéis Fotovoltaicos [26].

Nos últimos anos, ocorreu um expressivo crescimento na instalação de gerações distribuídas utilizando painéis fotovoltaicos. Os mesmos têm sido amplamente utilizados para aplicações residenciais, incluindo condomínios, complexos indústrias, centros comerciais, universidades e inclusive estádios de futebol.

A Figura 2.8 apresenta um exemplo de aplicação residencial e indicando seus principais componentes, sendo eles: 1 - Painéis Fotovoltaicos; 2 - Inversor de Frequência; 3 - Quadro de Energia; 4 – Cargas; 5 - Medidor Bidirecional de Energia Elétrica. Este medidor bidirecional mede a energia proveniente da concessionária consumida pela residência e também a energia que a geração distribuída injeta na rede elétrica principal [27].

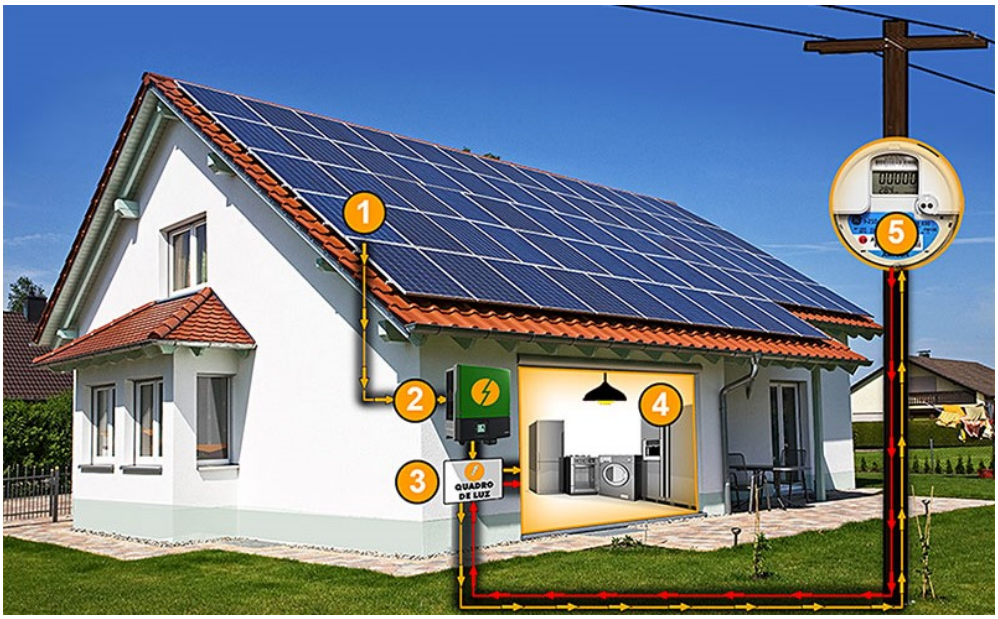


Figura 2.8 – Aplicação Residencial de Painéis Fotovoltaicos [27].

A Figura 2.9 apresenta a aplicação de painéis fotovoltaicos no estádio do Mineirão, localizando em Belo Horizonte (MG).

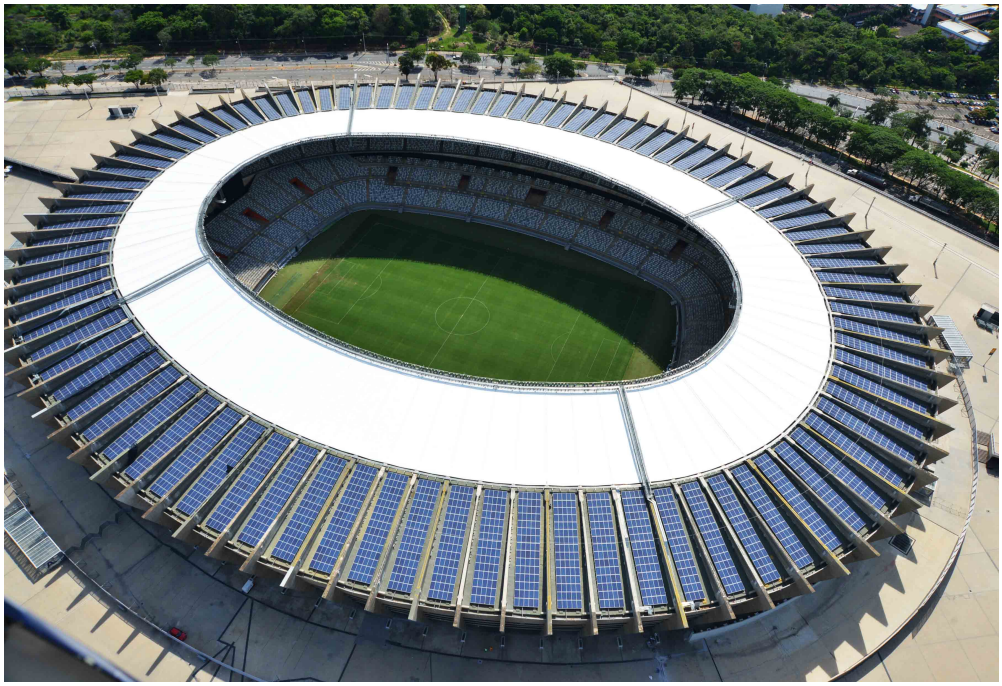


Figura 2.9 – Aplicação de Painéis Fotovoltaicos em Estádios [28].

As Figuras 2.10 e 2.11 apresentam respectivamente uma aplicação industrial de painéis fotovoltaicos em Gelsenkirchen na Alemanha e no Centro Universitário da Univates, em Lajeado (RS).

Figura 2.10 – Aplicação Industrial de Painéis Fotovoltaicos [29].

Figura 2.11 – Aplicação de Painéis Fotovoltaicos em Universidades [30].

2.4.2 Sistemas de Armazenamento de Energia

Conforme citado, devido ao comportamento intermitente das gerações eólica e fotovoltaica, em algumas situações é necessária a utilização de sistemas de armazenamento de energia, de forma a manter as cargas em operação. Existem diversas tecnologias de armazenamento, como supercapacitores, células de combustível, volantes de inércia (*flywheels*) e bancos de baterias, conforme segue:

- Supercapacitores

  Consistem num tipo de condensador eletroquímico que apresenta um ótimo resultado na capacidade de armazenamento de energia elétrica mantendo um tamanho reduzido em relação ao capacitor tradicional [31]. Sua composição física é bastante similar à bateria, contudo, não ocorre processo químico no ciclo de carga e descarga, evitando assim o desgaste dos eletrodos [32].

- Células de Combustível

  Consistem em dispositivos eletroquímicos que possuem a capacidade de converter a energia química presente num combustível rico em hidrogênio em energia elétrica, sem a ocorrência de combustão. É uma tecnologia promissora, possuindo eficiência entre 40% e 60%. A sua interface com as microrredes normalmente são realizadas com inversores de frequência [33].

- Volantes de Inércia (*Flywheels*)

  São dispositivos que armazenam a energia através da aceleração de um volante a uma elevada velocidade. Possuem alto nível de disponibilidade e tem a capacidade de operar em condições críticas, como altas temperaturas. São uma opção para suporte de cargas críticas, pois possuem resposta mais rápida em relação às soluções que utilizam tecnologia eletroquímica [1,34].

- Bancos de Baterias

  Armazenam a energia através de um grupo de células eletroquímicas. Podem ser conectados de forma rápida, sendo muito utilizados em centros de cargas críticas. Em função das cargas conectadas, o período de fornecimento de energia pode ser curto. As baterias mais utilizadas são as do tipo enxofre de sódio e de chumbo ácido, devido à estabilidade e baixo custo [1,5].

2.5 Microrredes para Melhoria do Desempenho do Sistema Elétrico

Dentre os principais benefícios na implementação de microrredes destacam-se a redução de emissão de poluentes devido à utilização de fontes renováveis, a redução de custos de instalação de infraestrutura e linhas de transmissão, uma vez que as GDs estão próximas das cargas, a melhoria na qualidade de energia, maior resiliência e o aumento da confiabilidade operacional do sistema.

Na referência [35] são estudados os benefícios da implementação de uma microrrede comunitária. É citado que é uma tendência entre os consumidores residenciais e comerciais buscarem uma melhor confiabilidade e qualidade de energia e também que o sistema de fornecimento de energia deve ser mais robusto, de forma a se manter sempre operacional para atividades vitais como os transportes, serviços de emergência e as instalações hospitalares.

Também são estudados os benefícios da implementação das microrredes relativos à segurança, resiliência, confiabilidade, eficiência energética e qualidade de energia. Os autores finalizam abordando assuntos relativos à implementação, sistema de controle e arquitetura da instalação, onde são citados os principais componentes, incluindo os dispositivos de proteção [35].

Na referência [36] é dado mais enfoque para a qualidade de energia. É citado que a eliminação de distúrbios de curta duração na rede através do recurso de funcionamento no modo ilhado é uma característica e objetivo fundamental para as microrredes. Entretanto, segundo os autores, esta possibilidade requer um aumento no custo financeiro da implantação, pois necessita de maior infraestrutura de armazenamento de energia. Os autores ainda abordam as principais soluções referentes à qualidade de energia e as diferentes arquiteturas de instalação para as tecnologias existentes, analisando questões de desempenho e custo. Os autores finalizam citando que um dos obstáculos que as microrredes enfrentam quando comparadas com as tecnologias existentes, é de alcançar um nível similar de confiabilidade, tempos de resposta e também de custo de instalação.

A seguir serão abordados de forma mais detalhada os temas Qualidade de Energia, Confiabilidade e Resiliência relativos à instalação de microrredes:

2.5.1 Qualidade de Energia

Qualidade de Energia pode ser definida como a capacidade do sistema elétrico manter a forma de onda de tensão e corrente, assim como a frequência de operação dentro de certos limites, de forma a não prejudicar o funcionamento dos equipamentos conectados no sistema. Como a sensibilidade é diferente entre diversos equipamentos, o que pode ser considerado uma qualidade de energia aceitável para um, pode ser baixa para outro. Desta forma, devem ser utilizados como referências para a qualidade de energia o módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST [37,38].

Nas últimas décadas, devido ao aumento na utilização de equipamentos eletrônicos sensíveis às variações de tensão, os consumidores têm necessitado cada vez mais de energia elétrica com qualidade. Para esta situação, as microrredes são uma solução eficiente e rápida, pois permitem um controle local de frequência, tensão, carga e possuem também um ESS que entra rapidamente em operação na situação de falta na rede principal e consequente operação no modo ilhado [2].

Na literatura estão presentes diversos estudos e propostas tecnológicas relativas à qualidade de energia voltada para microrredes. Nas referências [39,40] é proposto um compensador de qualidade de energia que considera também o fluxo de corrente na interface entre a microrrede e o sistema elétrico principal.

Conforme os autores, tensões desequilibradas na rede, geralmente causadas por falta desequilibrada no sistema ou cargas conectadas, é um ponto preocupante relativo à interface entre a microrrede e a rede principal, pois causam problemas no desempenho geral do sistema. Caso o desequilíbrio seja elevado, o disjuntor que conecta a microrrede à rede principal abrirá, e a microrrede passará a operar no modo ilhado. Entretanto, caso o desequilíbrio de tensão seja pequeno, o disjuntor permanecerá fechado, resultando em tensões desbalanceadas no PCC [39,40].

Uma forma de solucionar este problema é reequilibrar as tensões de carga da microrrede utilizando técnicas de regulação de tensão. Contudo, se somente as tensões da microrrede estiverem reguladas, elevadas correntes desequilibradas podem fluir entre a rede principal e a microrrede devido à baixa impedância de interligação, sobrecarregando os inversores e demais componentes da microrrede.

Esta situação fica ainda mais séria durante afundamentos de tensão da rede elétrica principal, pois gera elevada diferença de tensão entre a rede principal e microrrede, fazendo com que elevadas correntes de falta fluam ao longo do alimentador.

Desta forma, visando controlar as tensões das cargas sensíveis na microrrede, assim como as correntes de linha, é proposto um compensador de qualidade de energia, conforme apresentado na Figura 2.12.

A solução consiste em dois inversores, sendo o primeiro em série e o segundo em shunt instalados individualmente em cada GD da microrrede. Em ambos inversores, as componentes de sequência positiva, negativa e zero são controladas para compensar os efeitos causados pelos desvios de tensão da rede elétrica principal. O inversor em série é controlado para injetar correntes em série para equilibrar as correntes da linha, enquanto o inversor shunt é controlado para assegurar tensões equilibradas dentro da microrrede e fazer o sincronismo com a rede principal no instante da conexão. Também é proposto um algoritmo de limitação de corrente para proteger a microrrede das correntes de falta durante afundamentos de tensão da rede elétrica. A viabilidade e a eficácia do compensador proposto foram verificadas através de simulação e resultados experimentais [39,40].

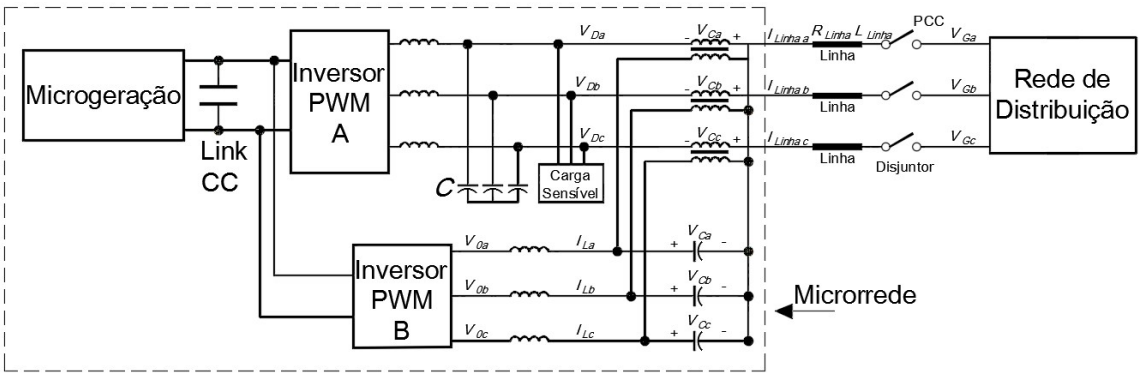


Figura 2.12 – Compensador de Qualidade de Energia de Interface para Microrredes [39].

Existem também diversos estudos presentes na literatura relativos à qualidade de energia para microrredes monofásicas, modelagem de algoritmos de controle preditivo, filtros seletivos de frequências e filtragem de harmônicos. Estes temas não serão abordados, pois não são os objetivos alvos deste trabalho.

2.5.2 Confiabilidade

Confiabilidade pode ser definida como a capacidade de um dispositivo ou sistema executar as suas funções durante um determinado período de tempo e sob condições de operação previamente estabelecidas. Esta definição é fundamentada em termos de probabilidade, desempenho, tempo e condições de operação [41].

Considerando os sistemas elétricos, a confiabilidade trata do número esperado de faltas que ocorrerão em um determinado período, tempo médio de duração das faltas e o tempo médio entre a ocorrência das mesmas. Uma forma de medição da confiabilidade pode ser realizada quantitativamente através de probabilidade, onde não é determinado se um sistema é confiável ou não, e sim o quanto é confiável, ou seja, o grau de confiabilidade. Este grau de confiabilidade relaciona-se a dados experimentais obtidos em testes de laboratório e também durante a operação dos equipamentos do sistema elétrico. Com isto, existem métodos que podem ser adotados nas etapas de projeto, fabricação e operação dos equipamentos de forma a assegurar maior segurança, economia e eficiência [41].

Considerando o estudo sobre microrredes, um dos principais benefícios da instalação das mesmas é o aumento da confiabilidade no fornecimento de energia. Situações de causas naturais, como tempestades, terremotos e descargas atmosféricas podem afetar a infraestrutura de transmissão e distribuição de energia proveniente das concessionárias, afetando diretamente a confiabilidade do sistema. Em algumas destas situações inclusive, os tempos de interrupção do fornecimento de energia tendem a ser elevados. Com isto, a instalação de DERs próximos aos consumidores melhora bastante os níveis de confiabilidade, pois diminuiu a probabilidade de ocorrência destes fatores [2].

Outro ponto a se considerar é a possibilidade das microrredes operarem no modo ilhado e também permitirem um alívio de cargas através de um sistema de controle centralizado. No caso da operação no modo ilhado, é necessário um maior investimento em ESS, contudo o mesmo pode ser dimensionado para atender somente as cargas mais críticas. Neste caso, em situação de falta na rede elétrica principal, o sistema de alívio de cargas desliga as cargas menos críticas, mantendo em operação as cargas principais da microrrede, aumentando a confiabilidade.

Na literatura estão presentes diversas publicações propondo algoritmos para cálculo da confiabilidade em microrredes. Na referência [42] consta uma modelagem de cálculo de confiabilidade utilizando a simulação de Monte Carlo. Para o estudo de caso proposto no artigo, a microrrede possuiu um sistema de armazenamento de energia assim como fontes renováveis que funcionam de forma intermitente em função das condições climáticas.

Segundo os autores, é proposto o cálculo da confiabilidade do suprimento de energia utilizando quatro índices: a expectativa anual de horas sem fornecimento de energia (horas/ano); a expectativa anual de energia não fornecida (kWh/ano); o custo total da perda pelo não fornecimento de energia por unidade consumidora; a soma do déficit de energia da microrrede comprada da rede elétrica principal. Desta forma, é proposto um algoritmo conforme a Figura 2.13 [42].

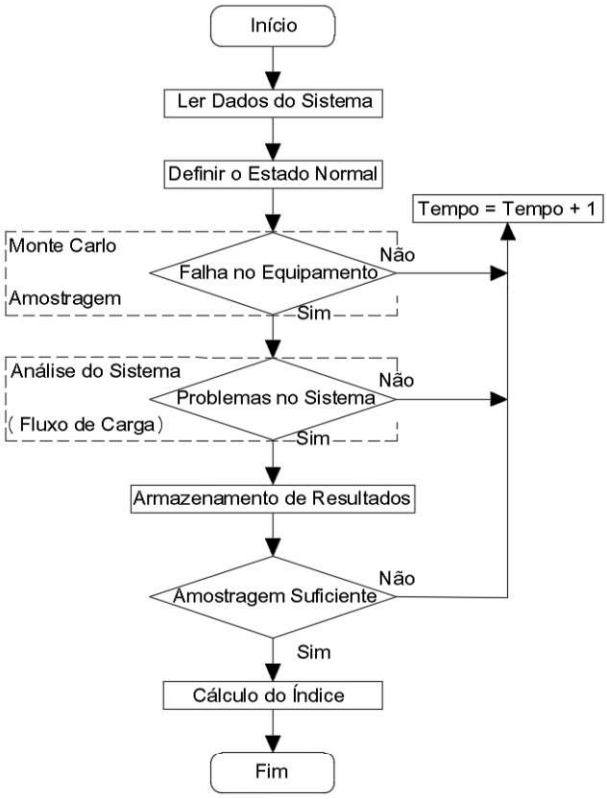


Figura 2.13 – Fluxograma de Avaliação da Confiabilidade do Suprimento para Microrredes [42].

Na primeira etapa o algoritmo é inicializado com o estado do sistema, depois são amostradas as condições de falta que refletem as taxas de falha de todos os componentes da microrrede. Caso ocorra falha em algum equipamento, é verificado se ocorrerá uma contingência no sistema através da análise do fluxo de carga [42].

Quando ocorrer uma contingência, o sistema tenta solucioná-la através de uma operação de emergência. Se a contingência não puder ser solucionada, é localizada a região onde ocorre a interrupção do fornecimento e a quantidade de fornecimento de energia perdida. O algoritmo repete a simulação de falha até o nível de precisão necessário e então calcula o índice de confiabilidade como média anual [42].

Além do artigo citado, diversas outras metodologias para estudo e cálculo do índice de confiabilidade em microrredes utilizando algoritmos recursivos, técnicas probabilísticas, e também algoritmos genéticos podem ser encontradas na literatura.

2.5.3 Resiliência

Resiliência pode ser definida como a capacidade do sistema de energia elétrica resistir a eventos de baixa probabilidade e de grande impacto, assegurando o menor tempo possível de interrupção do fornecimento de energia e retornando de forma rápida ao estado normal de operação. Estes eventos de baixa probabilidade podem ser eventos naturais extremos, como furações, terremotos ou inundações. Nestas situações, componentes vitais do sistema elétrico, como instalações de geração, linhas de transmissão e distribuição podem ser severamente danificadas, o que pode interromper o fornecimento de energia por um longo período de tempo [2,43].

A implantação de microrredes é uma solução viável para minimizar estes efeitos e aumentar a resiliência do sistema elétrico. Isto se deve ao fato das mesmas possibilitarem o fornecimento de energia às cargas locais mesmo quando o sistema elétrico principal não está disponível, devido a danos em sua infraestrutura.

Na referência [43] é proposta uma modelagem de planejamento operacional de microrredes visando a resiliência. São consideradas incertezas na carga, geração e tempo de duração da interrupção do fornecimento da rede elétrica.

Na referência [44], são estudadas implantações de microrredes em condomínios residenciais na região da Florida, nos Estados Unidos, como uma forma de garantir o fornecimento de energia em situações de desastres naturais.

Com isto, o aumento da resiliência é um ponto complementar ao aumento da confiabilidade e da qualidade da energia quando são implantadas as microrredes.

2.6 Operação e Controle de Microrredes

Microrredes possuem dois modos de operação, conectado e ilhado. No modo conectado ocorre um fluxo de potência bidirecional com o sistema elétrico principal e no modo ilhado as microrredes funcionam de forma autônoma. Devido a estas características e também pela presença de gerações distribuídas que podem utilizar conversores eletrônicos de potência (inversores de frequência), em ambos os modos de operação, assim como no chaveamento entre eles, existem questões técnicas relativas à operação e controle a serem resolvidas, de modo a se obter uma operação eficiente em todas as situações [5].

2.6.1 Controle e Gerenciamento de Energia

As principais funções do sistema de controle para uma microrrede são a regulação da tensão e frequência nos dois modos de operação, coordenação das DERs para um adequado compartilhamento das cargas, sincronização e controle do fluxo de potência entre a microrrede e o sistema elétrico principal quando ocorrer a conexão, e a otimização dos custos operacionais [45].

De forma a executar estas funções, existem diversas publicações na literatura que propõem sistemas de controle com estrutura hierárquica para microrredes. Os mesmos são compostos por 3 níveis, sendo eles: Controle Primário, Controle Secundário e Controle Terciário [45,46].

- Controle Primário: Mantém a estabilidade da tensão e frequência na operação no modo ilhado e estabelece o controle de compartilhamento de cargas para as DERs, evitando a circulação de correntes indesejadas. Este nível inclui hardware nível-zero que compreende as malhas de controles internos dos DERs.

- Controle Secundário: Compensa os desvios de tensão e frequência causados pela operação do controle primário.

- Controle Terciário: Gerencia o fluxo de potência entre a microrrede e o sistema elétrico principal considerando aspectos econômicos, de forma a se obter uma operação economicamente otimizada.

A Figura 2.14 apresenta um diagrama com os níveis de controle hierárquicos para uma microrrede, indicando em cada bloco as respectivas funções principais [45].

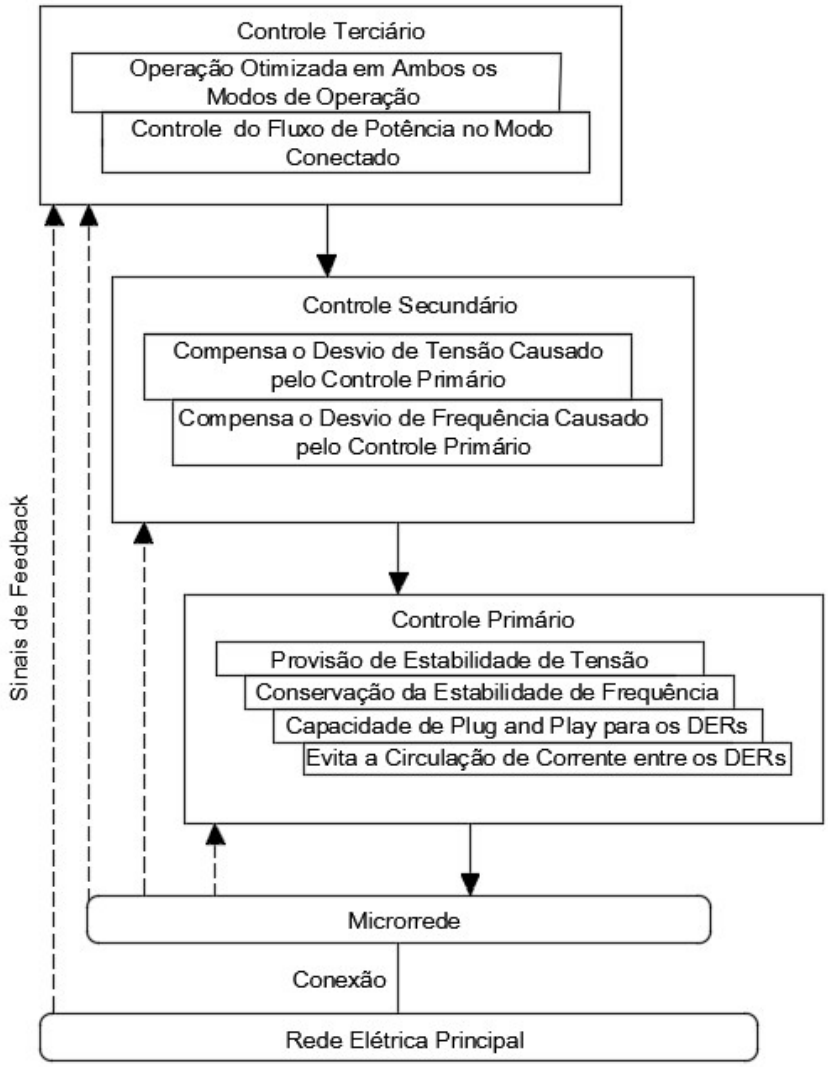


Figura 2.14 – Níveis de Controle Hierárquico para Microrredes [45].

Também podem ser verificados nas referências [45,46] diversos diagramas de blocos e equacionamentos matemáticos do funcionamento das malhas internas de controle de tensão, frequência e inclusive das potência ativa e reativa.

Na referência [47] é realizado um estudo sobre o controle dos conversores de potência. Este controle também é realizado de forma hierárquica com 3 níveis, onde são apresentados diagramas blocos e respectivas equações matemáticas para os modos de operação dos conversores. Os autores abordam também a sincronização dos conversores da microrrede com o sistema elétrico principal.

2.6.2 Arquiteturas de Controle

As arquiteturas de controle mais utilizadas em microrredes são a centralizada e a descentralizada, sendo que cada uma possui suas particularidades.

A arquitetura de controle centralizada consiste em um controlador central onde são inseridas todas as informações relevantes de cada GD, bem como as informações relativas a um sistema de previsão de geração de energia em função das condições climáticas, como a velocidade do vento e a incidência de radiação solar. Com isto, o Sistema de Gerenciamento de Energia (EMS - *Energy Management System*) toma as decisões relativas a todas as GDs e o ESS, de acordo com os objetivos e restrições operacionais. Este tipo de arquitetura possui vantagens relativas a procedimentos padronizados e facilidade na implementação [48].

Na arquitetura de controle descentralizada, cada GD tem seu próprio controlador, os quais possuem objetivos e funções operacionais próprias. Considerando que a quantidade de dados de comunicação entre os componentes da microrrede e um controlador centralizado aumenta conforme o tamanho da microrrede, requerendo uma maior banda de comunicação, o controle descentralizado possuiu vantagens ao reduzir esta quantidade de dados de comunicação e requerer uma menor banda.

O controle descentralizado pode também simplificar algumas restrições operacionais, reduzindo as mesmas a subproblemas resolvidos localmente em cada componente da microrrede [2,48].

Uma abordagem de implementação de controle descentralizado é a aplicação de Sistemas Multiagente (MAS - *Multi-Agente Systems*). Estes sistemas compõem uma subárea da inteligência artificial e concentram-se no estudo de agentes autônomos que possuem capacidades, que definem sua competência, objetivos, e a autonomia para utilizar suas capacidades a fim de alcançar seus objetivos. Nesta abordagem, cada elemento passível de controle da microrrede possui agentes associados, onde a comunicação e coordenação de controle são geridas pela teoria dos multiagentes.

Na referência [49] é proposto um controle hierárquico utilizando multiagentes. São propostos 5 tipos de agentes na arquitetura, onde este sistema coordena a operação das GDs e cargas nos modos conectado e ilhado.

2.6.3 Controles de Tensão e Frequência

Nas redes elétricas, a tensão e a frequência de operação são estabilizadas através de uma combinação da inércia rotacional dos geradores síncronos na rede principal e um algoritmo de controle que atua na velocidade de rotação dos mesmos [50].

Quando são instaladas microrredes com GDs provenientes de sistemas fotovoltaicos, por exemplo, ocorre uma substituição de parte da geração síncrona, causando variações de frequência que podem resultar numa rede instável. Na referência [50] é proposta a inclusão de inércia rotacional nas GDs para controle e estabilização da frequência de operação. Isto é realizado através de um armazenamento de energia de curto prazo combinado com um mecanismo de controle para os conversores de potência. Com isto, uma GD fotovoltaica pode se comportar como um gerador síncrono virtual durante pequenos intervalos de tempo, de forma a permitir um melhor controle da frequência de operação da microrrede.

Na referência [51] também é apresentado um estudo sobre controle de tensão e frequência em microrredes. O foco é a operação no modo ilhado de uma microrrede com geração fotovoltaica e banco de baterias. Para esta situação, o banco de baterias é o principal responsável pelo controle da tensão e frequência, pois possui resposta operacional mais rápida quando a microrrede é desconectada da rede principal. O artigo apresenta diversas simulações operacionais que indicam a interdependência entre a tensão e potência ativa e a frequência e potência reativa.

2.6.4 Microrredes Funcionando no Modo Ilhado

Uma das características fundamentais de uma microrrede é sua capacidade de operar no modo ilhado, se desconectando da rede elétrica principal. Este modo de operação pode ser executado com objetivos econômicos ou também de confiabilidade de fornecimento de energia. Com relação aos objetivos econômicos, dependendo da tarifa de energia no horário de pico, pode ser interessante operar no modo ilhado para atendimento das cargas através das GDs locais. Com relação à confiabilidade, quando ocorrem distúrbios ou faltas na rede elétrica principal, a microrrede se desconecta e opera no modo ilhado, mantendo um fornecimento de energia confiável e ininterrupto [2].

Para ambas as situações, o sistema de controle da microrrede mantém a frequência e tensão dentro de limites operacionais e realiza a sincronização com a rede elétrica principal quando ocorre a reconexão.

Como este modo de operação é de grande importância para uma microrrede, existem diversas publicações na literatura tratando do assunto. Na referência [52], são descritas estratégias de controle utilizadas nos modos conectado e ilhado. O artigo tem foco nos algoritmos de controle relativos à sincronização e controles de tensão e frequência operacionais. São descritos algoritmos de identificação de ilhamento intencional devido a distúrbios ocorridos no sistema elétrico principal, assim como a Malha de Captura de Fase (PLL - *Phase Locked Loop*) que amostra o sinal da rede principal e determina a frequência e ângulo de fase de referência para os controladores da microrrede realizarem o sincronismo.

Na referência [53] são estudadas situações de ilhamento de uma microrrede que possuiu GDs provenientes de um grupo motor-gerador (máquina síncrona) e também de uma interface com inversor de frequência, que pode ser oriunda de sistemas fotovoltaicos, por exemplo. O artigo apresenta um estudo de caso com simulações de ilhamento intencional e também a partir de distúrbios na rede elétrica principal. Conforme os autores, uma estratégia de controle adequada para a GD que possuiu interface com inversor de frequência, através da adequada parametrização do mesmo, permite assegurar maior estabilidade de tensão nos barramentos internos da microrrede durante a alteração dos modos de operação.

Outro ponto a ser observado em uma microrrede operando no modo ilhado é o sistema de alívio de cargas. Conforme citado anteriormente na definição de microrredes, as mesmas devem ser capazes de suprir as cargas críticas quando operando no modo ilhado. Com isto, é necessário um algoritmo de gerenciamento de cargas dentro do sistema de controle da microrrede.

Na referência [54] é abordado um algoritmo inteligente de alívio de cargas, que identifica quando a geração de energia é inferior à demanda necessária e vai sistematicamente desligando as cargas menos críticas da microrrede. Desta forma, as adequadas condições operacionais relativas à tensão e frequência da microrrede podem ser mantidas durante a operação no modo ilhado.

2.7 Proteção de Microrredes

Devido às características particulares das microrredes, o seu sistema de proteção requer cuidados específicos relativos ao funcionamento nos modos conectado e ilhado. Alguns pontos devem ser observados, como a utilização de conversores eletrônicos de potência, que possuem uma característica de limitar eletronicamente os valores das correntes em caso de falta, e também o fluxo de potência bidirecional quando a microrrede opera no modo conectado.

Além dos pontos citados, também é necessário analisar os impactos da conexão das microrredes na proteção do sistema elétrico principal.

Com o objetivo de se obter maior entendimento destas questões, serão analisadas as características da proteção do sistema elétrico principal e os impactos da conexão das microrredes no mesmo. Em seguida, serão estudadas algumas metodologias propostas na literatura para proteção das microrredes.

2.7.1 Características da Proteção do Sistema Elétrico

Considerando um sistema elétrico tradicional, a energia é gerada em pontos distantes dos consumidores, transmitida através de Linhas de Transmissão (LT) até subestações de distribuição e depois segue por meio de alimentadores até os consumidores finais.

Nesta arquitetura, são utilizados diversos equipamentos de proteção para assegurar a integridade do sistema elétrico, onde se destacam os relés de proteção, chaves fusíveis e religadores. Estes equipamentos têm a finalidade de detectar a ocorrência de faltas no sistema elétrico e desconectar as respectivas partes afetadas. De forma a assegurar a correta identificação destas faltas, assim como uma atuação no menor tempo possível, os equipamentos do sistema de proteção possuem as seguintes características [5,55]:

- Sensibilidade: É a capacidade do sistema de proteção identificar uma falta ou condição anormal de operação que pode prejudicar o funcionamento ou até mesmo danificar os equipamentos do sistema elétrico.

- Velocidade: O sistema de proteção deve atuar da forma mais rápida possível, evitando assim danos severos nos equipamentos afetados pela falta.

- Confiabilidade: Relaciona-se com a capacidade do sistema de proteção operar somente no momento em que for necessário, ou seja, na presença de uma falta ou condição anormal de funcionamento.

- Seletividade: É a capacidade do sistema de proteção identificar as áreas afetadas pela falta e desconectar somente estas, mantendo em operação as demais partes do sistema e a continuidade do atendimento aos consumidores.

O sistema de proteção convencional é especificado e parametrizado considerando o fluxo de potência unidirecional do sistema elétrico, ou seja, a geração é proveniente somente das concessionárias de energia e segue para atendimento das cargas. Além disto, considerando que as usinas hidrelétricas utilizam máquinas síncronas na geração, que possuem a característica de fornecer altos valores de corrente em situação de curto-circuito, existe também uma elevada relação entre corrente de carga operacional e corrente de curto-circuito [5].

A parametrização é fundamental para uma correta coordenação dos equipamentos de proteção do sistema elétrico. A mesma é realizada de forma a assegurar que as situações de faltas transitórias de operação sejam identificadas e eliminadas por equipamentos com ação de religamento mais rápida, como os religadores e disjuntores. Estes equipamentos normalmente estão localizados em ramais principais de distribuição e, no caso de atuação, um maior número de consumidores será afetado. Entretanto, como se trata de faltas transitórias, o religamento e atendimento aos consumidores poderão ser efetuados de forma mais rápida. No caso de faltas permanentes, as mesmas geram a atuação de equipamentos mais próximos aos pontos de falta, que possuem ação de religamento mais lenta, como as chaves fusíveis [5].

Com o objetivo de se obter uma operação mais eficiente e coordenada da proteção, os equipamentos são parametrizados utilizando curvas de sobrecorrente dos religadores. As curvas rápidas possibilitam a atuação antes do tempo de fusão dos fusíveis próximos às cargas e as curvas lentas temporizadas possibilitam a eliminação de faltas permanentes localizadas em ramais principais de distribuição.

A Figura 2.15 exemplifica a utilização das curvas de religamento. Numa situação inicial, o disjuntor ou religador elimina a falta desconectando um ramal principal de alimentação. Após um determinado tempo previamente parametrizado, ocorre uma tentativa de religamento, mas desta vez utilizando uma curva mais lenta, conforme indicado. Esta curva mais lenta possuiu tempo superior ao dos fusíveis instalados na rede mais próximos das cargas. Caso a falta persista e seja próxima às cargas, ocorre o rompimento do fusível e o respectivo ramal é desligado. Caso ainda exista a falta no ramal principal, o disjuntor ou religador atuará pela curva lenta e desconectará a parte da rede afetada pela falta [5,56].

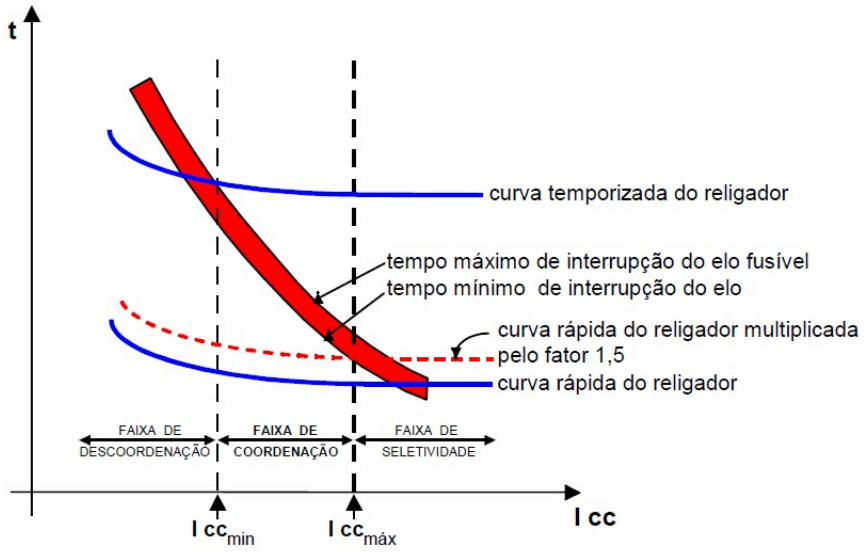


Figura 2.15 – Curvas de Coordenação entre Religador e Fusível [56].

Este religamento de forma automática, através da coordenação da proteção, ocorre de modo que o tempo de interrupção do fornecimento de energia para os consumidores seja o menor possível. O número de curvas e de tentativas de religamento é parametrizado de acordo com a filosofia e normas de proteção das concessionárias de energia e pode ainda variar de acordo com as características específicas de cada instalação. Caso a situação de falta persista após as tentativas de religamento automático, a parte da rede afetada permanece desligada e somente poderá ser reativada através de comando do operador do sistema elétrico [56].

A conexão das microrredes, com seus sistemas de geração distribuída, gera alterações nesta filosofia proteção, onde os respectivos impactos devem ser avaliados individualmente para uma correta operação do sistema elétrico.

2.7.2 Impactos das Microrredes na Proteção do Sistema Elétrico

Considerando a representação simplificada de um sistema de distribuição de energia, conforme a Figura 2.16, pode-se analisar o funcionamento do sistema de proteção convencional com as características previamente discutidas [5,57].

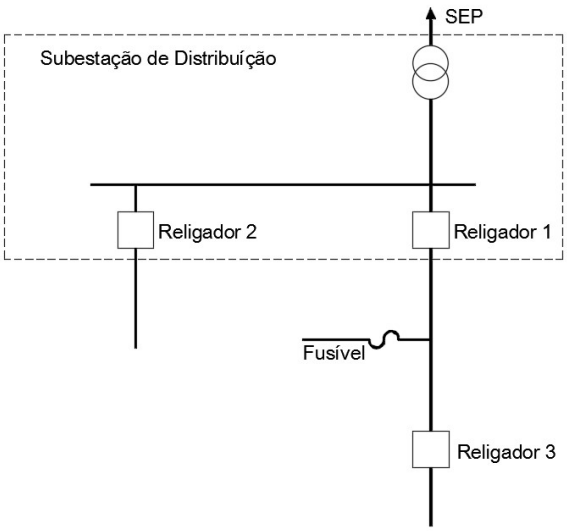


Figura 2.16 – Representação Simplificada de um Sistema de Distribuição [5,57].

Toda a parte de geração e linhas de transmissão de energia que compõem o Sistema Elétrico de Potência (SEP) está indicada na Figura 2.16 de forma simplificada como SEP. A subestação de distribuição foi representada por um transformador abaixador, uma barra e seus religadores, de onde saem os alimentadores para distribuição de energia. Estes alimentadores de distribuição são protegidos por diversos religadores e fusíveis [5].

Conforme visto anteriormente, o sistema de proteção é parametrizado considerando a coordenação entre os fusíveis e religadores, desta forma, se ocorrer uma falta no ramal protegido pelo Fusível, o Religador 1 deve atuar, de forma a evitar a interrupção permanente do fornecimento gerada pela queima do fusível. Após um determinado período de tempo, o Religador 1 faz uma tentativa de religar automaticamente o alimentador. Caso a falta persista, o fusível queima e interrompe de forma permanente o fornecimento de energia no ramal afetado. O número de tentativas de religamento, assim como tempo entre elas é parametrizado conforme a filosofia e normas de proteção de cada concessionária de energia.

De forma a evitar que um grande número de consumidores seja afetado por faltas que ocorrem em uma região específica da rede elétrica, o sistema de proteção é parametrizado para que o dispositivo mais próximo da região onde ocorreu a falta atue primeiro. No caso do exemplo da Figura 2.16, quando ocorre uma falta a jusante do Religador 3, somente o mesmo deve atuar, isolando a região afetada. Neste caso, o Religador 1 atuará somente no caso do Religador 3 não isolar a área afetada pela falta. Esta atuação seletiva dos Religadores 1 e 3 é obtida através da parametrização utilizando curvas de sobrecorrente onde o tempo de atuação do Religador 1 é maior do que o tempo de atuação do Religador 3.

Este sistema de proteção é afetado quando são instaladas gerações distribuídas na rede elétrica e seus principais impactos são abordados nos itens a seguir.

2.7.2.1 Perda de Coordenação

Considerando a conexão de uma microrrede na rede elétrica principal, conforme indicado na Figura 2.17, observa-se que ocorre a perda da coordenação da proteção entre o Fusível e o Religador 1 para faltas a jusante do fusível. Esta coordenação da proteção inicialmente é realizada através das curvas de atuação rápida e lenta do Religador 1 e considera que a corrente de falta é a mesma nos dois equipamentos.

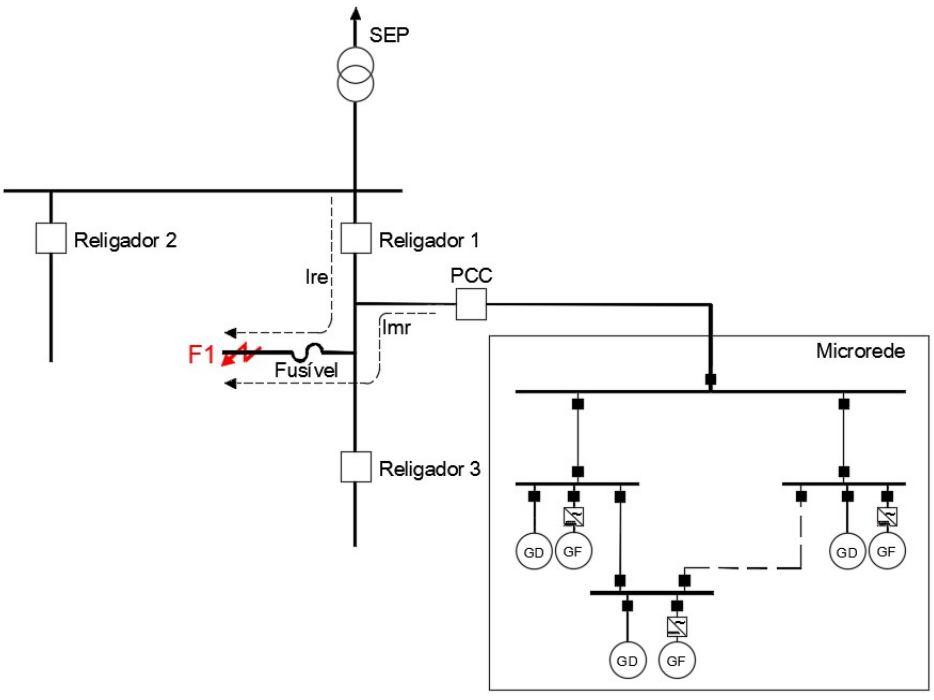


Figura 2.17 – Perda de Coordenação do Sistema de Proteção - Adaptado de [57].

Analisando a situação de falta em F1, conforme indicado na Figura 2.17, pode-se observar que a conexão da microrrede gera uma corrente adicional proveniente das gerações distribuídas, de forma que a corrente que passa pelo Fusível é maior do que a corrente que passa pelo Religador 1. Este aumento da corrente que passa pelo Fusível pode resultar na queima do mesmo antes da atuação rápida do Religador 1. Neste caso, uma falta que poderia ser transitória, torna-se permanente, sendo necessária a substituição do fusível e afetando diversos consumidores [5,57].

2.7.2.2 Perda de Sensibilidade

Considerando uma falta no ponto F2, conforme a Figura 2.18, devido à contribuição das gerações distribuídas com a corrente de curto-circuito, a corrente detectada pelo relé de proteção instalado junto ao Religador 1 será menor do que a corrente total no ponto da falta. Além disto, a conexão da microrrede faz com que a corrente de falta proveniente do sistema elétrico principal diminua. Como os relés são parametrizados para a detecção da impedância da linha através das medições de tensão e corrente, a diminuição da corrente faz com que a impedância detectada pelo relé seja maior do que aquela a qual o mesmo foi parametrizado. Com isto, o relé perde a sua sensibilidade em detectar a falta no trecho do circuito em questão [57].

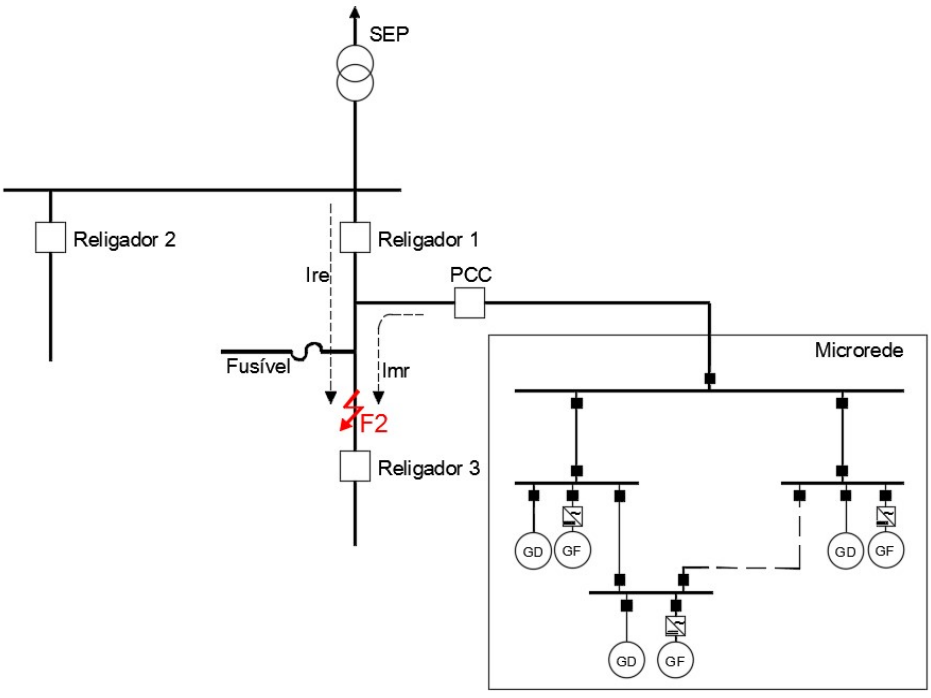


Figura 2.18 – Perda de Sensibilidade do Sistema de Proteção - Adaptado de [57].

2.7.2.3 Atuação Indevida da Proteção da Concessionária

Analisando o circuito e considerando uma falta no ponto F3, conforme indicado na Figura 2.19, observa-se que as gerações distribuídas presentes na microrrede geram uma corrente reversa passando pelo Religador 1. Caso esta corrente tenha magnitude suficiente para ser detectada pela proteção de sobrecorrente deste religador, ocorrerá uma atuação indevida da proteção e consequente abertura do circuito. Isto interromperá o fornecimento de energia para todos os consumidores conectados a jusante do Religador 1, mesmo não existindo defeito na região [5,57].

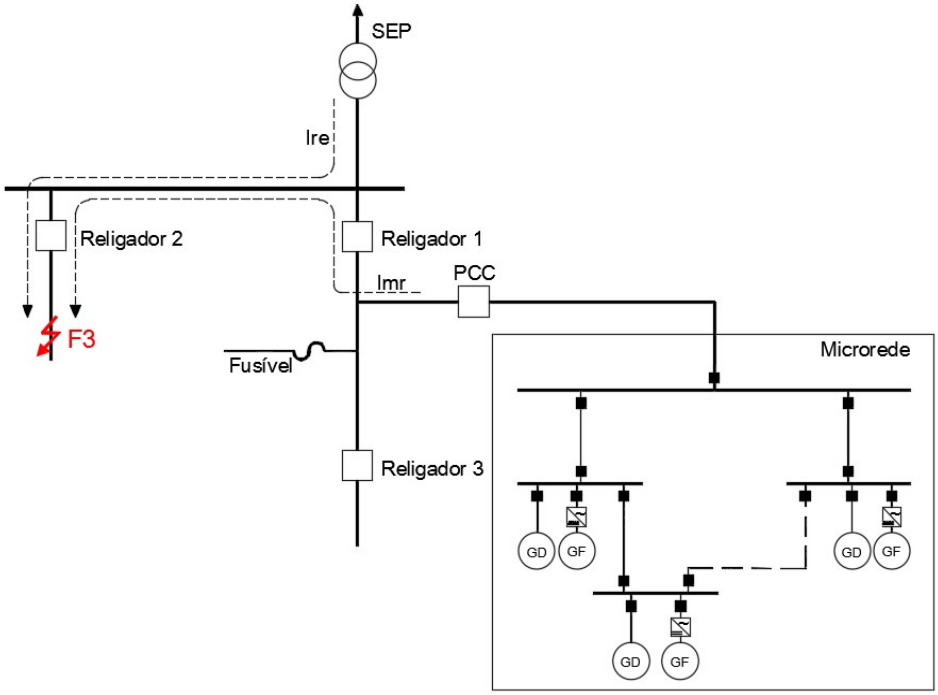


Figura 2.19 – Atuação Indevida do Sistema de Proteção - Adaptado de [57].

2.7.3 Funções de Proteção Exigidas pelas Concessionárias de Energia

Conforme visto, a conexão das microrredes gera diversos impactos na proteção do sistema elétrico principal, sendo os mesmos de conhecimento das concessionárias de energia. De forma a minimizar estes impactos, as concessionárias elaboraram normas que os acessantes devem seguir para a conexão das microrredes. Estas normas contêm os requisitos mínimos de proteção e variam de acordo com cada concessionária de energia. Estes requisitos são codificados de acordo com a norma ANSI (*American National Standards Institute*), conforme indicado na Tabela 2.5 [58].

Tabela 2.5 – Tabela ANSI [58].

Numeração	Descrição da Função
21	Relé de Distância
25	Relé de Verificação de Sincronismo ou Sincronização
27	Relé de Subtensão
32	Relé Direcional de Potência
37	Relé de Subcorrente ou Subpotência
46	Relé de Reversão ou Desbalanceamento de Corrente
47	Relé de Reversão ou Desbalanceamento de Tensão
49	Relé Térmico
50	Relé de Sobrecorrente Instantâneo
50BF	Relé de Proteção Contra Falha de Disjuntor (Também Chamado de 50/62 BF)
50G	Sobrecorrente Instantâneo de Terra (Comumente Chamado 50GS)
50N	Sobrecorrente Instantâneo de Neutro
51	Relé de Sobrecorrente Temporizado
51G	Sobrecorrente Temporizado de Terra (Comumente Chamado 51GS)
51N	Sobrecorrente Temporizado de Neutro
51Q	Relé de Sobrecorrente Temporizado de Sequência Negativa
51V	Relé de Sobrecorrente com Restrição de Tensão
52	Disjuntor de Corrente Alternada
59	Relé de Sobretensão
59Q	Relé de Sobretensão de Sequência Negativa
59N	Relé de Sobretensão Residual ou Sobretensão de Neutro (ou 64G)
62	Relé Temporizador
63	Relé de Pressão de Gás (Buchholz)
64	Relé Detector de Terra
67	Relé Direcional de Sobrecorrente
67N	Relé de Sobrecorrente Direcional de Neutro (Instantâneo ou Temporizado)
67G	Relé de Sobrecorrente Direcional de Terra (Instantâneo ou Temporizado)
67Q	Relé de Sobrecorrente Direcional de Sequência Negativa
68	Relé de Bloqueio por Oscilação de Potência
78	Relé de Medição de Ângulo de Fase/ Proteção Contra Falta de Sincronismo
79	Relé de Religamento
81	Relé de Frequência (Sub ou Sobre)
85	Relé Receptor de Sinal de Telecomunicação (Teleproteção)
87	Relé de Proteção Diferencial

Na referência [55] consta um levantamento das proteções exigidas por diversas concessionárias de energia que devem ser instaladas no ponto de conexão das GDs com o sistema elétrico principal. Estas proteções devem atuar desconectando as GDs num tempo inferior ao de atuação da proteção das concessionárias. Na Tabela 2.6 constam as proteções exigidas pelas concessionárias para a instalação de GDs e na Tabela 2.7 constam as funções de proteção exigidas no ponto de conexão. Estas proteções têm como objetivo principal a desconexão das GDs quando ocorrem faltas no sistema elétrico principal das concessionárias.

Tabela 2.6 – Proteções Exigidas pelas Concessionárias para Instalação de GDs [55].

Relé	Descrição	Função	Distribuidoras
21/21N	Relé de Distância de Fase e Neutro	Proteção contra faltas fase-fase e fase-terra na distribuidora.	Cemig
25	Relé de Verificação de Sincronismo	Permite paralelismo de circuitos quando ambos estiverem dentro de limites prefixados de tensão, frequência e ângulo de fase.	BC Hydro, Celesc, Coelba, CPFL, Elektro, Cemig e Copel
27	Relé de Subtensão	Proteção do acessante e do sistema da distribuidora contra subtensões. Utilizada principalmente para assegurar que condições mínimas de atendimento a carga estão sendo observadas.	BC Hydro, Celesc, Copel, Cemig, CPFL, Elektro e Enersul
32	Relé Direcional de Potência	Limita o fluxo de potência ativa, injetado ou consumido pelo acessante, quando necessário.	Copel, CPFL, Cemig, Light, Copel, Elektro e Enersul
46	Relé de Sequência Negativa	Proteção do gerador do acessante contra correntes desequilibradas.	BC Hydro, Coelba, Copel, Celesc, Cemig e Elektro
47	Relé de Sequência de Fase de Tensão	Proteção do gerador do acessante contra tensões desequilibradas.	Cemig, Celesc e Elektro
50BF	Relé Contra Defeito Disjuntor	Proteção que transfere a atuação da proteção para outros disjuntores quando ocorre falha de abertura do disjuntor principal que recebeu um comando de trip da proteção.	BC Hydro e Copel

50/50N	Relé Sobrecorrente Instantâneo	Proteção contra faltas fase-fase e fase-terra na distribuidora.	Cemig, Celesc, Copel, CPFL, Elektro e Enersul
51/51N	Relé Sobrecorrente Temporizado		
51GS	Relé Sobrecorrente Sensível de Terra	Proteção complementar às proteções de sobrecorrente de falta à terra.	Elektro
51V	Relé Sobrecorrente com Restrição de Tensão	Protege contra faltas fase-fase. Possibilita a compatibilização geração máx. e contribuição mín. para falta. Função opcional à 21/21N,	Cemig, Copel e Elektro
59	Relé de Sobretensão	Proteção contra sobretensões. Utilizada para assegurar condições mínimas de atendimento para carga.	BC Hydro, Copel, Cemig, CPFL e Elektro
59N	Relé de Desequilíbrio de Tensão	Proteção de tensão de sequência zero para faltas à terra. Utilizada quando o transformador de conexão possui ligação em Delta do lado da concessionária.	Copel, Cemig, CPFL, Copel e Elektro
60	Relé de Desbalanço de Tensão	Proteção a ser instalada no disjuntor da usina com a finalidade de evitar a abertura indevida da concessionária devido às faltas de fase no acessante.	Copel
67/67N	Relé de Sobrecorrente Direcional de Fase	Proteção para faltas no acessante. Opera como retaguarda para faltas no transformador de acoplamento e no lado de baixa tensão do acessante. Esta função de proteção poderá ser utilizada para eliminar faltas na rede quando em substituição a função 51V.	Copel, Cemig, CPFL, Elektro e Enersul
78	Relé Salto Vetor ou Deslocamento de Fase	Proteção que compara os ciclos elétricos indicando se existe ou não deslocamento de fase de tensão. Utilizado para identificar ilhamento.	Copel
81 (O/U)	Relé de Frequência	Proteção contra o atendimento de cargas com níveis inadequados de frequência durante ilhamentos.	BC Hydro, Celesc, Coelba, Copel, Cemig, CPFL e Elektro
81 df/dt	Relé de Taxa de Variação da Frequência	Proteção utilizada para detecção de ilhamento, através da detecção de variações lentas de frequência em sistemas isolados, sendo a diferença entre potência ativa gerada e consumida é pequena.	Copel

Tabela 2.7 – Proteções Exigidas pelas Concessionárias no Ponto de Conexão da GD [55].

Relé	Descrição	Função	Distribuidoras
21/21N	Relé de Distância de Fase e Neutro	Proteção contra faltas fase-fase e fase-terra na distribuidora. Para a MT é uma função opcional à função 51V.	BC Hydro AT, Copel, Cemig, CPFL e Celesc
25	Relé de Verificação de Sincronismo	Permite paralelismo de circuitos quando ambos estiverem dentro de limites prefixados de tensão, frequência e ângulo de fase.	BC Hydro, Celesc, Coelba, Eletropaulo, Light, Cemig, Copel, Iberdrola, Enersul e IEEE Std 1547
27	Relé de Subtensão	Proteção contra subtensões. Utilizada principalmente para assegurar que condições mínimas de atendimento a carga estão sendo observadas.	BC Hydro, Celesc, Coelba, Copel, Cemig, CPFL, Elektro, Light, Eletropaulo, Iberdrola e IEEE Std 1547
37	Relé de Mínima Corrente	Associada à função 46, visa detectar faltas com sequência negativa e redução da corrente.	Copel e IEEE Std 1547
27G	Relé Subtensão de Neutro	Proteção para detecção de níveis de tensão no neutro inferior ao requerido.	IEEE Std 1547
32	Relé Direcional de Potência	Limita o fluxo de potência ativa, injetado ou consumido pelo acessante, quando necessário.	Celesc, Coelba, Eletropaulo, Cemig, Copel e Iberdrola
46	Relé de Sequência Negativa	Proteção do gerador contra correntes desequilibradas.	Cemig, Celesc e IEEE Std 1547
47	Relé de Sequência de Fase de Tensão	Proteção do gerador para operação durante desequilíbrios de tensões (opcional à 46).	Coelba, Eletropaulo, IEEE Std 1547, Cemig, Celesc e Light
50BF	Relé Contra Defeito Disjuntor	Proteção para minimizar danos ao sistema e demais equipamentos durante uma falha de abertura do disjuntor que recebeu um comando de disparo da proteção.	BC Hydro AT e Copel
50/50N	Relé Sobrecorrente Instantâneo	Proteção contra faltas fase-fase e fase-terra na distribuidora	BC Hydro AT, Celesc, Coelba, Copel, CPFL, Elektro, Enersul, Iberdrola, IEEE Std 1547 e Light
51/51N	Relé Sobrecorrente Temporizado		

51GS	Relé de Sobrecorrente Sensível de terra	Proteção complementar às proteções de sobrecorrente de falta à terra.	CPFL
51V	Relé Sobrecorrente com Restrição de Tensão	Protege contra faltas fase-fase na distribuidora ou no acessante. Necessária quando há dificuldade em compatibilizar geração máxima e contribuição mínima para falta. Função opcional à 21/21N, sendo que deve haver pelo menos uma delas.	Coelba, Cemig, Copel, Light e IEEE Std 1547
59	Relé de Sobretensão	Proteção do acessante e da distribuidora contra sobretensões. Utilizada principalmente para assegurar que condições mínimas de atendimento a carga estão sendo observadas.	Celesc, Coelba, Copel, Eletropaulo, Iberdrola, Cemig, Light e IEEE Std 1547
59N	Relé de Desequilíbrio de Tensão	Proteção de tensão de sequência zero para faltas à terra na rede da concessionária ou no acessante. Utilizada quando o transformador de conexão é ligado em Delta (concessionária).	BC Hydro AT, Celesc, Coelba, Eletropaulo, Cemig, Light, CPFL, Elektro, Iberdrola, Copel e IEEE Std 1547
64	Relé Detector de Terra	Proteção utilizada para detecção de faltas à terra através da verificação de sobretensão de sequência zero . Opcional a função 59N.	Iberdrola
67/67N	Relé de Sobrecorrente Direcional	Proteção para faltas no acessante. Opera como retaguarda para faltas no transformador de acoplamento e no lado de baixa tensão do acessante. Esta função de proteção poderá ser utilizada para eliminar faltas na rede em substituição à função 51V.	BC Hydro AT, Celesc, Coelba, Copel, Cemig, CPFL, Eletropaulo, IEEE Std 1547 e Light
78	Relé Salto Vetor ou Deslocamento de Fase	Proteção que compara os ciclos elétricos indicando se existe ou não deslocamento de fase de tensão. Utilizado para identificar situações de ilhamento	Copel, Celesc, Eletropaulo e Iberdrola
81 (O/U)	Relé de Frequência	Proteção contra o atendimento de cargas com níveis inadequados de frequência durante ilhamentos.	BC Hydro, Celesc, Coelba, Cemig, Copel, Light, Iberdrola e IEEE Std 1547
87	Relé Diferencial de Linha	Proteção para linha de transmissão com menos de 10 km, que interliga o acessante ao sistema.	Copel e IEEE Std 1547

Como pode ser observado nas Tabelas 2.6 e 2.7, em muitos casos as unidades de proteção mínimas exigidas pelas concessionárias de energia superam os requisitos previstos nos procedimentos da ANEEL. Isto indica que as concessionárias estão bastante criteriosas em manter a segurança da operação da rede elétrica, visto que a instalação de GDs vem aumentando ao longo dos últimos anos.

Uma vez estudado o sistema de proteção da rede elétrica principal e a sua interface com a conexão das GDs, é necessário também estudar o sistema de proteção interno das microrredes. Os próximos itens tratam de um embasamento teórico com referências bibliográficas sobre o tema, incluindo metodologias propostas na literatura referentes à proteção de microrredes e seus sistemas de comunicação.

2.7.4 Análise de Faltas em Microrredes e Sistema de Proteção Adaptativo

Uma característica muito encontrada na aplicação de microrredes é a utilização de fontes alternativas de energia, como por exemplo, os sistemas fotovoltaicos. Nestes sistemas, conforme previamente citado, a energia gerada passa por inversores de frequência para conversão de corrente contínua para corrente alternada e adequação do sinal para conexão com a rede elétrica principal. Estes inversores são normalmente parametrizados para que, em situação de falta, a corrente suba para até 1,2 vezes a corrente nominal e se mantenha neste patamar. Isto significa que a geração fotovoltaica funciona como uma fonte de corrente para uma microrrede, tendo seus valores operacionais e em situação de falta previamente parametrizados.

Para a geração através de máquinas síncronas, proveniente das concessionárias de energia e também de alguns tipos de GDs, como os grupos motor-gerador, o comportamento é diferente. Nestes casos, o gerador trabalha como uma fonte de tensão e, em situação de falta, a corrente sobe até limites delineados pela baixa impedância do sistema, sendo assim muito maior do que a corrente nominal.

Esta diferença de comportamento é muito importante na modelagem e análise das faltas internas às microrredes, principalmente considerando os modos conectado e ilhado. Caso a microrrede possua somente sistemas fotovoltaicos, por exemplo, a diferença em módulo das correntes de falta nos modos conectado e ilhado será muito grande e isto interfere diretamente na parametrização dos relés de proteção.

Mesmo considerando uma microrrede com GDs provenientes de sistemas fotovoltaicos e máquinas síncronas, o comportamento das correntes de falta nos modos conectado e ilhado, assim como as correntes em cada ponto da microrrede, sofre interferência por estes fatores. Desta forma, é necessário o desenvolvimento de sistemas de proteção que se adaptem à todas estas situações de funcionamento.

Um primeiro item a se comentar é que as proteções indicadas anteriormente nas Tabelas 2.6 e 2.7 são referentes ao ponto de conexão das microrredes com o sistema elétrico (PCC). Na referência [55] é realizada uma avaliação detalhada sobre estas proteções, englobando diversos estudos de caso, contudo, o foco foi dado aos equipamentos instalados no sistema elétrico principal. Como este trabalho visa os sistemas de proteção internos às microredes, é necessário abordar as propostas e tecnologias presentes na literatura voltadas para estes casos.

Na referência [5] são abordados diversos estudos de caso com aplicações de algoritmos e metodologias de proteção utilizadas na parte interna das microrredes. Dentre estas metodologias, destaca-se um conceito de proteção que vem sendo muito estudado na comunidade científica, denominado proteção adaptativa. Para este tipo de proteção, os ajustes de correntes dos relés são alterados automaticamente de acordo com as condições de operacionais da microrrede. Desta forma, uma microrrede pode ter um grupo de ajustes dos relés no modo de operação conectado e um grupo diferente no modo ilhado. Ainda segundo este conceito, pode ser realizada a parametrização dinâmica de todos os relés de uma microrrede de acordo com o número de gerações distribuídas instaladas, de suas respectivas contribuições com correntes de curto-circuito, além dos status operacionais dos disjuntores. Ou seja, é possível criar um grupo de ajustes de corrente para os relés de proteção a partir dos dados de arquitetura da microrrede, assim como os status operacionais de todos os equipamentos instalados na mesma.

A proteção adaptativa apresenta benefícios relativos à correta atuação diante de qualquer condição operacional das microrredes e também na redução nos tempos de eliminação das faltas. Contudo, este tipo de proteção também possui limitações, pois requer uma estrutura de comunicação robusta e dedicada, onde a velocidade de comunicação entre os equipamentos deve ser na ordem de milissegundos, ou seja, este tipo de proteção possui baixa tolerância à falhas na transmissão de dados.

Ressalta-se que, o sistema de proteção adaptativo é de importância fundamental neste trabalho, pois a metodologia para cálculo de correntes de curto-circuito e ajuste dos reles de proteção desenvolvida utiliza exatamente este conceito.

Além da referência citada, existem diversas publicações na literatura com estudos das microrredes em situação de falta e abordando sistemas de proteção adaptativos.

Na referência [59], são analisadas faltas internas de uma microrrede operando no modo ilhado e com todas as fontes utilizando inversores de frequência. Os autores propõem que, no caso de uma falta, a corrente total é o somatório das correntes de falta parametrizadas em cada inversor. Este comportamento e metodologia de cálculo mudam quando a microrrede opera no modo conectado, onde o valor da corrente para uma falta interna é mais relacionado com a capacidade de fornecimento de corrente do sistema elétrico principal, limitado por sua impedância.

O artigo aborda também o conceito de zonas de proteção, onde no caso de uma falta interna à microrrede, os relés mais próximos da mesma são parametrizados para atuarem primeiro. Esta parametrização é realizada através dos ajustes de correntes de falta e também dos tempos de atuação dos relés. No caso dos ajustes de corrente, os mesmos são maiores para os relés que estão instalados em pontos mais a montante do sistema, e os tempos de atuação são menores para os relés mais a jusante. Com relação às zonas de proteção, as mesmas são fundamentais para se garantir uma maior confiabilidade operacional da microrrede, pois permite que somente as partes internas afetadas pela falta sejam desligadas, mantendo em operação o fornecimento de energia para os demais consumidores [59].

Os temas abordados no artigo geram a integração de alguns conceitos vistos até aqui neste trabalho, como a maior confiabilidade no fornecimento de energia, pois somente as partes afetadas pela falta são desligadas e também sobre o comportamento da geração fotovoltaica, interfaceada por inversores de frequência, em situação de falta. Além disto, também são introduzidos os assuntos de zonas de proteção, ajustes de correntes dos relés de proteção e tempos de atuação.

Estas questões relativas ao cálculo de correntes de falta, assim como zonas de proteção e tempos de atuação dos relés de proteção serão discutidos mais detalhadamente ainda neste capítulo e também nos capítulos seguintes.

Na referência [60] é estudada uma microrrede com arquitetura de controle centralizada, rede de comunicação para os relés de proteção e GDs interfaceadas por inversores de frequência, conforme a Figura 2.20. Esta referência é importante para a concepção deste trabalho, pois utiliza proteção adaptativa e introduz uma metodologia de cálculo de correntes de falta para os relés com operações matriciais.

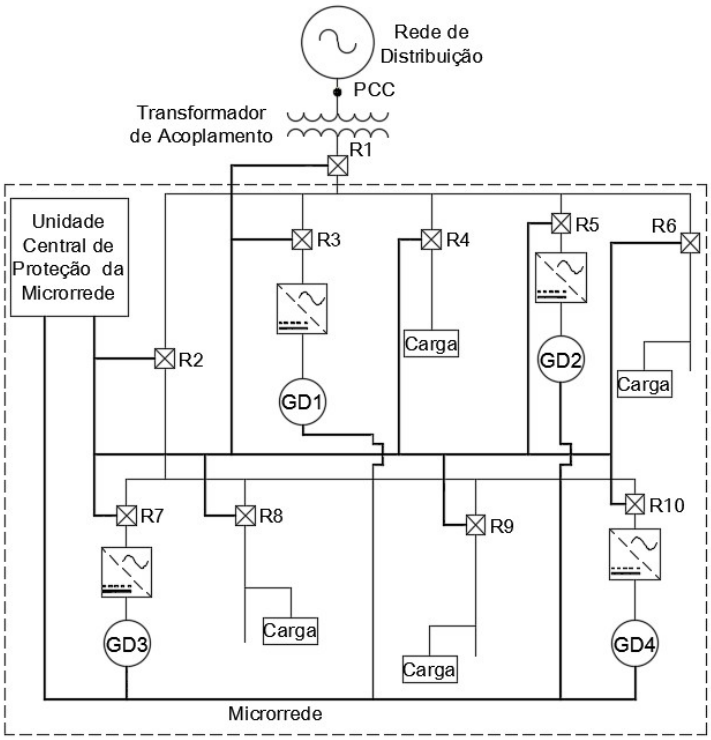


Figura 2.20 – Sistema de Proteção Centralizado com Rede de Comunicação [60].

Conforme a metodologia proposta pelo autores, a corrente de falta em um determinado relé pode ser calculada conforme a equação 2.1:

$$I_{relay} = (I_{faultGRID} \times OperatingMode) + \sum_{i=1}^{m} (k_i \times I_{faultDGi} \times Status_{DGi}) \quad (2.1)$$

Onde:

I_{relay}: Corrente total de falta de um relé.

$I_{faultGRID}$: Corrente total de falta proveniente da rede elétrica principal.

OperatingMode: Modo de operação da microrrede (1 é conectado e 0 é ilhado).

$I_{faultDGi}$: Corrente total de falta proveniente de uma GD.

$Status_{DGi}$: Status de operação da GD (1 é ligado e 0 é desligado).

m: Número de GDs presentes na microrrede.

k_i: Fator de impacto da respectiva GD na corrente de falta do relé.

Observa-se pela equação 2.1 que a corrente de falta de um relé será a soma da corrente de falta proveniente da rede elétrica principal com o somatório das correntes de falta provenientes de todas as GDs da microrrede. Conforme a equação, caso a microrrede esteja funcionando no modo ilhado ou uma determinada GD esteja desligada, seus valores de corrente serão multiplicados por zero através das variáveis *OperatingMode* e $Status_{DGi}$ respectivamente.

Conforme desenvolvido no artigo, o valor da corrente total de falta proveniente de uma GD ($I_{faultDGi}$) é calculado multiplicando a sua corrente nominal de operação pelo fator 1,5, no caso da geração ser interfaceada por inversores de frequência, ou multiplicando pelo fator 5, caso a geração seja proveniente de máquinas síncronas. A arquitetura indicada na Figura 2.20 apresenta somente GDs interfaceadas por inversores, mas o modelo de cálculo proposto também contempla GDs de máquinas síncronas, como os grupos motor-gerador.

Conforme visto anteriormente neste trabalho, os inversores de frequência utilizados na geração fotovoltaica são normalmente parametrizados para que em situação de falta a corrente seja 1,2 vezes a corrente nominal. Entretanto, na referência [60], os autores consideram que a corrente de falta seja 1,5 vezes a corrente nominal. Outro ponto observado, é que não é realizado um cálculo exato para a corrente de falta proveniente de máquinas síncronas, pois os autores assumem que este valor seja obtido através da multiplicação da corrente nominal pelo fator 5. Portanto, os valores de corrente calculados pelo modelo proposto pelos autores são uma aproximação.

O ponto mais interessante observado na referência [60] é a aplicação do fator de impacto das GDs na corrente de falta dos relés. Este fator k_i é calculado considerando a distância entre um relé e uma das GDs da microrrede. No caso das GDs provenientes de sistemas fotovoltaicos este fator será sempre 1, pois os inversores trabalham como fontes de corrente para a microrrede. Entretanto, nas GDs provenientes de máquinas síncronas, este fator varia de acordo com a distância entre os relés e as respectivas GDs, considerando assim a impedância da linha, que faz com que o valor da corrente de falta diminua. Como são vários relés e várias GDs, o fator k_i transforma-se numa matriz de valores que variam de 0 a 1. Esta matriz contém os respectivos valores relativos de cada GD e um relé em específico, possuindo assim o número de GDs em linhas e número de relés em colunas (k_{ir}).

A equação 2.2 apresenta a matriz de coeficientes dos fatores de impacto de cada GD na corrente de falta dos relés de proteção [60]:

$$k = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & \dots & k_{1r} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & \dots & k_{2r} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & \dots & k_{3r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{i1} & k_{i2} & k_{i3} & \dots & k_{ir} \end{bmatrix} \tag{2.2}$$

A equação 2.3 apresenta o vetor das correntes de falta de cada GD [60]:

$$I_{faultDG} = \begin{bmatrix} I_{faultDG1} \\ I_{faultDG2} \\ I_{faultDG3} \\ \dots \\ I_{faultDGi} \end{bmatrix} \tag{2.3}$$

As equações 2.4 e 2.5 apresentam o cálculo matricial das correntes de falta para os relés da microrrede, considerando todas as GDs [60].

$$I_{relay} = \begin{bmatrix} I_{relay1} \\ I_{relay2} \\ I_{relay3} \\ \dots \\ I_{relayr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & \dots & k_{1r} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & \dots & k_{2r} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & \dots & k_{3r} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{i1} & k_{i2} & k_{i3} & \dots & k_{ir} \end{bmatrix}^T \otimes \begin{bmatrix} I_{faultDG1} \\ I_{faultDG2} \\ I_{faultDG3} \\ \dots \\ I_{faultDGi} \end{bmatrix} \tag{2.4}$$

$$I_{relay} = k^T \otimes I_{faultDG} \tag{2.5}$$

Através deste cálculo matricial, é possível determinar os valores de corrente de falta para todos os relés de proteção, em função dos status de operação de cada GD e da arquitetura da microrrede. Com isto, o sistema de controle realiza os cálculos e envia através da rede de comunicação os ajustes de corrente para todos os relés. Vale ressaltar que, para cada status operacional do sistema, os ajustes de corrente podem ser diferentes em função das GDs e também da configuração da microrrede.

Além do cálculo matricial das correntes de falta, os autores também apresentam um sistema de hierárquico de seletividade relativa para os relés, estabelecendo assim um critério de zonas de proteção [60].

A Figura 2.21 apresenta uma arquitetura de microrrede para exemplificar o modelo de seletividade proposto. Segundo os autores, o relé mais próximo do ponto de falta deve atuar primeiro, desconectando somente a parte defeituosa do circuito. Caso o relé mais próximo do ponto de falta não atue, um segundo relé, instalado num ponto mais distante, atuará com um tempo de operação superior. Como não é possível saber onde as faltas irão ocorrer, os relés são parametrizados com tempos de atuação sucessivamente maiores de acordo com a arquitetura da microrrede. Os relés instalados mais a jusante possuem os menores tempos de atuação e para os pontos a montante os tempos de atuação são sucessivamente maiores [60].

Considerando ainda a Figura 2.21, observa-se que o relé CB4 está instalado a montante do relé CB7. Desta forma, para uma falta na barra onde estão conectadas as GDs 4 e 5, o relé CB7 deverá atuar primeiro. Caso este relé não atue, o relé CB4 deverá atuar com um tempo de operação maior. Desta forma, cria-se um sistema de zonas de proteção para a microrrede, onde o relé CB7 protege a zona composta pela barra onde estão conectadas as GDs 4 e 5 e o relé CB4 tem como zona de proteção todos os circuitos a jusante do mesmo.

Observa-se também que as linhas onde estão instalados os relés CB5 e CB6 são auxiliares, ou seja, a microrrede pode assumir diversas arquiteturas. Para cada uma delas, são calculados os ajustes de correntes dos relés de proteção, assim como a parametrização dos tempos de operação dos mesmos conforme as zonas de proteção. Isto é realizado através do sistema de controle centralizado da microrrede.

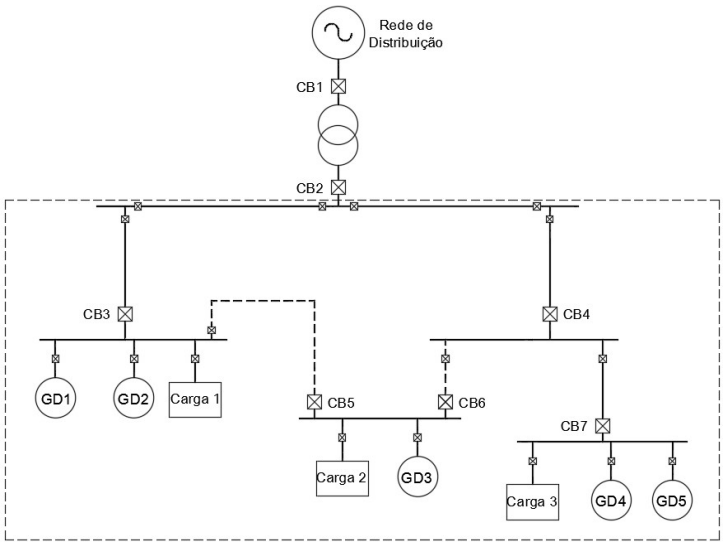


Figura 2.21 – Arquitetura de Microrrede para Estudo de Seletividade [60].

A Figura 2.22 apresenta um diagrama de blocos com o algoritmo de seletividade entre 2 relés de proteção utilizado na metodologia proposta pelos autores. Caso a corrente detectada por um determinado relé esteja acima do seu ajuste de operação, o mesmo acionará a abertura do circuito, desconectando a área afetada pela falta. Se a corrente estiver abaixo de seu ajuste de operação, mas acima do ajuste de operação de um relé instalado a jusante do mesmo, o relé em questão aguarda por 200 ms a atuação do relé a jusante. Se o relé a jusante não operar, o relé inicial acionará a abertura do circuito, desligando toda a parte da microrrede conectada a jusante do mesmo [60].

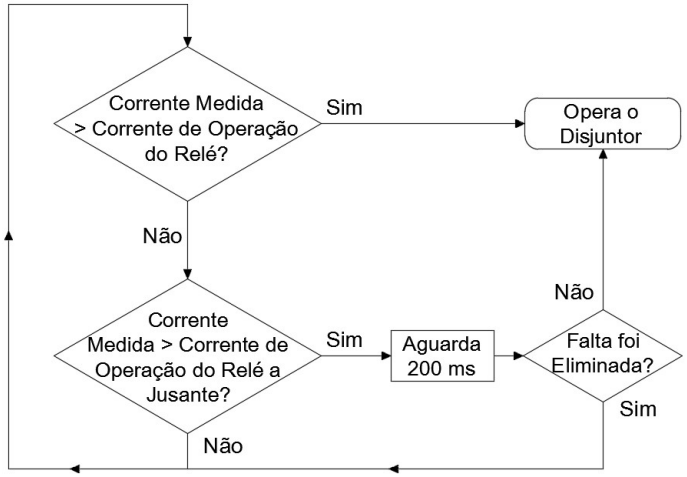


Figura 2.22 – Algoritmo de Seletividade dos Relés de Proteção [60].

Apesar de utilizar uma aproximação no cálculo dos valores de corrente de falta para a microrrede, os autores introduzem diversos pontos interessantes, como uma metodologia de operações matriciais dinâmicas, onde a cada nova configuração de arquitetura da microrrede o sistema de controle centralizado executa os cálculos e parametriza os relés, executando uma proteção adaptativa. Estas arquiteturas englobam as interligações entre as barras da microrrede, assim como os status de operações das GDs. Outro ponto interessante apresentado no artigo é um sistema de seletividade entre os relés de proteção, com tempos de atuação sucessivamente maiores à medida que os relés são instalados mais a montante na microrrede.

Além da aproximação utilizada no cálculo, outra limitação foi identificada no modelo, pois o mesmo considera somente faltas trifásicas para terra. Desta forma, no caso de faltas monofásicas ou do tipo fase-fase, o modelo proposto não apresenta dados, abrindo possibilidades para melhorias e implementações futuras.

2.7.5 Proteção Baseada em Sistemas de Comunicação

A principal função do sistema de comunicação das microrredes é possibilitar a troca de dados e monitoração dos vários elementos que compõem o sistema para fins de controle e proteção. Em uma microrrede com arquitetura de controle centralizada, a rede de comunicação é necessária para comunicar sinais de controle aos componentes da microrrede. Em uma microrrede com arquitetura de controle descentralizada, a rede de comunicação permite que cada componente comunique com os demais e tome decisões de controle em função de objetivos operacionais predefinidos. Em ambas as arquiteturas, o sistema de comunicação é fundamental na eliminação rápida de faltas e no aumento da eficiência operacional do sistema [2].

Existem diversos trabalhos publicados na comunidade científica abordando o tema de redes de comunicação para microrredes. Um dos tópicos mais encontrados foi a aplicação da norma IEC 61850. A mesma é um padrão para automação de sistemas elétricos e uma parte da arquitetura do Comitê Técnico 57 (TC57) da Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC - *International Electrotechnical Commission*) para sistemas de energia elétrica [61]. Esses padrões resultaram em melhorias significativas nos custos e no desempenho das redes elétricas. A referência [62] apresenta uma revisão da aplicação da IEC 61850, incluindo suas principais características técnicas e benefícios.

Como as microrredes possuem condições de operação variáveis relativas à sua topologia e status das GDs, é necessário utilizar os sistemas de comunicação para atualizar as configurações de proteção. Nas referências [63,64], que são de mesma autoria da referência [60] estudada no item anterior, os autores apresentam a modelagem e simulação da rede de comunicação para uma microrrede. É muito interessante ressaltar que os autores utilizam a mesma arquitetura de microrrede nos 3 artigos, de forma que um complementa o outro, mas com abordagens diferentes. No primeiro artigo, é proposto o modelo de cálculo das correntes de falta e a seletividade dos relés utilizando o conceito de proteção adaptativa, na referência [63] é realizada a implementação da infraestrutura de comunicação no software Matlab/Simulink onde os sinais e seus atributos são ajustados de acordo com a IEC 61850. Na referência [64] é dado mais enfoque para a modelagem dos componentes da microrrede e para os nós lógicos utilizados no sistema de comunicação.

O tema de sistema de comunicação em microrredes é somente complementar neste trabalho, pois o foco principal é o cálculo das correntes de falta. Desta forma, este tema não será aprofundado, sendo que, os artigos citados são uma referência no caso do leitor desejar fazer consultas ou posteriores estudos específicos nesta área.

2.7.6 Limitação de Corrente de Falta

Limitadores de corrente são equipamentos que possuem a capacidade de atenuar ou bloquear picos de corrente com rapidez suficiente de forma a possibilitar que os disjuntores possam operar com segurança, desconectando a parte da rede elétrica afetada pela falta. Na referência [65] é apresentado um resumo com o estado da arte na aplicação de limitadores de corrente. Segundo os autores, os limitadores de corrente de estado sólido são os mais apropriados para instalação em microrredes.

Na referência [66] é proposto um limitador de corrente unidirecional a ser instalado no PCC. O equipamento atuará somente na contribuição de corrente da microrrede quando ocorrer uma falta na rede principal. Inversamente, durante uma falta na microrrede, o limitador de corrente estará inativo e permitirá a contribuição total de corrente da rede principal. A solução é muito interessante, pois conforme proposto, a coordenação entre os relés de sobrecorrente do sistema elétrico é preservada, o que gera uma possibilidade de aplicação para os problemas apresentados no item 2.7.2.

2.8 Considerações Finais

Atualmente, a aplicação de microrredes está crescendo em todo o mundo, levando a vários desafios e oportunidades. Conforme apresentado, o tema é muito extenso e possuiu várias linhas de pesquisa. Neste capítulo, as principais características, benefícios e tecnologias aplicadas na área foram abordados de forma geral, dando destaque para a área de proteção, que será melhor estudada adiante neste trabalho.

No próximo capítulo serão estudados os diversos tipos de curtos-circuitos e também será desenvolvida uma nova metodologia para cálculo de correntes de falta para microrredes, visando maior precisão e seletividade no ajuste dos relés de proteção.

Capítulo 3

METODOLOGIA PARA CÁLCULO DE CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO

3.1 Considerações Iniciais

Este capítulo visa desenvolver uma nova metodologia de cálculo de correntes de curto-circuito para microrredes. O método da superposição de circuitos é aplicado para as fontes provenientes de máquinas síncronas, e uma nova metodologia de cálculo utilizando matrizes dinâmicas é desenvolvida para os sistemas fotovoltaicos.

No item 3.2 é realizada uma abordagem sobre estudos de curto-circuito e seus diversos tipos, no item 3.3 é apresentado o método da superposição para solução de redes elétricas, e no item 3.4 é proposta uma arquitetura de microrrede para estudo de caso e aplicação da metodologia desenvolvida neste trabalho. No item 3.5, a metodologia da superposição de circuitos é aplicada para calcular as correntes de curto-circuito para as fontes de máquinas síncronas presentes na microrrede proposta, e no item 3.6 é apresentada uma nova metodologia de cálculo das correntes de curto-circuito para os sistemas fotovoltaicos. O capítulo encerra com os itens 3.7, onde as metodologias são superpostas para cálculo dos valores totais de correntes de curto-circuito da microrrede, e o item 3.8 com as considerações finais.

O capítulo está estruturado com todos os passos utilizados no desenvolvimento da nova metodologia, incluindo as equações matemáticas implementadas em sistema computacional para simulação.

3.2 Estudos de Curto-Circuito

Considerando um sistema elétrico trifásico equilibrado funcionando em regime permanente senoidal, na ocorrência de um curto-circuito, surgirão transitórios elétricos por um curto espaço de tempo, e logo após, o sistema assumirá um novo regime permanente senoidal com as correntes de curto. Apesar de alguns dispositivos serem afetados de forma específica por estes transitórios, grande parte dos equipamentos do sistema elétrico, como disjuntores, transformadores e relés de proteção podem ser dimensionados e ajustados de acordo com as correntes em regime permanente em condições de curto-circuito [67].

Para cálculo destas correntes em regime permanente existem diversas metodologias propostas na literatura, contudo, neste trabalho será estudada a aplicação do método das componentes simétricas, utilizado sistemas computacionais, para solução da rede elétrica [67].

O método das componentes simétricas é um recurso matemático utilizado para solução de redes elétricas trifásicas equilibradas e simétricas. O mesmo consiste em uma transformação matemática linear aplicada às componentes de fase, obtendo-se as novas componentes, denominadas componentes simétricas. Esta transformação resulta em 3 circuitos equivalentes, denominados circuitos sequenciais. Estes circuitos possuem a vantagem de serem equilibrados e desacoplados entre si, o que possibilita uma solução simples utilizando circuitos monofásicos equivalentes [67].

Caso ocorra um desequilíbrio na rede trifásica original, também denominado assimetria, os circuitos sequenciais permanecerão simétricos e equilibrados, sendo os mesmos conectados entre si somente nos pontos onde ocorreu o desequilíbrio. Neste caso, a análise e solução do circuito na presença de uma assimetria são simplificadas em relação à solução no domínio das fases [67,68].

A transformação linear utilizada no método foi inicialmente proposta por Fortescue, conforme a referência [68]. Para circuitos trifásicos equilibrados a mesma utiliza a matriz *Q*, denominada matriz de Fortescue. Esta matriz é utilizada para transformar as componentes simétricas em componentes de fase. Para a transformação das componentes de fase em componentes simétricas é utilizada a matriz inversa Q^{-1}.

As equações 3.1 e 3.2 apresentam as matrizes *Q* e Q^{-1}, onde a variável "*a"* presente nas matrizes é um operador matemático que quando aplicado a um fasor, resulta no giro do mesmo no sentido anti-horário ou positivo. Este giro é equivale ao ângulo característico do sistema (θc). A equação 3.3 apresenta o cálculo da variável "*a*":

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \tag{3.1}$$

$$Q^{-1} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \tag{3.2}$$

$$a = e^{j\theta c} \tag{3.3}$$

Inicialmente Fortescue apresentou seu teorema para aplicação de forma específica em sistemas trifásicos, com isto, θc é 120°. Posteriormente, o método foi atualizado para aplicação em sistemas polifásicos, neste caso, θc é calculado conforme a equação 3.4, onde a variável "*k*" indica o número de fases do sistema [67].

$$\theta c = \frac{2\pi}{k} = \frac{360^o}{k} \tag{3.4}$$

Como este trabalho é direcionado para sistemas trifásicos equilibrados, não serão aprofundadas a metodologia nem as matrizes *Q* e Q^{-1} para sistemas polifásicos.

3.2.1 Tipos de Curtos-Circuitos

Existem 11 tipos diferentes de curtos-circuitos, sendo os mesmos divididos em monofásicos (AT, BT e CT), bifásicos sem Terra (AB, BC e CA), bifásicos com Terra (ABT, BCT e CAT) e trifásicos (ABC e ABCT). Conforme literatura, a metodologia de componentes simétricas somente pode ser utilizada no estudo de assimetrias que possuem alguma simetria em relação a uma das fases, geralmente a fase A. Com isto, os 11 tipos de curtos-circuitos são reduzidos a 5 (AT, BC, BCT, ABC e ABCT), sendo que, caso seja necessário o cálculo de outro tipo de curto, basta renomear as fases, fazer os cálculos e depois voltar para a designação original [67,69].

3.3 Método da Superposição

O método da superposição consiste em um recurso técnico para solução de redes elétricas através da separação da mesma em duas ou mais partes, que separadamente são de solução mais simplificada do que a rede original. Após a solução de todas as partes, os resultados são somados, obtendo-se assim a solução final para a rede elétrica em questão [67].

O método pode ser aplicado para redes elétricas com várias fontes geradoras de energia, desde que, para cada uma das partes a ser solucionada, as fontes presentes possuam a mesma característica de funcionamento. Isto ocorre, pois em uma simulação de curto-circuito, por exemplo, as fontes precisam ter comportamentos semelhantes. Um exemplo são as fontes provenientes de máquinas síncronas, ou seja, as redes convencionais interligadas pelas concessionárias de energia e grupos motor-gerador. Neste caso, na situação de curto-circuito a corrente sobre até um limite delineado pela baixa impedância do sistema, sendo assim muito maior do que a corrente nominal. No caso de geração fotovoltaica, o comportamento em situação de curto-circuito é diferente, pois os conversores estáticos trabalham como fontes de corrente e, na situação de curto-circuito, a corrente aumenta somente até um limite que é parametrizado nos inversores de frequência.

Com isto, considerando a aplicação da superposição em microrredes, as máquinas síncronas devem analisadas separadamente dos sistemas fotovoltaicos. Esta é uma das idéias fundamentais do modelo proposto neste trabalho, aplicar o método da superposição para uma microrrede com diversas máquinas síncronas e posteriormente somar estes resultados aos encontrados com uma nova metodologia de cálculo desenvolvida de forma específica para os sistemas fotovoltaicos. Desta forma, será realizada uma dupla superposição no modelo proposto [70].

Para a aplicação do método da superposição para as fontes provenientes de máquinas síncronas, os diversos equipamentos presentes numa rede elétrica, tais como geradores, linhas de transmissão, transformadores e cargas, serão representados pelos seus respectivos modelos lineares de circuito, desta forma, os resultados calculados serão os mais próximos possíveis das condições reais [67].

Os geradores síncronos serão representados por fontes de tensão senoidais constantes e simétricas, juntamente com uma impedância síncrona (Z_S). Os transformadores estarão operando com suas relações de transformação nominais e as linhas de transmissão/distribuição serão representadas através de suas impedâncias de sequência (Z_L). As cargas serão desprezadas, uma vez que as correntes de carga possuem pouca influência nos valores totais de correntes de curto-circuito [67].

Para a solução da rede utilizando o método da superposição, inicia-se considerando os circuitos pré-falta, puro de falta e pós-falta. O circuito pré-falta, indicado na Figura 3.1, consiste na situação de funcionamento em regime permanente senoidal imediatamente antes da falta e a sua solução permite encontrar os circuitos equivalentes e a tensão de Thévenin (V_{F0}) na barra de falta *F* a ser estudada [67].

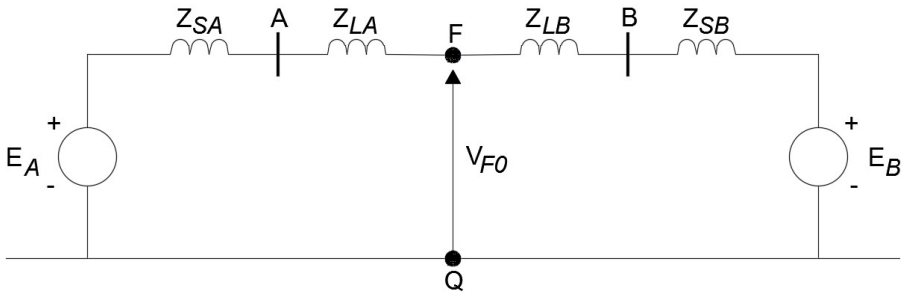


Figura 3.1 – Circuito Pré-Falta [67].

A Figura 3.2 indica uma representação alternativa do circuito pré-falta, onde uma fonte de tensão ideal no valor da tensão de Thévenin na barra *F* foi acrescentada, juntamente com uma resistência de falta R_F. Observa-se que não existe diferença de tensão em R_F e nem circulação de corrente entre a barra *F* e a barra de referência *Q*, indicadas na figura, ou seja, a corrente I_{F0} é nula.

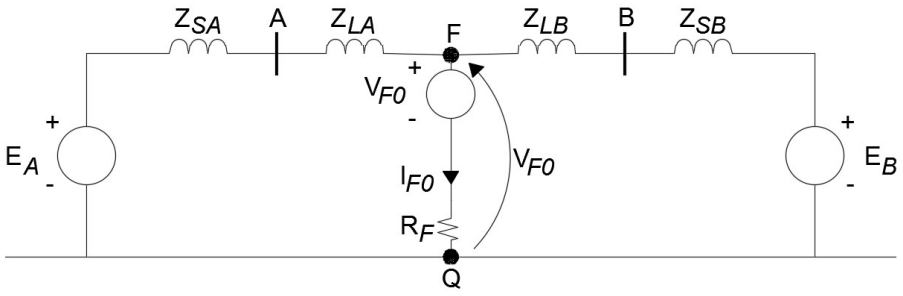


Figura 3.2 – Circuito Pré-Falta Alternativo [67].

No circuito pós-falta, conforme indicado na Figura 3.3, a tensão equivalente da barra *F* é aplicada diretamente na resistência de falta R_F, que pode inclusive ser zero. Neste momento, a tensão de falta V_{FF} se estabelece na barra *F* e ocorre a circulação da corrente de falta I_{FF} indicada na figura [67].

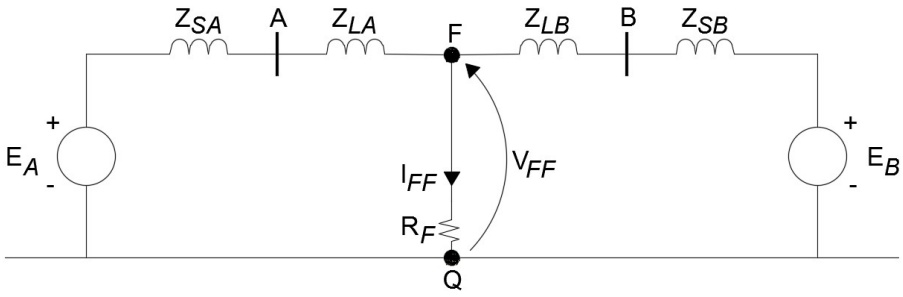


Figura 3.3 – Circuito Pós-Falta [67].

Uma representação alternativa do circuito pós-falta consta na Figura 3.4, onde duas fontes com o valor da tensão de Thévenin na barra *F* foram incluídas com polarizações opostas, de forma a não modificar o valor da corrente I_{FF}.

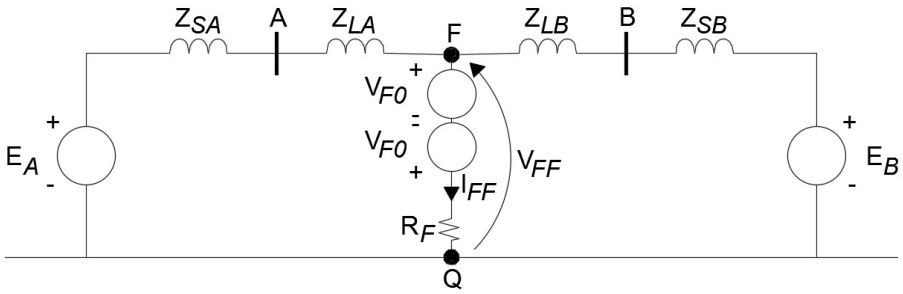


Figura 3.4 – Circuito Pós-Falta Alternativo [67].

Aplicando a superposição de circuitos, observa-se que o circuito pós-falta é a soma dos circuitos pré-falta alternativo com um circuito denominado puro de falta. Analisando este circuito puro de falta, conforme indicado na Figura 3.5, observa-se que a sua solução é bem mais simples do que o circuito pós-falta.

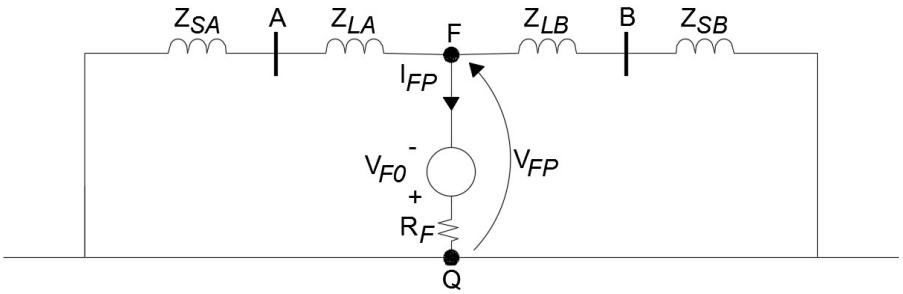


Figura 3.5 – Circuito Puro de Falta [67].

Considerando que o circuito pré-falta é normalmente resolvido para as condições normais de operação, a solução dos circuitos puro de falta e pós-falta ficará conforme a seguir, onde a corrente de falta I_{FF} é calculada pela equação 3.5 [67].

$$I_{FF} = I_{F0} + I_{FP} \rightarrow I_{FF} = I_{FP} = \frac{V_{F0}}{\left[\left(Z_{SA} + Z_{LA}\right) // \left(Z_{SB} + Z_{LB}\right)\right] + R_F} \tag{3.5}$$

Como o método utilizada circuitos equivalentes, a impedância de Thévenin (Z_{Th}) vista na barra de falta *F* pode ser calculada conforme a equação 3.6.

$$Z_{Th} = \left[\left(Z_{SA} + Z_{LA}\right) // \left(Z_{SB} + Z_{LB}\right)\right] \tag{3.6}$$

Fazendo a substituição de Z_{Th} na equação 3.5, obtêm-se a equação 3.7 para cálculo da corrente total de falta I_{FF}.

$$I_{FF} = I_{FP} = \frac{V_{F0}}{Z_{Th} + R_F} \tag{3.7}$$

Desta forma, a tensão na barra de falta após a ocorrência de um curto-circuito pode ser calculada conforme a equação 3.8.

$$V_{FF} = V_{F0} + V_{FP} = V_{F0} + \left(R_F I_{FP} - V_{F0}\right) = R_F I_{FP} \tag{3.8}$$

Considerando o estudo de redes trifásicas, será aplicada a Transformada de Fortescue para obter os circuitos de sequência positiva, negativa e zero equivalentes de Thévenin, conforme indicados na Figura 3.6. Como esta análise é referente a fontes senoidais equilibradas, somente o circuito de sequência positiva possuirá tensão equivalente. Caso a rede possuísse fontes desequilibradas, os demais circuitos de sequência também possuiriam fontes com tensões calculadas conforme a transformada de Fortescue [67].

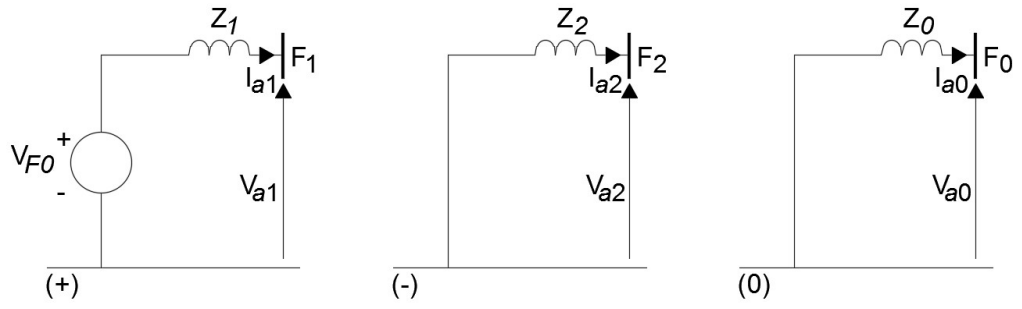


Figura 3.6 – Circuitos Sequenciais Equivalentes de Thévenin [67].

Para os circuitos de sequência da Figura 3.6, o cálculo das tensões sequenciais na barra de falta *F* fica conforme as equações 3.9, 3.10 e 3.11.

$$V_{a1} = V_{F0} - Z_1 I_{a1} \tag{3.9}$$

$$V_{a2} = -Z_2 I_{a2} \tag{3.10}$$

$$V_{a0} = -Z_0 I_{a0} \tag{3.11}$$

Onde:

V_{a1}, V_{a2}, V_{a0}: Tensões de sequência positiva, negativa e zero na barra de falta.

I_{a1}, I_{a2}, I_{a0}: Correntes de sequência positiva, negativa e zero na barra de falta.

Z_1, Z_2, Z_0: Impedâncias equivalentes de Thévenin de sequência positiva, negativa e zero na barra de falta.

3.4 Definição do Estudo de Caso

Para a aplicação da metodologia desenvolvida neste trabalho, considera-se uma arquitetura de microrrede como proposta para estudo e simulações, utilizando um modelo matricial de cálculo. Conforme previamente citado, somente as fontes de tensão provenientes de máquinas síncronas estarão inclusas inicialmente [70].

A microrrede proposta, conforme indicado na Figura 3.7, possui uma alimentação proveniente da concessionária de energia (*REDE*), 4 barras físicas, 4 linhas de distribuição e gerações distribuídas conectadas nas barras 2, 3 e 4. Esta arquitetura pode ser utilizada, por exemplo, em 4 unidades produtivas industriais, complexos comercias como shoppings e supermercados, condomínios residenciais e até mesmo em atividades rurais. O objetivo aqui é aplicar a metodologia, que pode ser utilizada para diferentes arquiteturas de microrredes.

A microrrede possui 6 gerações distribuídas, sendo que as gerações GD01, GD02 e GD03 são provenientes de máquinas síncronas (motor-gerador a diesel) e as gerações GF01, GF02 e GF03 são provenientes de sistemas fotovoltaicos, que serão estudados posteriormente neste capítulo.

Como o modelo de solução matricial de redes utiliza a formulação de barras onde ocorrem as faltas, foram criadas 4 barras virtuais (5, 6, 7 e 8) no circuito, para que possam ser calculadas as correntes de curto-circuito no caso dos mesmos ocorrerem nos cabos de interligação entre barras. Com isto, os cabos foram divididos virtualmente em duas seções de mesmo comprimento. Como os dados de impedância dos cabos utilizados são por unidade de comprimento, isto não alterará a metodologia de cálculo, bastando que cada parte da seção seja tratada como um único elemento na microrrede.

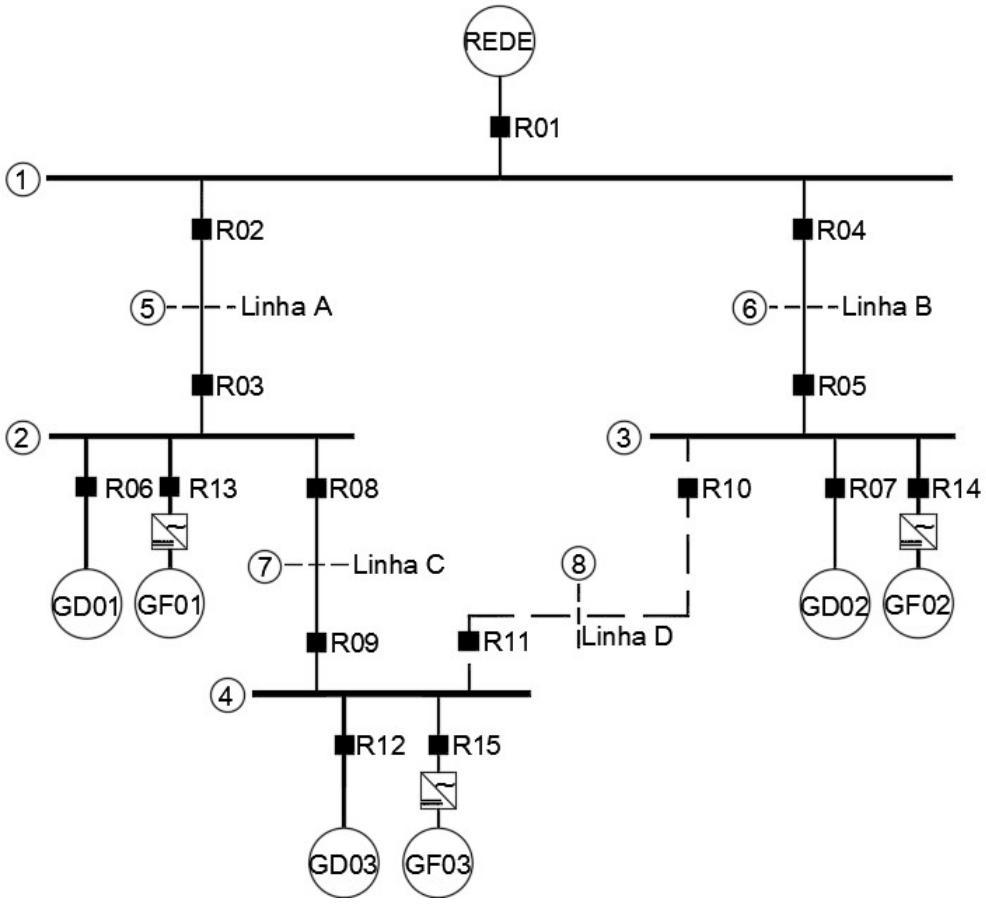


Figura 3.7 – Microrrede Proposta para Estudo e Simulação.

Os grupos motor-gerador utilizados possuem os seguintes dados característicos:

- Tensão / Corrente / Potência Nominais: 13,8 kV / 589,1 A / 7,04 MVA / FP 0,9
- Impedância de Sequência Positiva: 6,4692 + j3,133 Ω
- Impedância de Sequência Negativa: 1,6434 + j0,796 Ω
- Impedância de Sequência Zero: 0,4869 + j0,236 Ω

A alimentação proveniente da concessionária de energia (*REDE*) possui os seguintes dados característicos:

- Tensão de Linha: 13,8 kV / Nível de Curto-Circuito 3Ø: 360 MVA 3Ø
- Relação Reatância/Resistência: X/R = 0,70

Com isto, o equivalente de Thévenin com as impedâncias sequênciais desta alimentação pode ser calculado conforme as equações 3.12 a 3.18.

Tensão de Fase:

$$V_F = \frac{V_L}{\sqrt{3}} = \frac{13,8\,kV}{\sqrt{3}} = 7,967\,kV \tag{3.12}$$

Potência Monofásica:

$$SCC1Ø = \frac{SCC3Ø}{3} = \frac{360\,MVA}{3} = 120\,MVA \tag{3.13}$$

Cálculo da Impedância:

$$Z = \frac{V_F{}^2}{SCC1Ø} = \frac{\left(13,8\,kV\,/\,\sqrt{3}\right)^2}{120\,MVA} = 0,529\,\Omega \tag{3.14}$$

Cálculo da Resistência:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \rightarrow X = 0,70R \rightarrow 0,529 = \sqrt{R^2 + \left(0,70R\right)^2} \rightarrow R = 0,433\,\Omega \tag{3.15}$$

Cálculo da Reatância:

$$X = 0,70R \rightarrow X = 0,70 \cdot 0,433 \rightarrow X = j0,303\,\Omega \tag{3.16}$$

Aplicação da Transformada de Fortescue:

$$Z_{(Seq)} = Q^{-1} \cdot Z_{(Fase)} \cdot Q \rightarrow \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} = Q^{-1} \cdot \begin{bmatrix} Z_A & 0 & 0 \\ 0 & Z_B & 0 \\ 0 & 0 & Z_C \end{bmatrix} \cdot Q \tag{3.17}$$

Impedâncias de Sequência Negativa, Positiva e Zero:

$$Z_{(Seq)} = \begin{bmatrix} 0,433 + j0,303 & 0 & 0 \\ 0 & 0,433 + j0,303 & 0 \\ 0 & 0 & 0,433 + j0,303 \end{bmatrix} \Omega \tag{3.18}$$

Os cabos utilizados para interligação das barras da microrrede possuem as seguintes características e comprimentos:

- Cabo: 3 x 1 de 150 mm^2. Impedância: 0,1610 + j0,1240 Ω/km
- Linha A: 1,0 km de Comprimento.
- Linha B: 1,2 km de Comprimento.
- Linha C: 1,5 km de Comprimento.
- Linha D: 3,0 km de Comprimento.

Os cabos podem também, a título de exemplo, serem divididos em mais seções com diversos comprimentos, bastando somente criar mais barras virtuais para aplicação da metodologia. Os comprimentos acima se referem ao comprimento total dos cabos, ou seja, cada seção na microrrede possuirá metade dos comprimentos.

A Tabela 3.1 indica os elementos da microrrede, suas respectivas impedâncias sequenciais e suas barras de interligação. A barra 0 refere-se ao Terra e, conforme citado anteriormente, as cargas instaladas não serão consideradas para este estudo, pois interferem muito pouco no cálculo das correntes de curto-circuito.

Tabela 3.1 – Características dos Elementos da Microrrede.

Elem.	De	Para	Resistências de Sequência (Ω)			Reatâncias de Sequência (Ω)			Tensão (kV)
			Pos.	Neg.	Zero	Pos.	Neg.	Zero	
1	0	1	0,4330	0,4330	0,4330	0,3030	0,3030	0,3030	13,8
2	1	5	0,0805	0,0805	0,0805	0,0620	0,0620	0,0620	0
3	5	2	0,0805	0,0805	0,0805	0,0620	0,0620	0,0620	0
4	1	6	0,0966	0,0966	0,0966	0,0744	0,0744	0,0744	0
5	6	3	0,0966	0,0966	0,0966	0,0744	0,0744	0,0744	0
6	0	2	6,4692	1,6434	0,4869	3,1330	0,7960	0,2360	13,8
7	0	3	6,4692	1,6434	0,4869	3,1330	0,7960	0,2360	13,8
8	2	7	0,1208	0,1208	0,1208	0,0930	0,0930	0,0930	0
9	7	4	0,1208	0,1208	0,1208	0,0930	0,0930	0,0930	0
10	3	8	0,2415	0,2415	0,2415	0,1860	0,1860	0,1860	0
11	8	4	0,2415	0,2415	0,2415	0,1860	0,1860	0,1860	0
12	0	4	6,4692	1,6434	0,4869	3,1330	0,7960	0,2360	13,8

- NOTA: As indicações R01 a R15 na Figura 3.7, correspondem aos relés de proteção junto com os dispositivos de abertura do circuito de cada elemento da microrrede. Os mesmos serão abordados no Capítulo 4 deste trabalho.

Ressalta-se que a microrrede proposta possui arquitetura variável, ou seja, os status de operação das fontes e das linhas podem ser comandados através de um sistema de supervisão e controle centralizado da microrrede. Com isto, um operador desta microrrede poderá controlar o acionamento das GDs e a abertura e fechamento das linhas, permitindo inclusive a operação ilhada da concessionária de energia. Será possível também uma alimentação alternativa para as barras, visto que, a microrrede possui uma linha auxiliar (Linha D) que funcionará a comando do operador ou através de intertravamento em caso de curto-circuito.

3.5 Aplicação da Superposição em Microrredes

Para calcular as correntes de curto-circuito nas barras e elementos da microrrede, será aplicado o método da superposição em duas etapas. Nesta primeira etapa, será realizada a superposição de circuitos considerando somente as fontes provenientes de máquinas síncronas. Posteriormente, no item 3.6, será implementada uma nova metodologia específica para os sistemas fotovoltaicos. Os dois resultados serão superpostos, obtendo assim as correntes totais de curto-circuito para a microrrede.

3.5.1 Modelagem Computacional

Para os cálculos e solução do circuito, foi implementado no software Matlab um programa que lê os dados da Tabela 3.1, inserida no programa através de uma matriz, e executa a solução matricial de redes, conforme itens a seguir, para cálculo das correntes e tensões nas barras e em todos os elementos da microrrede [67,70].

Além dos dados de arquitetura da microrrede presentes na Tabela 3.1, o programa recebe também dados de status de operação das fontes e linhas, assim como dos modos de operação (Conectado / Ilhado), sendo que, todos estes dados são inseridos por um operador do sistema. Ressalta-se que, à medida que o operador ou um intertravamento do sistema altera os status de uma linha ou de uma fonte, os valores da Tabela 3.1 são automaticamente alterados para adequação, fazendo com que o programa sempre execute os cálculos com os status atuais de operação de todas as fontes e linhas da microrrede.

3.5.1.1 Solução Matricial de Redes

Solução matricial de redes é uma metodologia que possibilita a solução de redes elétricas de grande porte utilizando sistemas computacionais, facilitando a obtenção dos resultados de tensões e correntes de operação. A mesma também pode ser utilizada para a solução de redes na presença de assimetrias, como os curtos-circuitos, calculando através de operações matriciais as tensões e correntes de falta.

Nesta metodologia, os equipamentos são representados pelos seus respectivos modelos lineares de circuito, conforme descrito anteriormente. Estes dados são incluídos em matrizes primitivas sequenciais para os cálculos. Na referência [67] consta um capítulo abordando especificamente esta metodologia e a dedução de todas as suas equações que podem ser da formulação de barras ou de malhas.

Neste trabalho é abordada a solução utilizando a formulação de barras, sendo que, somente as equações implementadas no programa para solução do circuito da microrrede proposta serão detalhadas nos itens a seguir.

3.5.2 Circuito Pré-Falta

Conforme descrito anteriormente, o circuito pré-falta consiste na situação de funcionamento em regime permanente senoidal imediatamente antes de uma falta, sendo que, a sua solução possibilita encontrar os circuitos equivalentes e a tensão de Thévenin em todas as barras da rede. Estes circuitos equivalentes serão utilizados adiante para simulação dos 5 tipos de curto-circuito citados no item 3.2.1.

O primeiro passo, após a leitura dos dados de arquitetura da microrrede, é a elaboração da matriz de incidência. Esta matriz descreve como cada elemento do circuito está interligado na arquitetura da microrrede. Como neste trabalho é utilizada a formulação de barras, a matriz utilizada é a de incidência elemento-nó reduzida. Esta matriz possuiu E colunas e N_B linhas, sendo E o número de elementos do circuito e N_B o número de barras já descontando a barra de Terra.

Os elementos da matriz podem assumir 3 valores: 1, no caso do elemento incidir saindo de uma barra (nó) da microrrede; -1, no caso do elemento incidir entrando numa barra; 0, no caso do elemento não estar conectado na barra em questão [67].

Neste ponto, existe um tópico muito importante a se abordar que interfere diretamente no programa e metodologia desenvolvidas neste trabalho.

A matriz de incidência elemento-nó reduzida é uma representação da arquitetura da microrrede. Como esta arquitetura é variável, através dos comandos do operador, esta matriz tenderia a ser variável também. Isto significa, por exemplo, que se o operador desligar a Linha A, os elementos 2 e 3 da microrrede deixarão de existir, contudo, como os elementos são numerados sequencialmente, nesta situação os elementos da Linha B passariam a ser os elementos 2 e 3 e todos os demais elementos da microrrede também seriam renumerados.

Esta situação geraria muitos problemas na análise dos dados de saída do programa e impossibilitaria a implementação de uma interface gráfica para supervisão e controle da microrrede, que será abordada no próximo capítulo.

Desta forma, optou-se por desenvolver o programa utilizando uma matriz de incidência elemento-nó reduzida fixa. Isto significa que a numeração de todos os elementos da microrrede será permanente, mesmo quando o operador da microrrede executar os comandos para abertura e fechamento das linhas ou de ligar e desligar alguma geração distribuída, alterando assim a arquitetura do circuito.

A utilização de uma matriz de incidência elemento-nó reduzida fixa também gera alguns problemas, mas que podem ser solucionados de forma mais simples. Neste caso, quando uma linha estiver aberta, o programa ajustará automaticamente os seus valores de impedâncias sequenciais para um valor extremamente alto, indicando assim que o circuito está aberto. Com isto, caso alguma linha esteja desligada, os seus respectivos valores de impedância de sequência positiva, negativa e zero serão ajustados para 10^{10} + j0 Ω, indicando circuito aberto. Foi utilizada uma carga somente resistiva para evitar interferência reativa nos cálculos.

Entretanto, apesar da impedância extremamente alta, o programa continua considerando que a respectiva linha existe, e neste caso, irá calcular as tensões e correntes pré-falta para a mesma, o que pode gerar dados residuais que interferem na solução matricial da rede. Este problema foi solucionado gerando uma sub-rotina no programa que, a partir do momento que uma linha está aberta, todos estes dados residuais são automaticamente zerados.

A situação descrita anteriormente também é válida para todas as GDs de máquinas síncronas e também a conexão com a concessionária de energia. Quando o operador desliga uma fonte ou desconecta a microrrede da rede elétrica principal, a matriz de incidência continua considerando a existência dos respectivos elementos, contudo o programa ajusta os valores das fontes para zero e das impedâncias para 10^{10} + j0 Ω, e uma sub-rotina zera os dados residuais gerados durante os cálculos.

Desta forma, considerando a arquitetura da microrrede proposta para simulação neste trabalho e a presença de todos os elementos, conforme a Tabela 3.1, a matriz de incidência elemento-nó reduzida fixa ficará conforme a equação 3.19.

Vale ressaltar que, conforme citado, a metodologia proposta pode ser aplicada para qualquer microrrede. Com isto, para cada arquitetura, a matriz de incidência será fixa e o programa possuirá as sub-rotinas para adequar o circuito e zerar os dados residuais gerados durante os cálculos.

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0- \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Após a elaboração da matriz de incidência, o programa inicia o cálculo matricial seguindo a formulação de barras para determinar as tensões e correntes nas barras e nos elementos da microrrede na condição pré-falta [67].

No primeiro passo, os dados provenientes da arquitetura da microrrede, já adequados conforme os comandos do operador, são incluídos em matrizes de impedâncias próprias (Z_P) para as 3 sequências. Em seguida, são calculadas as matrizes de admitâncias primitivas sequenciais (Y_P), conforme a equação 3.20.

$$\underbrace{\tilde{y}_P}_{(E \times E)} = \left[\underbrace{\tilde{z}_P}_{(E \times E)} \right]^{-1} \quad (3.20)$$

No segundo passo, utilizando as matrizes de incidência e de admitâncias primitivas, são calculadas as matrizes de admitâncias e impedâncias de barra sequenciais. Estas matrizes são de grande importância, pois em suas diagonais principais constam as admitâncias e impedâncias sequenciais equivalentes de Thévenin para todas as barras da microrrede. Os cálculos são conforme as equações 3.21 e 3.22.

$$\underbrace{\tilde{Y}_{Barra}}_{(N_B \times N_B)} = \underbrace{\tilde{A}}_{(N_B \times E)} \cdot \underbrace{\tilde{y}_P}_{(E \times E)} \cdot \underbrace{\tilde{A}^t}_{(E \times N_B)} \tag{3.21}$$

$$\underbrace{\tilde{Z}_{Barra}}_{(N_B \times N_B)} = \left[\underbrace{\tilde{Y}_{Barra}}_{(N_B \times N_B)} \right]^{-1} \tag{3.22}$$

No terceiro passo, o programa cria o vetor (*e*) com as fontes de tensão relativas aos elementos da microrrede, utilizando os dados de arquitetura da Tabela 3.1. A partir do vetor (*e*), o programa calcula o vetor das fontes de corrente equivalentes (*j*). Este vetor de fontes de correntes equivalentes não deve ser confundido com as fontes de correntes dos sistemas fotovoltaicos. O mesmo é somente um recurso matemático que o programa faz utilizando o negativo da multiplicação da matriz de admitâncias primitivas pelo vetor das fontes de tensão da microrrede, conforme a equação 3.23.

$$\underbrace{\bar{j}}_{(E \times 1)} = - \underbrace{\tilde{y}_P}_{(E \times E)} \cdot \underbrace{\bar{e}}_{(E \times 1)} \tag{3.23}$$

No quarto passo, o programa calcula os vetores de correntes e tensões de barra sequenciais para a microrrede. Os vetores de correntes de barra representam o somatório das correntes injetadas em cada barra da microrrede, considerando todas as fontes de tensão. Os vetores de tensão de barra representam as tensões equivalentes de Thévenin para todas as barras da microrrede. Estas tensões são de grande importância, pois serão utilizadas juntamente com as impedâncias equivalentes nos cálculos de curto-circuito abordados no item seguinte. Os vetores são calculados conforme as equações 3.24 e 3.25.

$$\underbrace{\bar{I}_{Barra}}_{(N_B \times 1)} = \underbrace{\tilde{A}}_{(N_B \times E)} \cdot \underbrace{\bar{j}}_{(E \times 1)} \tag{3.24}$$

$$\underbrace{\bar{V}_{Barra}}_{(N_B \times 1)} = \underbrace{\tilde{Z}_{Barra}}_{(N_B \times N_B)} \cdot \underbrace{\bar{I}_{Barra}}_{(N_B \times 1)} \tag{3.25}$$

No quinto e último passo, são calculados os vetores de tensões e correntes em cada elemento da microrrede para a condição pré-falta. Observa-se que o vetor das correntes nos elementos é o principal dado de saída, pois o mesmo será utilizado na metodologia da superposição para calcular as correntes totais da microrrede em situação de falta.

Os vetores de tensões e correntes sequenciais em cada elemento são calculados conforme as equações 3.26 e 3.27.

$$\underset{(E\ x\ 1)}{\underline{\overline{V}}} = \underset{(E\ x\ N_B)}{\underline{\tilde{A}^t}} \cdot \underbrace{\overline{V}_{Barra}}_{(N_B\ x\ 1)} \tag{3.26}$$

$$\underset{(E\ x\ 1)}{\underline{\overline{i}}} = \underbrace{\underline{\tilde{y}_P}}_{(E\ x\ E)} \cdot \underset{(E\ x\ 1)}{\underline{\overline{v}}} - \underset{(E\ x\ 1)}{\underline{\overline{j}}} \tag{3.27}$$

Todos os dados obtidos no cálculo do circuito pré-falta são armazenados em suas respectivas matrizes e vetores sequenciais. Quando o operador da microrrede realiza alguma alteração nos status das fontes ou linhas, todos os cálculos são executados novamente e os novos resultados são armazenados.

É importante ressaltar que, apesar da microrrede proposta para simulação neste trabalho possuir 12 elementos e 8 barras (incluindo as virtuais), o programa desenvolvido é capaz de executar os cálculos para qualquer circuito, sendo somente necessário incluir os elementos e sua arquitetura de interligação de barras na matriz representada na Tabela 3.1.

Como este estudo é realizado utilizando componentes simétricas, todas as matrizes e vetores são calculados para as 3 sequências (positiva, negativa e zero). Uma observação é no caso dos vetores de fontes de tensão e fontes de corrente equivalentes, pois conforme citado, este estudo aborda redes trifásicas equilibradas e simétricas e, neste caso, quando as componentes de fase são convertidas para componentes simétricas, o resultado possui somente sequência positiva.

Contudo, o programa foi desenvolvido para contemplar a possibilidade de aplicação futura em redes trifásicas desequilibradas, sendo necessários ajustes que serão discutidos no capítulo final deste trabalho. Desta forma, apesar dos vetores de fontes de tensão e fontes de correntes equivalentes de sequência negativa e zero serem nulos, os mesmo já estão incluídos nos cálculos matriciais.

3.5.3 Cálculo de Curtos-Circuitos

Após o cálculo do circuito pré-falta, o programa executa uma rotina que simula os 5 tipos de curtos-circuitos em todas as barras da microrrede, calculando as correntes totais de falta para as 3 sequências (positiva, negativa e zero).

Para cada tipo de curto-circuito, os circuitos sequenciais equivalentes de Thévenin, indicados anteriormente na Figura 3.6, assumem novas interligações, que são representadas pelas equações 3.28 a 3.38, conforme os itens a seguir [67].

Uma observação é relativa às resistências de falta R_F e de neutro R_N, pois as mesmas são parâmetros de entrada no programa desenvolvido, podendo assumir qualquer valor. Contudo, para as simulações executadas neste trabalho, foi considerado R_F igual a zero e faltas francas para terra, ou seja, R_N também é zero.

- Curto-Circuito do Tipo AT

Correntes de falta de sequência zero, positiva e negativa (I_{FS-0}, I_{FS-1} e I_{FS-2}), onde (V_{Barra}) e (Z_{Barra}) são respectivamente as tensões e impedâncias sequênciais equivalentes de Thévenin nas barras onde ocorrem as faltas:

$$I_{FS-0} = I_{FS-1} = I_{FS-2} = \frac{V_{Barra-1}}{\left(Z_{Barra-0} + Z_{Barra-1} + Z_{Barra-2}\right) + \left(3 \cdot R_F\right)} \tag{3.28}$$

Todos os valores de (V_{Barra}) e (Z_{Barra}) foram calculados no circuito pré-falta, sendo adequados a medida que o programa executa as simulações em cada barra.

- Curto-Circuito do Tipo BC:

Correntes de falta de sequência zero, positiva e negativa (I_{FS-0}, I_{FS-1} e I_{FS-2}):

$$I_{FS-0} = 0 \tag{3.29}$$

$$I_{FS-1} = \frac{V_{Barra-1}}{\left(Z_{Barra-1} + Z_{Barra-2}\right) + \left(2 \cdot R_F\right)} \tag{3.30}$$

$$I_{FS-2} = -I_{FS-1} \tag{3.31}$$

- Curto-Circuito do Tipo BCT:

Correntes de falta de sequência zero, positiva e negativa (I_{FS-0}, I_{FS-1} e I_{FS-2}):

$$I_{FS-1} = \frac{V_{Barra-1}}{\left(Z_{Barra-1} + R_F\right) + \left\{\left[Z_{Barra-0} + R_F + \left(3 \cdot R_N\right)\right] // \left(Z_{Barra-2} + R_F\right)\right\}} \tag{3.32}$$

$$I_{FS-0} = -I_{FS-1} \cdot \frac{Z_{Barra-2} + R_F}{\left[Z_{Barra-0} + R_F + \left(3 \cdot R_N\right)\right] + \left(Z_{Barra-2} + R_F\right)} \tag{3.33}$$

$$I_{FS-2} = -I_{FS-1} \cdot \frac{Z_{Barra-0} + R_F + \left(3 \cdot R_N\right)}{\left[Z_{Barra-0} + R_F + \left(3 \cdot R_N\right)\right] + \left(Z_{Barra-2} + R_F\right)} \tag{3.34}$$

- Curto-Circuito do Tipo ABC:

Correntes de falta de sequência zero, positiva e negativa (I_{FS-0}, I_{FS-1} e I_{FS-2}):

$$I_{FS-1} = \frac{V_{Barra-1}}{\left(Z_{Barra-1} + R_F\right)} \tag{3.35}$$

$$I_{FS-0} = I_{FS-2} = 0 \tag{3.36}$$

- Curto-Circuito do Tipo ABCT:

Correntes de falta de sequência zero, positiva e negativa (I_{FS-0}, I_{FS-1} e I_{FS-2}):

$$I_{FS-1} = \frac{V_{Barra-1}}{\left(Z_{Barra-1} + R_F\right)} \tag{3.37}$$

$$I_{FS-0} = I_{FS-2} = 0 \tag{3.38}$$

As correntes de falta para curtos-circuitos do tipo ABC e ABCT ficaram iguais entre si, pois as simulações, assim como as demais, foram executadas considerando uma rede trifásica equilibrada. Caso a rede fosse desequilibrada, existiriam tensões de sequência negativa e zero, o que implicaria na necessidade de ajustes nas equações implementadas para todos os tipos de curtos. Neste caso, as correntes para curtos do tipo ABC e ABCT seriam iguais somente para as sequências positiva e negativa, pois em redes desequilibradas, existe circulação de corrente de sequência zero somente para curtos-circuitos com terra (AT, BCT e ABCT).

Uma vez calculadas as correntes totais de falta para os 5 tipos de curtos-circuitos, o programa utiliza as mesmas equações da formulação de barras para cálculo das tensões e correntes de barra e em cada um dos elementos do circuito.

Inicialmente, o programa cria as matrizes sequenciais de correntes de barra para o circuito puro de falta. Estas matrizes, para cada tipo de curto-circuito, consistem nos valores de correntes calculados na simulação anterior, com o sinal invertido. Isto se deve pois, inicialmente no circuito pré-falta, as correntes de barras eram o somatório das correntes injetadas em cada barra da microrrede, entretanto, no circuito puro de falta, as correntes totais saem das barras, por isto os sinais são invertidos.

Uma vez obtidas as matrizes de correntes sequenciais de barra para o circuito puro de falta (I_{Bpf}), o programa utiliza a equação 3.39 para cálculo das matrizes de tensões de barra (V_{Bpf}). Estas são as tensões sequenciais que se estabelecem nas barras onde ocorrem as faltas.

$$\underbrace{\tilde{V}_{Bpf}}_{(N_B \times N_B)} = \underbrace{\tilde{Z}_{Barra}}_{(N_B \times N_B)} \cdot \underbrace{\tilde{I}_{Bpf}}_{(N_B \times N_B)} \tag{3.39}$$

Após os cálculos das matrizes de tensões de barra, o programa calcula as matrizes de tensões (v_{pf}) e correntes (i_{pf}) em cada elemento da microrrede para a condição puro de falta. As matrizes de correntes em cada elemento são os dados principais de saída desta etapa do programa, pois os mesmos serão utilizados adiante para cálculo das correntes totais de curto-circuito da microrrede.

As matrizes de tensões e correntes sequenciais em cada elemento são calculadas conforme as equações 3.40 e 3.41.

$$\underbrace{\tilde{v}_{pf}}_{(E \times N_B)} = \underbrace{\tilde{A}^t}_{(E \times N_B)} \cdot \underbrace{\tilde{V}_{Bpf}}_{(N_B \times N_B)} \tag{3.40}$$

$$\underbrace{\tilde{i}_{pf}}_{(E \times N_B)} = \underbrace{\tilde{y}_P}_{(E \times E)} \cdot \underbrace{\tilde{v}_{pf}}_{(E \times N_B)} \tag{3.41}$$

Um ponto interessante a se observar é que no cálculo das correntes nos elementos no circuito pré-falta, existia o vetor (j) das fontes de correntes equivalentes na equação. Contudo, para o cálculo do circuito puro de falta, este fator não entra na equação, pois neste circuito, nenhum elemento possui fonte de tensão, conforme pode ser observado também na Figura 3.5, apresentada anteriormente.

Nesta etapa do programa, onde são simulados os curtos-circuitos, os cálculos são executados para as 3 sequências e para todas as barras da microrrede. Desta forma, o programa cria um ciclo que segue o número de barras da microrrede (N_B) e executa as simulações, armazenando os resultados nas colunas de matrizes. É por isto que no circuito pré-falta existiam vetores de tensões e correntes de barra e nos elementos e, no circuito puro de falta, existem matrizes para estes resultados.

A Tabela 3.2 a seguir apresenta os dados de saída desta etapa do programa.

Tabela 3.2 – Dados de Saída do Cálculo de Curto-Circuito.

Tipo de Curto-Circuito	Matrizes de Saída	Dimensões	Descrição
AT	I_{FS-AT}	$3 \times N_B$	Matrizes de Correntes Totais de Falta, Correntes e Tensões de Barra e Correntes e Tensões nos Elementos para as sequências zero, positiva e negativa, considerando faltas do tipo AT nas barras da microrrede.
	$I_{Bpf-0-AT}$ / $I_{Bpf-1-AT}$ / $I_{Bpf-2-AT}$	$N_B \times N_B$	
	$V_{Bpf-0-AT}$ / $V_{Bpf-1-AT}$ / $V_{Bpf-2-AT}$	$N_B \times N_B$	
	$i_{pf-0-AT}$ / $i_{pf-1-AT}$ / $i_{pf-2-AT}$	$E \times N_B$	
	$v_{pf-0-AT}$ / $v_{pf-1-AT}$ / $v_{pf-2-AT}$	$E \times N_B$	
BC	I_{FS-BC}	$3 \times N_B$	Matrizes de Correntes Totais de Falta, Correntes e Tensões de Barra e Correntes e Tensões nos Elementos para as sequências zero, positiva e negativa, considerando faltas do tipo BC nas barras da microrrede.
	$I_{Bpf-0-BC}$ / $I_{Bpf-1-BC}$ / $I_{Bpf-2-BC}$	$N_B \times N_B$	
	$V_{Bpf-0-BC}$ / $V_{Bpf-1-BC}$ / $V_{Bpf-2-BC}$	$N_B \times N_B$	
	$i_{pf-0-BC}$ / $i_{pf-1-BC}$ / $i_{pf-2-BC}$	$E \times N_B$	
	$v_{pf-0-BC}$ / $v_{pf-1-BC}$ / $v_{pf-2-BC}$	$E \times N_B$	
BCT	I_{FS-BCT}	$3 \times N_B$	Matrizes de Correntes Totais de Falta, Correntes e Tensões de Barra e Correntes e Tensões nos Elementos para as sequências zero, positiva e negativa, considerando faltas do tipo BCT nas barras da microrrede.
	$I_{Bpf-0-BCT}$ / $I_{Bpf-1-BCT}$ / $I_{Bpf-2-BCT}$	$N_B \times N_B$	
	$V_{Bpf-0-BCT}$ / $V_{Bpf-1-BCT}$ / $V_{Bpf-2-BCT}$	$N_B \times N_B$	
	$i_{pf-0-BCT}$ / $i_{pf-1-BCT}$ / $i_{pf-2-BCT}$	$E \times N_B$	
	$v_{pf-0-BCT}$ / $v_{pf-1-BCT}$ / $v_{pf-2-BCT}$	$E \times N_B$	
ABC	I_{FS-ABC}	$3 \times N_B$	Matrizes de Correntes Totais de Falta, Correntes e Tensões de Barra e Correntes e Tensões nos Elementos para as sequências zero, positiva e negativa, considerando faltas do tipo ABC nas barras da microrrede.
	$I_{Bpf-0-ABC}$ / $I_{Bpf-1-ABC}$ / $I_{Bpf-2-ABC}$	$N_B \times N_B$	
	$V_{Bpf-0-ABC}$ / $V_{Bpf-1-ABC}$ / $V_{Bpf-2-ABC}$	$N_B \times N_B$	
	$i_{pf-0-ABC}$ / $i_{pf-1-ABC}$ / $i_{pf-2-ABC}$	$E \times N_B$	
	$v_{pf-0-ABC}$ / $v_{pf-1-ABC}$ / $v_{pf-2-ABC}$	$E \times N_B$	
ABCT	$I_{FS-ABCT}$	$3 \times N_B$	Matrizes de Correntes Totais de Falta, Correntes e Tensões de Barra e Correntes e Tensões nos Elementos para as sequências zero, positiva e negativa, considerando faltas do tipo ABCT nas barras da microrrede.
	$I_{Bpf-0-ABCT}$ / $I_{Bpf-1-ABCT}$ / $I_{Bpf-2-BCT}$	$N_B \times N_B$	
	$V_{Bpf-0-ABCT}$ / $V_{Bpf-1-ABCT}$ / $V_{Bpf-2-BCT}$	$N_B \times N_B$	
	$i_{pf-0-ABCT}$ / $i_{pf-1-ABCT}$ / $i_{pf-2-ABCT}$	$E \times N_B$	
	$v_{pf-0-ABCT}$ / $v_{pf-1-ABCT}$ / $v_{pf-2-ABCT}$	$E \times N_B$	

- NOTA: No caso das matrizes de correntes totais de falta (I_{FS}), os resultados para as 3 sequências são armazenados nas linhas das matrizes e os resultados para as simulações nas barras são armazenados sucessivamente em cada coluna.

Assim como no circuito pré-falta, quando o operador da microrrede realiza alguma alteração nos status das fontes ou linhas, todos os cálculos são executados novamente e os novos resultados são armazenados. Outro ponto é que o programa foi desenvolvido para cálculos em microrredes de qualquer dimensão, sendo necessário somente incluir os elementos e sua arquitetura de interligação de barras na matriz representada na Tabela 3.1, vista anteriormente.

3.5.4 Circuito Pós-Falta

Para o cálculo do circuito pós-falta, basta somar os vetores de tensões e correntes sequenciais pré-falta nas barras e nos elementos, a cada uma das colunas das respectivas matrizes calculadas durante a simulação de curto-circuito. Estes cálculos consideram as 60 matrizes de tensões e correntes obtidas na simulação anterior de curto-circuito e indicadas na Tabela 3.2. O ciclo desenvolvido no programa varre as matrizes fazendo a soma nas colunas conforme indicado nas equações 3.42 a 3.45.

$$\underbrace{\tilde{V}_{Bfalt}}_{(N_B \times N_B)} = \underbrace{\overline{V}_{Barra}}_{(N_B \times 1)} + \underbrace{\tilde{V}_{Bpf}}_{(N_B \times N_B)} \tag{3.42}$$

$$\underbrace{\tilde{I}_{Bfalt}}_{(N_B \times N_B)} = \underbrace{\overline{I}_{Barra}}_{(N_B \times 1)} + \underbrace{\tilde{I}_{Bpf}}_{(N_B \times N_B)} \tag{3.43}$$

$$\underbrace{\tilde{v}_{falt}}_{(E \times N_B)} = \underbrace{\overline{V}}_{(E \times 1)} + \underbrace{\tilde{v}_{pf}}_{(E \times N_B)} \tag{3.44}$$

$$\underbrace{\tilde{i}_{falt}}_{(E \times N_B)} = \underbrace{\overline{i}}_{(E \times 1)} + \underbrace{\tilde{i}_{pf}}_{(E \times N_B)} \tag{3.45}$$

Estes resultados consistem no circuito equivalente em situação de falta para todos os 5 tipos de curtos-circuitos e considerando todas as barras da microrrede. Esta é a primeira etapa da superposição e, posteriormente, os resultados obtidos aqui referentes às correntes nos elementos serão somados aos resultados obtidos no cálculo para os sistemas fotovoltaicos, obtendo assim as matrizes totais de correntes de curto-circuito para todos os elementos da microrrede.

3.6 Metodologia para Sistemas Fotovoltaicos

Conforme citado anteriormente neste trabalho, em situações de curto-circuito, os sistemas fotovoltaicos instaladas na microrrede comportam-se como fontes de corrente. Na ocorrência de uma falta, seus valores sobem somente até um limite previamente ajustado nos inversores de frequência. Devido a esta diferença de comportamento, o cálculo da contribuição dos sistemas fotovoltaicos na corrente total de curto-circuito será executado conforme nova metodologia desenvolvida [70].

Considerando a microrrede proposta para simulação neste trabalho, existem 3 gerações distribuídas provenientes de sistemas fotovoltaicos, GF01, GF02 e GF03, conectadas respectivamente nas barras 2, 3 e 4. As correntes operacionais destes sistemas dependem de suas dimensões (quantidade de painéis fotovoltaicos), eficiência dos painéis e da irradiação e ângulo de incidência de sol na região onde se encontra a instalação. Estes fatores são melhores abordados em estudos visando de forma específica projetos de sistemas fotovoltaicos, o que não é o foco deste trabalho. Desta forma, cita-se aqui a referência [71] relativa aos cálculos e projetos de sistemas fotovoltaicos, caso o leitor queira se aprofundar neste tema.

De forma a possibilitar uma estimativa das dimensões dos sistemas fotovoltaicos utilizados na microrrede, é proposta uma abordagem de cálculo simplificada da quantidade aproximada de painéis para cada sistema. A partir dos valores de tensão e corrente operacionais, determina-se a potência total para cada fase. Dividindo esta potência pela potência nominal de um painel fotovoltaico, tem-se a quantidade de painéis para cada fase. Multiplicando este valor por 3, obtém-se a quantidade total de painéis para cada sistema fotovoltaico da microrrede, conforme a equação 3.46.

$$NP = \frac{\left(V_{Operação} \,/\, \sqrt{3}\right) \times I_{Operação} \times 3}{P_{Painel}} \tag{3.46}$$

Onde:

NP: Número de painéis fotovoltaicos considerando as 3 fases.

$V_{Operação}$: Tensão fase-fase de operação da microrrede.

$I_{Operação}$: Corrente operacional dos sistemas fotovoltaicos.

P_{Painel}: Potência nominal dos painéis fotovoltaicos.

Como este trabalho visa desenvolver uma nova metodologia de cálculo das correntes de curto-circuito, serão atribuídos valores de correntes nominais para os 3 sistemas fotovoltaicos utilizados na microrrede proposta, considerando operações de grande porte, como instalações industriais. Estas correntes serão respectivamente 200 A, 150 A e 100 A para os sistemas GF01, GF02 e GF03.

Para os cálculos, foi considerada a utilização de painéis MAXPOWER modelo CS6U-345M do fabricante CanadianSolar, conforme dados técnicos presentes no Anexo A. Estes painéis possuem 345 W de potência nominal máxima.

Fazendo a substituição dos valores, calcula-se a quantidade de painéis para o sistema fotovoltaico GF01 conforme a equação 3.47:

$$NP_{GF01} = \frac{\left(13{,}8\,kV / \sqrt{3}\right) \times 200\,A \times 3}{345\,W} = 13.856 \cong 14.000 \tag{3.47}$$

A quantidade de painéis para o sistema GF02 é calculada conforme a equação 3.48:

$$NP_{GF02} = \frac{\left(13{,}8\,kV / \sqrt{3}\right) \times 150\,A \times 3}{345\,W} = 10.392 \cong 10.500 \tag{3.48}$$

A quantidade de painéis para o sistema GF03 é calculada conforme a equação 3.49:

$$NP_{GF03} = \frac{\left(13{,}8\,kV / \sqrt{3}\right) \times 100\,A \times 3}{345\,W} = 6.928 \cong 7.000 \tag{3.49}$$

Para as correntes de falta, será considerado que os inversores de frequência serão parametrizados de forma que as mesmas sejam 1,2 vezes o valor das correntes nominais. Com isto, os dados dos sistemas fotovoltaicos da microrrede foram incluídos no programa desenvolvido através de uma matriz conforme a Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Características dos Sistemas Fotovoltaicos.

Elemento	De	Para	Tensão de Saída (kV)	Corrente Nominal (A)	Corrente de Falta (A)
13	0	2	13,8	200	240
14	0	3	13,8	150	180
15	0	4	13,8	100	120

- NOTA: O quantitativo de painéis obtidos é somente uma estimativa. Para um projeto real, deve-se aplicar normas e critérios específicos para cálculos [71].

De acordo com a metodologia proposta, as correntes totais de falta resultantes nos elementos serão os somatórios das correntes de cada sistema fotovoltaico para simulações de curtos-circuitos em cada barra da microrrede. Para calcular estes valores, deve-se considerar as barras onde ocorrem as faltas, assim como os status de operação dos sistemas fotovoltaicos e das linhas de distribuição. Os status de operação dos sistemas determinam se os mesmos estarão ativos para fornecimento de corrente, os status das linhas de distribuição definem a arquitetura do circuito utilizada na simulação e as barras onde ocorrem as faltas determinam, juntamente com os status das linhas, se um sistema estará habilitado para fornecer corrente para um elemento em específico em caso de falta na barra em questão.

Com isto, foi elaborada uma metodologia de cálculo utilizando operações matriciais, sendo que, as matrizes envolvidas são variáveis de acordo com os status dos sistemas fotovoltaicos e linhas da microrrede. O resultado destas operações é uma matriz com E elementos e N_B colunas, adequada para aplicação da superposição com o resultado do circuito pós-falta obtido anteriormente. Este resultado consiste nas correntes totais de curto-circuito para todos os elementos da microrrede.

Inicialmente, propõem-se a equação 3.50 a seguir para o cálculo de correntes totais de curto-circuito em um elemento, considerando a falta em uma barra específica:

$$i_{fotE} = \sum_{i=1}^{E_F} (b_{ef(i)} \cdot s_{gf(i)} \cdot IF_{gf(i)} \cdot w_{fb(i)}) \tag{3.50}$$

Onde:

i_{fotE}: Corrente de falta de um elemento considerando os sistemas fotovoltaicos.

E_F: Número de sistemas fotovoltaicos presentes na microrrede.

b_{ef}: Habilita e indica sentido da corrente dos sistemas para os elementos.

s_{gf}: Status de operação dos sistemas fotovoltaicos (1 é ligado e 0 é desligado).

IF_{gf}: Corrente total de falta proveniente de um sistema fotovoltaico.

w_{fb}: Habilita se o sistema fornece corrente ao elemento conforme barra de falta.

Pela equação, considerando a falta em uma barra da microrrede, a corrente total em um elemento deve considerar as correntes de falta de cada sistema, os status de operação dos mesmos, o sentido de circulação desta corrente para os elementos e a habilitação de circulação de acordo a barra onde ocorre a falta. A equação, assim como seus fatores, serão convertidos em matrizes e detalhados nos itens seguintes.

3.6.1 Matriz de Correntes das Fontes para os Elementos

A equação 3.50, é proposta para cálculo das correntes totais em um elemento da microrrede considerando a falta em uma barra específica, contudo, a metodologia proposta neste trabalho visa calcular as correntes totais em todos os elementos, considerando todas as barras da microrrede e realizando os cálculos em um único ciclo do programa desenvolvido. Desta forma, cada item da equação será transformado em uma matriz, de forma a abranger todos os elementos e barras, sendo que, conforme citado, o resultado final destas operações é uma matriz com E elementos e N_B colunas adequada para aplicação da superposição.

Inicialmente o programa cria 3 novas matrizes: IF e S possuem dimensões E_F x E_F, são diagonais e possuem respectivamente os valores de corrente de falta dos sistemas fotovoltaicos e seus status operacionais s_{gf} (ligado/desligado, 1 ou 0). Também é criada a matriz B, que possui E linhas e E_F colunas. Esta matriz é composta pelos fatores b_{ef} que correspondem aos elementos e às fontes da microrrede. Conforme os status das linhas de distribuição, o programa lê os dados de arquitetura da microrrede e indica através dos fatores b_{ef} se uma fonte fornece corrente a um elemento e em qual sentido, ou seja, os fatores b_{ef} serão sempre 0, 1 ou -1. O produto destas 3 matrizes, resulta na matriz intermediária D, que indica as correntes que cada fonte fornecerá aos elementos da microrrede considerando módulo e sentido. As equações 3.51 e 3.52 indicam as matrizes e operações.

$$\underset{(E\ x\ EF)}{\underset{\sim}{\tilde{D}}} = \underset{(E\ x\ EF)}{\underset{\sim}{\tilde{B}}} \cdot \underset{(EF\ x\ EF)}{\underset{\sim}{\tilde{S}}} \cdot \underset{(EF\ x\ EF)}{\underset{\sim}{\tilde{IF}}} \tag{3.51}$$

$$\tilde{D} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1f} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2f} \\ b_{31} & b_{32} & \dots & b_{3f} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{e1} & b_{e2} & \dots & b_{ef} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_{gf1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_{gf1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{gfn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} IF_{gf1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & IF_{gf2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & IF_{gfn} \end{bmatrix} \tag{3.52}$$

A microrrede proposta possui 3 sistemas fotovoltaicos, com isto, as matrizes IF e S serão 3 x 3 e a matriz D de correntes das fontes para os elementos será E x 3. Contudo, as equações indicam que as matrizes podem ser de ordem maior, pois a metodologia pode ser aplicada em microrredes de qualquer dimensão e com inúmeras gerações fotovoltaicas ou outras tecnologias interfaceadas por inversores.

3.6.2 Matriz de Correntes Totais de Curto em Todas as Barras

Uma vez calculada a matriz *D* de correntes das fontes para os elementos, é necessário saber se uma fonte em específico estará habilitada a fornecer corrente para cada um dos elementos e considerando faltas em cada barra da microrrede. Para isto, o programa desenvolvido cria uma matriz dinâmica *W* com E_F linhas e N_B colunas, representando os sistemas fotovoltaicos e barras da microrrede. Esta matriz é composta pelos fatores w_{fb}. Através dos dados de arquitetura da microrrede, o programa indica através destes fatores se uma fonte fornece corrente ao elemento para curto em uma determinada barra. Com isto, fatores w_{fb} serão sempre 0 ou 1.

A multiplicação das matrizes *D* e *W*, conforme equações 3.53 e 3.54, resulta na matriz i_{fot}, que é o somatório dos sistemas habilitados para fornecer corrente aos elementos para faltas em todas as barras, ou seja, é a matriz de correntes totais de curto para os sistemas fotovoltaicos. Ressalta-se que, a matriz *W* é dinâmica e se altera à medida que o programa lê as linhas da matriz *D* e executa as multiplicações.

$$\underbrace{\tilde{i}_{fot}}_{(E \times N_B)} = \underbrace{\tilde{D}}_{(E \times E_F)} \cdot \underbrace{\tilde{W}}_{(E_F \times N_B)} \tag{3.53}$$

$$\tilde{i}_{fot} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1f} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2f} \\ d_{31} & d_{32} & \dots & d_{3f} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{e1} & d_{e2} & \dots & d_{ef} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & w_{13} & \dots & w_{1b} \\ w_{21} & w_{22} & w_{23} & \dots & w_{2b} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{f1} & w_{f2} & w_{f3} & \dots & w_{fb} \end{bmatrix} \tag{3.54}$$

A matriz *W* obtida para a microrrede proposta possui 3 linhas e 8 colunas, representando os sistemas fotovoltaicos e barras. Contudo, assim como no caso da matriz *D*, as equações indicam que as matrizes podem ser de ordem maior, pois a metodologia pode ser aplicada em microrredes de qualquer dimensão.

3.7 Cálculo das Correntes Totais de Curto-Circuito

O programa de cálculo das correntes totais de curto-circuito, desenvolvido conforme itens anteriores e considerando as máquinas síncronas e sistemas fotovoltaicos, foi implementado no Matlab conforme o diagrama de blocos da Figura 3.8 a seguir:

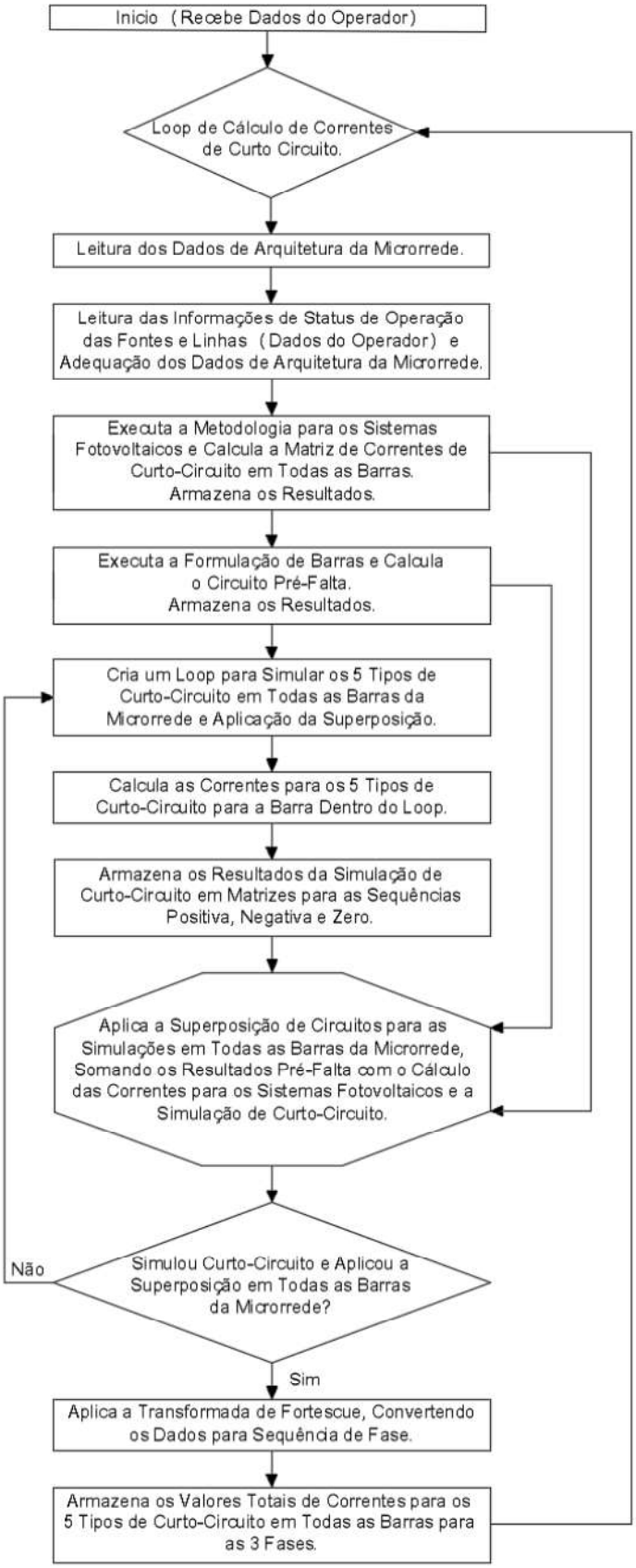


Figura 3.8 – Algoritmo para Cálculo de Correntes Totais de Curto-Circuito.

A idéia básica do programa é a aplicação da superposição dos resultados pré-falta, puro de falta e dos sistemas fotovoltaicos, obtendo-se assim as correntes totais de curto-circuito para todos os elementos da microrrede. Esta formulação aplica a equação 3.55, que é uma evolução da equação 3.45.

Como o objetivo do programa é o cálculo das correntes totais de curto-circuito para posterior aplicação nos ajustes dos relés de proteção, a superposição para o circuito total é realizada somente para as correntes nos elementos. As matrizes obtidas no cálculo da superposição considerando as máquinas síncronas, conforme a Tabela 3.2, continuarão existindo, mas a superposição final considerando os sistemas fotovoltaicos é aplicada somente para as correntes totais nos elementos.

$$\underbrace{\tilde{I}_{tot}}_{(E\ x\ N_B)} = \underbrace{\overline{I}}_{(E\ x\ 1)} + \underbrace{\tilde{I}_{pf}}_{(E\ x\ N_B)} + \underbrace{\tilde{I}_{fot}}_{(E\ x\ N_B)} \rightarrow \underbrace{\tilde{I}_{tot}}_{(E\ x\ N_B)} = \underbrace{\tilde{I}_{falt}}_{(E\ x\ N_B)} + \underbrace{\tilde{I}_{fot}}_{(E\ x\ N_B)} \tag{3.55}$$

Inicialmente o programa recebe os dados de entrada, inseridos pelo operador, referentes aos status das linhas e das GDs. A partir destes dados, o programa inicia um ciclo de cálculo das correntes de curto-circuito. É realizada a leitura dos dados de arquitetura da microrrede, inseridos através das matrizes representadas pelas Tabelas 3.1 e 3.3, e a adequação das matrizes de acordo com os dados do operador. Em seguida, o programa executa a metodologia para os sistemas fotovoltaicos e armazena os resultados. Após esta etapa, o programa executa a formulação de barras para o circuito pré-falta e também armazena os resultados.

Após as etapas iniciais, o programa inicia um ciclo para simular e calcular os 5 tipos de curtos-circuitos, obtendo assim o circuito puro de falta. Neste ponto, existe uma diferença entre o desenvolvimento da metodologia abordada no item 3.5 e sua implementação no programa. Isto se deve ao fato de que no item 3.5 os 5 tipos de curtos-circuitos são calculados e armazenados em matrizes, conforme a Tabela 3.2, e posteriormente um ciclo varre as colunas das matrizes fazendo a soma do circuito puro de falta com o circuito pré-falta, obtendo o circuito pós-falta. Na implementação no Matlab, com o objetivo de se obter maior agilidade no programa e facilidade de implementação, é realizado o cálculo dos 5 tipos de curtos-circuitos para uma barra e executada a superposição com o circuito pré-falta e também com o resultado dos sistemas fotovoltaicos. Os dados são armazenados na primeira coluna das matrizes e posteriormente o programa calcula os 5 tipos de curtos-circuitos para a próxima barra e sucessivamente vai executando a superposição.

Desta forma, a cada ciclo de cálculos de curto-circuito, obtém-se uma coluna da matriz com os resultados totais e, após o fechamento do ciclo, obtém-se a matriz completa com os dados para todas as barras da microrrede considerando as fontes de máquinas síncronas e os sistemas fotovoltaicos.

Apesar desta modificação na implementação, que busca a eficiência e agilidade do programa, os cálculos e resultados são exatamente os mesmos. A única diferença é que, inicialmente propôs-se o cálculo individual de cada parte da metodologia, e na implementação do programa, somente a metodologia para os sistemas fotovoltaicos e a metodologia de barras utilizada no circuito pré-falta foram realizadas de forma individual, sendo que, os cálculos de curtos-circuitos e a aplicação da superposição são realizados simultaneamente a cada ciclo do programa.

Após a simulação, o programa aplica a transformada de Fortescue para obter as correntes totais de curto-circuito em componentes de fase e armazena os resultados. Então, o programa volta ao ciclo inicial, onde faz nova leitura dos dados do operador e executa os cálculos caso os status das fontes ou das linhas sejam alterados.

3.8 Considerações Finais

Existem 3 importantes considerações relativas à aplicação da metodologia da superposição e também aos recursos operacionais do programa desenvolvido que serão abordadas para encerramento deste capítulo:

A primeira consideração é relativa à primeira etapa de superposição. Conforme as equações 3.42 a 3.45, é realizada a primeira etapa considerando somente as fontes de máquinas síncronas, onde se obtém o circuito pós-falta para as tensões e correntes de barra e tensões e correntes nos elementos. Estes resultados, apesar de não serem utilizados para os ajustes de corrente dos relés de proteção, são calculados pelo programa e também convertidos para componentes de fase e armazenados. Estes cálculos acontecem no mesmo ciclo de superposição total, sendo que, é realizada somente a soma dos resultados pré-falta e puro de falta. Estes dados são importantes, pois possibilitam a análise da metodologia e também a comparação das correntes nos elementos com e sem os sistemas fotovoltaicos.

A segunda consideração é relativa à etapa final de superposição, onde são consideradas as fontes fotovoltaicas. Conforme a equação 3.55, esta etapa de superposição simplesmente adiciona a matriz (i_{fot}), obtida na metodologia das fontes fotovoltaicas, ao resultado do circuito pós-falta. Neste ponto, ressalta-se que, como os inversores utilizados geram tensões e correntes equilibradas e simétricas, sempre que ocorrer uma falta, não importando o tipo, as correntes injetadas na microrrede serão equilibradas e simétricas, mas com os módulos conforme as correntes de falta presentes na Tabela 3.3. Entretanto, como os cálculos de superposição são realizados utilizando componentes simétricas, quando é aplicada a Transformada de Fortescue nestas correntes, obtém-se somente a sequência positiva, ou seja, as sequências zero e negativa são nulas. Desta forma, a etapa final de superposição indicada na equação 3.55 considera somente a sequência positiva para o termo (i_{fot}).

A terceira consideração é referente aos recursos para comandos do operador da microrrede. A metodologia, conforme citado, pode ser aplicada para microrredes de qualquer dimensão e com inúmeras fontes de energia, contudo, na implementação do programa, alguns recursos foram customizados para fornecer funcionalidades específicas para a microrrede proposta. Estes recursos são relativos principalmente à possibilidade de alteração dos status de operação das fontes e linhas da microrrede, assim como nos modos de operação conectado com a rede elétrica principal e ilhado. Um dos principais benefícios na implantação destas funcionalidades é a possibilidade de desenvolvimento de uma interface gráfica para supervisão e controle da microrrede, que será abordada mais detalhadamente no capítulo seguinte. Acrescenta-se também que, estas funcionalidades operacionais podem ser implementadas para outras arquiteturas de microrredes, mantendo sempre constante a metodologia de cálculo desenvolvida aqui neste trabalho.

De forma a esclarecer melhor para o leitor sobre os dados de saída do programa, foi elaborada a Tabela 3.4, constando todas as matrizes em componentes de fase dos resultados obtidos com a metodologia desenvolvida. Como são diversas variáveis calculadas para os 5 tipos de curtos-circuitos, verifica-se pela tabela o grande volume de dados obtidos no programa implementado. Assim como no caso das matrizes (I_{FS}), para as matrizes de correntes totais de falta (I_{FF}), os resultados das 3 fases são armazenados nas linhas das matrizes e os resultados (módulos e ângulos) para as simulações nas barras são armazenados sucessivamente nas colunas.

Tabela 3.4 – Dados de Saída do Programa de Cálculo de Curto-Circuito.

Tipo de Curto-Circuito	Matrizes de Saída	Dimensão	Descrição
AT	$I_{FF\text{-}AT}$	$3 \times N_B$	Matriz de Correntes de Falta. Matrizes de Correntes e Tensões nos Elementos para o Circuito Pós-Falta. Matrizes de Correntes Totais nos Elementos. Todas as matrizes em componentes de fase (A B C), para faltas do tipo AT nas barras da microrrede.
	$i_{falt\text{-}AT\text{-}A}$ / $i_{falt\text{-}AT\text{-}B}$ / $i_{falt\text{-}AT\text{-}C}$	$E \times 2 \cdot N_B$	
	$v_{falt\text{-}AT\text{-}A}$ / $v_{falt\text{-}AT\text{-}B}$ / $v_{falt\text{-}AT\text{-}C}$	$E \times 2 \cdot N_B$	
	$i_{tot\text{-}AT\text{-}A}$ / $i_{tot\text{-}AT\text{-}B}$ / $i_{tot\text{-}AT\text{-}C}$	$E \times 2 \cdot N_B$	
BC	$I_{FF\text{-}BC}$	$3 \times N_B$	Matriz de Correntes de Falta. Matrizes de Correntes e Tensões nos Elementos para o Circuito Pós-Falta. Matrizes de Correntes Totais nos Elementos. Todas as matrizes em componentes de fase (A B C), para faltas do tipo BC nas barras da microrrede.
	$i_{falt\text{-}BC\text{-}A}$ / $i_{falt\text{-}BC\text{-}B}$ / $i_{falt\text{-}BC\text{-}C}$	$E \times 2 \cdot N_B$	
	$v_{falt\text{-}BC\text{-}A}$ / $v_{falt\text{-}BC\text{-}B}$ / $v_{falt\text{-}BC\text{-}C}$	$E \times 2 \cdot N_B$	
	$i_{tot\text{-}BC\text{-}A}$ / $i_{tot\text{-}BC\text{-}B}$ / $i_{tot\text{-}BC\text{-}C}$	$E \times 2 \cdot N_B$	
BCT	$I_{FF\text{-}BCT}$	$3 \times N_B$	Matriz de Correntes de Falta. Matrizes de Correntes e Tensões nos Elementos para o Circuito Pós-Falta. Matrizes de Correntes Totais nos Elementos. Todas as matrizes em componentes de fase (A B C), para faltas do tipo BCT nas barras da microrrede.
	$i_{falt\text{-}BCT\text{-}A}$ / $i_{falt\text{-}BCT\text{-}B}$ / $i_{falt\text{-}BCT\text{-}C}$	$E \times 2 \cdot N_B$	
	$v_{falt\text{-}BCT\text{-}A}$ / $v_{falt\text{-}BCT\text{-}B}$ / $v_{falt\text{-}BCT\text{-}C}$	$E \times 2 \cdot N_B$	
	$i_{tot\text{-}BCT\text{-}A}$ / $i_{tot\text{-}BCT\text{-}B}$ / $i_{tot\text{-}BCT\text{-}C}$	$E \times 2 \cdot N_B$	
ABC	$I_{FF\text{-}ABC}$	$3 \times N_B$	Matriz de Correntes de Falta. Matrizes de Correntes e Tensões nos Elementos para o Circuito Pós-Falta. Matrizes de Correntes Totais nos Elementos. Todas as matrizes em componentes de fase (A B C), para faltas do tipo ABC nas barras da microrrede.
	$i_{falt\text{-}ABC\text{-}A}$ / $i_{falt\text{-}ABC\text{-}B}$ / $i_{falt\text{-}ABC\text{-}C}$	$E \times 2 \cdot N_B$	
	$v_{falt\text{-}ABC\text{-}A}$ / $v_{falt\text{-}ABC\text{-}B}$ / $v_{falt\text{-}ABC\text{-}C}$	$E \times 2 \cdot N_B$	
	$i_{tot\text{-}ABC\text{-}A}$ / $i_{tot\text{-}ABC\text{-}B}$ / $i_{tot\text{-}ABC\text{-}C}$	$E \times 2 \cdot N_B$	
ABCT	$I_{FF\text{-}ABCT}$	$3 \times N_B$	Matriz de Correntes de Falta. Matrizes de Correntes e Tensões nos Elementos para o Circuito Pós-Falta. Matrizes de Correntes Totais nos Elementos. Todas as matrizes em componentes de fase (A B C), para faltas do tipo ABCT nas barras da microrrede.
	$i_{falt\text{-}ABCT\text{-}A}$ / $i_{falt\text{-}ABCT\text{-}B}$ / $i_{falt\text{-}ABCT\text{-}C}$	$E \times 2 \cdot N_B$	
	$v_{falt\text{-}ABCT\text{-}A}$ / $v_{falt\text{-}ABCT\text{-}B}$ / $v_{falt\text{-}ABCT\text{-}C}$	$E \times 2 \cdot N_B$	
	$i_{tot\text{-}ABCT\text{-}A}$ / $i_{tot\text{-}ABCT\text{-}B}$ / $i_{tot\text{-}ABCT\text{-}C}$	$E \times 2 \cdot N_B$	

No próximo capítulo serão realizadas as simulações no programa, considerando os 5 tipos de curtos-circuitos e os status operacionais da microrrede. Os resultados obtidos serão utilizados criar os ajustes de correntes para os relés de proteção.

Capítulo 4

SIMULAÇÕES E APLICAÇÃO DO PROGRAMA

4.1 Considerações Iniciais

Este capítulo apresenta as diversas simulações executadas no programa e os principais resultados obtidos no cálculo de correntes de curto-circuito nos elementos da microrrede. Estes resultados serão utilizados nos ajustes dos relés de proteção.

No item 4.2 são detalhadas as simulações executadas considerando a microrrede operando nos modos Conectado e Ilhado, assim como os diversos status operacionais das gerações distribuídas. No item 4.3 será comentado sobre o processo de validação do programa desenvolvido, através da comparação dos resultados obtidos com outro programa de cálculo de curto-circuito. No item 4.4, os valores calculados de correntes de curto-circuito serão utilizados para gerar os ajustes dos relés de proteção, visando a coordenação e seletividade entre os mesmos. No item 4.5 será apresentada uma interface gráfica desenvolvida para supervisão e controle da microrrede e no item 4.6 constam as considerações finais sobre as simulações e resultados obtidos.

O capítulo está estruturado com tabelas simplificadas, juntamente com os respectivos gráficos, de forma a tornar mais objetiva para o leitor a apresentação dos resultados. Ressalta-se que as tabelas completas com os resultados globais das simulações constam nos Apêndices no final deste trabalho.

4.2 Simulação do Programa

Para a execução das simulações no programa, deve-se considerar as diversas condições operacionais da microrrede proposta, pois a mesma possui 4 linhas de distribuição, 3 gerações fotovoltaicas, 3 gerações à diesel e ainda a conexão com a rede elétrica principal. Estas variações totalizam 2048 possibilidades operacionais.

Todas estas possibilidades foram devidamente testadas durante o processo de elaboração e validação do programa, contudo, de forma a deixar este trabalho mais objetivo com relação à metodologia desenvolvida e também à análise da funcionalidade do programa, serão apresentadas e analisadas aqui 5 simulações, que contemplam as condições operacionais de maior destaque.

4.2.1 Simulações nos Modos Conectado e Ilhado

As simulações realizadas se subdividem em modos Conectado e Ilhado e também nas condições operacionais de ligado e desligado para os dois tipos de geração distribuída. Serão consideradas a título de análise e apresentação gráfica dos resultados, faltas do tipo AT, sendo que, conforme citado, as simulações completas considerando os 5 tipos de faltas constam nos Apêndices ao final deste trabalho.

Outro ponto a ser considerado são as condições operacionais das linhas de distribuição da microrrede. Existem 16 possibilidades operacionais para cada alteração realizada referente aos modos de operação Conectado e Ilhado. Contudo, a condição normal de operação para as linhas de distribuição consiste nas linhas A, B e C ligadas e a linha D desligada, pois esta é uma linha auxiliar que entrará em operação por comandos do operador da microrrede ou através de intertravamento em caso de curto-circuito. Com isto, as simulações serão executadas considerando esta condição normal de operação. Ressalta-se que, o objetivo aqui é analisar o comportamento das correntes de curto-circuito, principalmente os seus módulos, quando as gerações distribuídas estão em funcionamento.

Desta forma, selecionou-se as 5 simulações descritas a seguir com suas respectivas condições operacionais relativas às gerações distribuídas e aos modos de operação:

- Simulação A:

Para esta simulação, a microrrede estará operando no modo Conectado e com todas as gerações distribuídas desligadas. O objetivo é analisar o comportamento das correntes de curto-circuito que fluem da rede elétrica para a microrrede e como estas correntes variam nos elementos em função das barras onde ocorrem as faltas.

- Simulação B:

Para esta simulação, a microrrede estará operando no modo Conectado, com os sistemas fotovoltaicos desligados e gerações à diesel ligadas. O objetivo é analisar a influência das gerações distribuídas provenientes de máquinas síncronas nas correntes de curto-circuito. Existirão correntes reversas em alguns elementos em função das barras onde ocorrem as faltas, devido ao fluxo de potência bidirecional.

- Simulação C:

Para esta simulação, a microrrede estará operando no modo Conectado, com os sistemas fotovoltaicos e as gerações à diesel ligados. O objetivo aqui é analisar a influência dos sistemas fotovoltaicos no módulo das correntes de curto-circuito.

- Simulação D:

Para esta simulação, a microrrede estará operando no modo Ilhado, com os sistemas fotovoltaicos desligados e gerações à diesel ligadas. O objetivo é analisar o comportamento das correntes com a microrrede desconectada na rede elétrica.

- Simulação E:

Para esta simulação, a microrrede estará operando no modo Ilhado, com os sistemas fotovoltaicos e as gerações à diesel ligados. O objetivo é analisar a influência dos sistemas fotovoltaicos no módulo das correntes de curto-circuito.

Para tornar a análise dos resultados das simulações mais objetiva, serão selecionados os elementos 1, 3, 5 e 7, que possuem características distintas entre si e representam os diversos tipos de elementos presentes na microrrede. Os mesmos correspondem à conexão com a rede elétrica, duas linhas de distribuição e uma geração distribuída. As tabelas e gráficos com os resultados serão elaboradas para cada um destes elementos, possibilitando observar o comportamento das correntes de curto-circuito conforme são alterados os status operacionais da microrrede.

De forma a facilitar para o leitor a interpretação dos dados presentes nas tabelas e gráficos com os resultados das simulações, será incluída novamente a arquitetura da microrrede proposta, conforme a Figura 4.1:

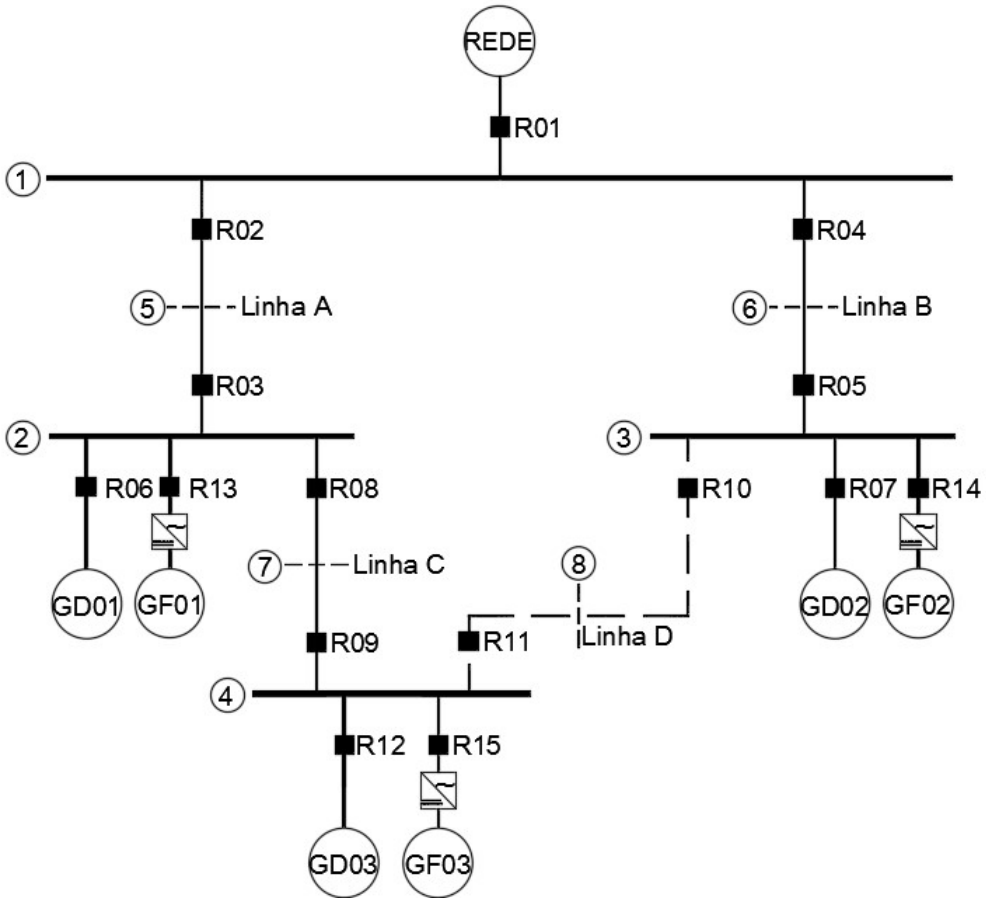


Figura 4.1 – Microrrede Proposta para Estudo e Simulação.

Além da arquitetura da microrrede, segue também a Tabela 4.1, com um resumo das condições operacionais da conexão com a rede elétrica e das gerações distribuídas utilizados em cada simulação.

Tabela 4.1 – Status Operacionais da Microrrede Utilizados nas Simulações.

Status Operacionais da Conexão com a Rede Elétrica e das Gerações Distribuídas							
Fontes	**REDE**	**GF01**	**GF02**	**GF03**	**GD01**	**GD02**	**GD03**
Simulação A	Ligado	-	-	-	-	-	-
Simulação B	Ligado	-	-	-	Ligado	Ligado	Ligado
Simulação C	Ligado	Ligado	Ligado	Ligado	Ligado	Ligado	Ligado
Simulação D	-	-	-	-	Ligado	Ligado	Ligado
Simulação E	-	Ligado	Ligado	Ligado	Ligado	Ligado	Ligado

Assim, os resultados para as simulações nos elementos ficaram conforme segue:

- Resultados das Simulações para o Elemento 1 da Microrrede

Para estas simulações, estudou-se o comportamento das correntes no elemento que representa o equivalente de Thévenin da conexão com a rede elétrica. Os resultados estão indicados na Tabela 4.2 e no gráfico da Figura 4.2.

Na simulação A, o valor do módulo da corrente de curto-circuito diminui a medida que a barra onde ocorre a falta fica mais distante do elemento. Isto ocorre, pois existe a influência da impedância característica das linhas de distribuição, o que diminui o valor da corrente. Nas simulações B e C, existe a influência das gerações distribuídas, o que faz com que o módulo da corrente que flui da rede elétrica diminua, conforme citado no item 2.7.2.2 deste trabalho. Observa-se também que as gerações fotovoltaicas presentes na simulação C não tem interferência significativa no módulo das correntes. Para as simulações D e E, a microrrede esta desconectada da rede elétrica, o que torna a corrente no Elemento 1 igual a zero.

Tabela 4.2 – Simulações para o Elemento 1 da Microrrede.

Simulações para o Elemento 1 da Microrrede - Correntes de Curto-Circuito (kA)								
Barras	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
Simulação A	26,11	18,86	17,87	13,31	21,91	21,22	15,61	0
Simulação B	26,11	17,77	15,97	11,04	21,09	19,75	13,52	0
Simulação C	26,11	17,76	15,97	11,04	21,09	19,75	13,52	0
Simulação D	0	0	0	0	0	0	0	0
Simulação E	0	0	0	0	0	0	0	0

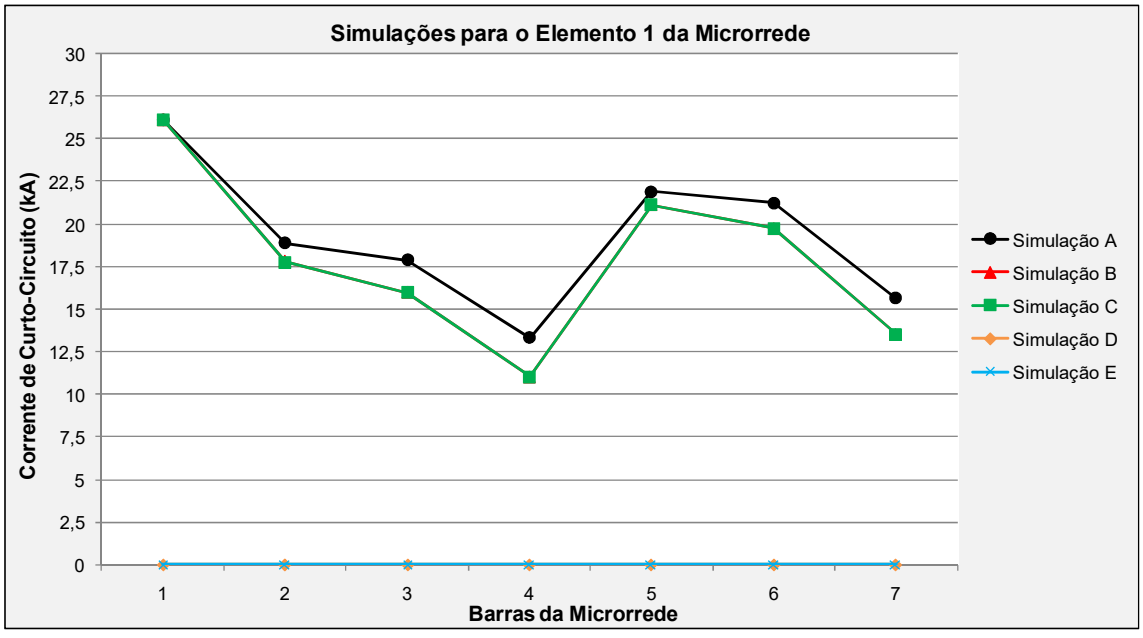


Figura 4.2 – Simulações para o Elemento 1 da Microrrede.

- Resultados das Simulações para o Elemento 3 da Microrrede

Para estas simulações, estudou-se o comportamento das correntes na linha de distribuição que interliga as barras 1 e 2 da microrrede, passando pela barra virtual 5. Os resultados estão indicados na Tabela 4.3 e no gráfico da Figura 4.3.

Na simulação A só existe circulação de corrente em faltas nas barras a jusante desta linha, pois as gerações distribuídas estão desligadas e a corrente flui somente da rede elétrica. Nas simulações B e C o módulo da corrente de curto-circuito é o somatório das correntes de falta da rede elétrica e de todas as gerações distribuídas. Os resultados apresentam os módulos, mas é importante observar que para faltas nas barras 1, 3, 5 e 6 a corrente será reversa. As gerações fotovoltaicas presentes na simulação C geram pequena influência no módulo das correntes. Nas simulações D e E, o comportamento é semelhante ao das simulações B e C, mas os módulos das correntes são menores devido a ausência da rede elétrica.

Tabela 4.3 – Simulações para o Elemento 3 da Microrrede.

Simulações para o Elemento 3 da Microrrede - Correntes de Curto-Circuito (kA)								
Barras	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
Simulação A	0	18,86	0	13,32	0	0	15,61	0
Simulação B	10,91	21,73	6,05	13,22	12,21	7,89	16,37	0
Simulação C	11,22	21,88	6,36	13,36	12,52	8,20	16,52	0
Simulação D	7,22	3,56	5,95	2,78	7,86	6,55	3,13	0
Simulação E	7,54	3,72	6,27	2,94	8,18	6,87	3,29	0

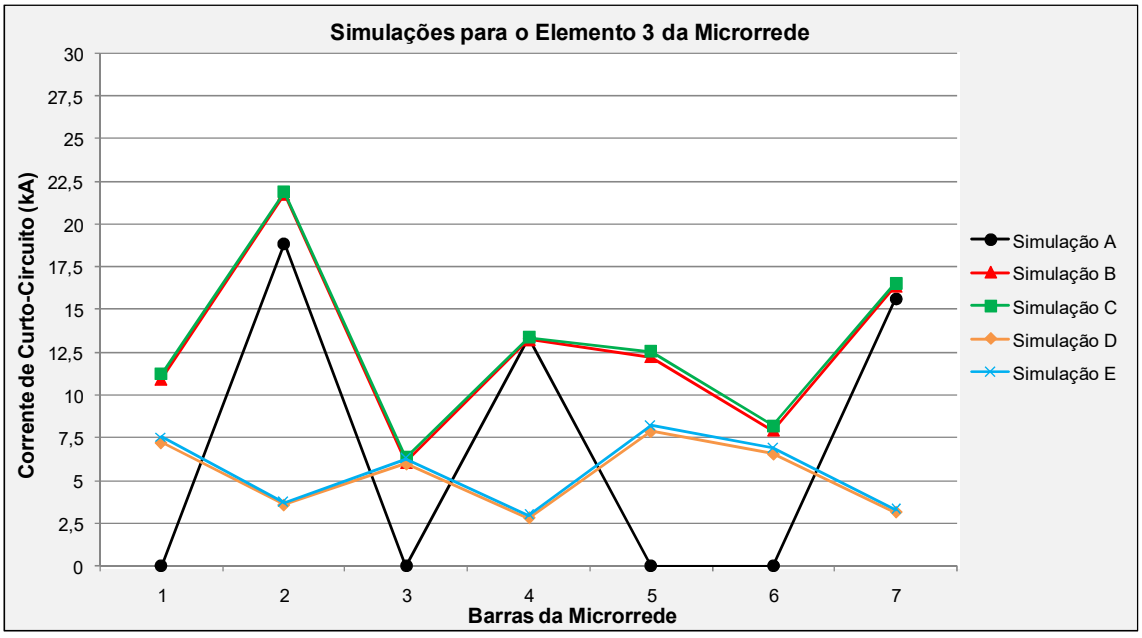


Figura 4.3 – Simulações para o Elemento 3 da Microrrede.

- Resultados das Simulações para o Elemento 5 da Microrrede

Para estas simulações, estudou-se o comportamento das correntes na linha de distribuição que interliga as barras 1 e 3 da microrrede, passando pela barra virtual 6. Os resultados estão indicados na Tabela 4.4 e no gráfico da Figura 4.4.

Na simulação A só existe circulação de corrente em faltas na barra 3, que está a jusante desta linha, pois as gerações distribuídas estão desligadas e a corrente flui somente da rede elétrica. Nas simulações B e C o módulo da corrente é o somatório das correntes de falta da rede elétrica e de todas as gerações distribuídas. Devido à configuração da microrrede, as correntes de curto-circuito para esta linha serão reversas, exceto no caso de falta na barra 3. As gerações fotovoltaicas presentes na simulação C geram pequena influência no módulo das correntes. Nas simulações D e E, o comportamento é semelhante ao das simulações B e C, mas os módulos das correntes são menores devido a ausência da rede elétrica.

Tabela 4.4 – Simulações para o Elemento 5 da Microrrede.

Simulações para o Elemento 5 da Microrrede - Correntes de Curto-Circuito (kA)								
Barras	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
Simulação A	0	0	17,87	0	0	0	0	0
Simulação B	6,74	3,98	22,01	2,18	5,12	7,55	2,86	0
Simulação C	6,90	4,14	22,30	2,34	5,27	7,71	3,02	0
Simulação D	4,25	3,56	5,95	2,78	3,90	4,68	3,13	0
Simulação E	4,41	3,72	6,27	2,94	4,06	4,84	3,29	0

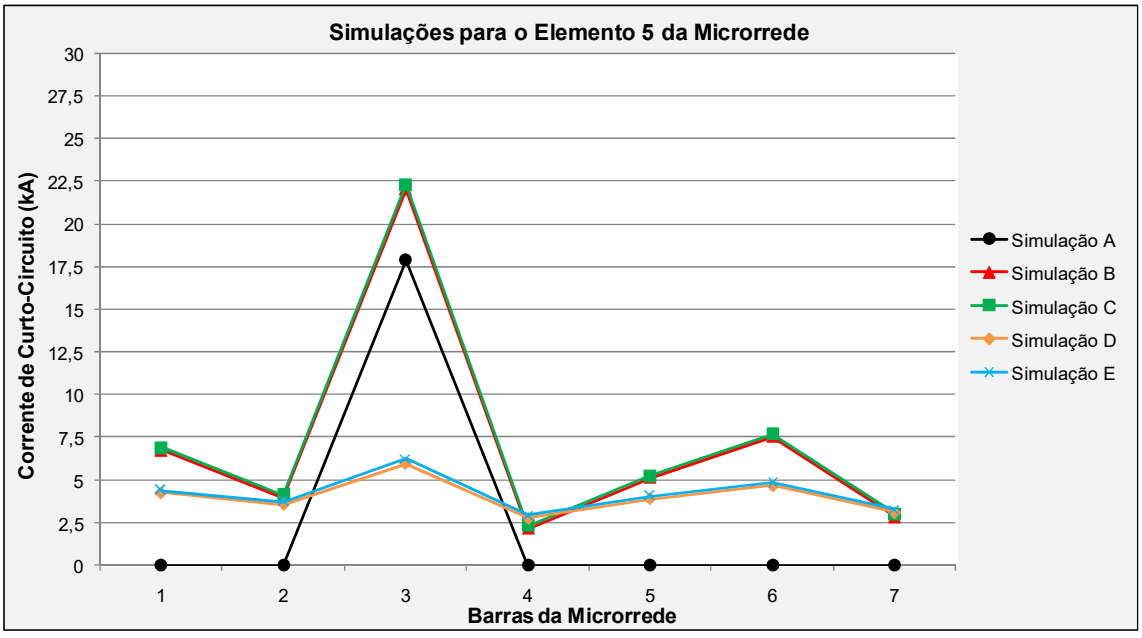


Figura 4.4 – Simulações para o Elemento 5 da Microrrede.

- Resultados das Simulações para o Elemento 7 da Microrrede

Para estas simulações, estudou-se o comportamento das correntes no elemento que representa a geração distribuída GD02, conectada na barra 3 da microrrede. Os resultados estão indicados na Tabela 4.5 e no gráfico da Figura 4.5.

Na simulação A, como todas as gerações distribuídas estão desligadas, a corrente é igual a zero neste elemento. Na simulação B, esta geração está em funcionamento e existe um fluxo de corrente, onde seu módulo diminui a medida que a barra onde ocorre a falta fica mais distante do elemento, pois existe a influência da impedância característica das linhas de distribuição. A simulação D é similar à B, alterando somente a impedância equivalente de Thévenin vista das barras de falta, pois a conexão com a rede elétrica foi desligada, o que gera o aumento da impedância e a diminuição dos módulos das correntes. Devido à arquitetura da microrrede, as gerações fotovoltaicas não interferem nas correntes de curto-circuito neste elemento.

Tabela 4.5 – Simulações para o Elemento 7 da Microrrede.

Simulações para o Elemento 7 da Microrrede - Correntes de Curto-Circuito (kA)								
Barras	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
Simulação A	0	0	0	0	0	0	0	0
Simulação B	6,74	3,98	8,35	2,18	5,12	7,55	2,86	0
Simulação C	6,74	3,98	8,35	2,18	5,12	7,55	2,86	0
Simulação D	4,25	3,56	5,14	2,78	3,90	4,68	3,13	0
Simulação E	4,25	3,56	5,14	2,78	3,90	4,68	3,13	0

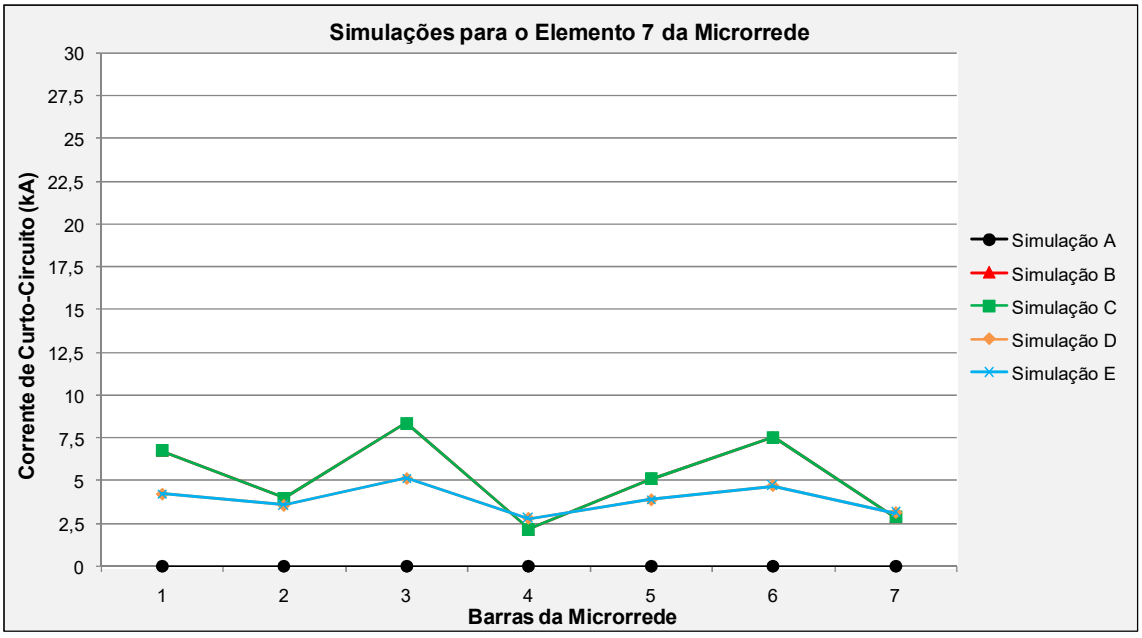


Figura 4.5 – Simulações para o Elemento 7 da Microrrede.

As simulações foram executadas nos elementos 1, 3, 5 e 7, sendo que, os demais elementos da microrrede com as mesmas funções possuem comportamentos semelhantes em situações de falta. Com isto, as linhas de distribuição representadas pelos elementos 2, 4, 8, 9, 10 e 11 possuirão comportamentos semelhantes aos dos elementos 3 e 5 e, as gerações à diesel representadas pelos elementos 6 e 12 possuirão comportamentos semelhantes ao do elemento 7. Estes comportamentos não significa que os módulos das correntes de curto-circuito serão os mesmos e sim a forma como as correntes fluem pelos elementos de acordo com as barras de falta.

Um ponto a se destacar são as gerações fotovoltaicas, representadas pelos elementos 13, 14 e 15 da microrrede. Conforme citado, os inversores de frequência que fazem a conversão de corrente contínua para corrente alternada, são parametrizados para que em situação de falta a corrente suba para 1,2 vezes a corrente nominal. Desta forma, para qualquer tipo de falta e para qualquer barra da microrrede, as correntes subirão para os valores vistos anteriormente na Tabela 3.3.

Ressalta-se que, num estudo mais específico do comportamento das gerações fotovoltaicas, tanto os valores de correntes nominais de operação, quanto de correntes de curto-circuito podem sofrer variações por diversos motivos inerentes desta tecnologia, como por exemplo a variação da incidência de radiação solar. Desta forma, mantêm-se os valores da Tabela 3.3, mas têm-se ciência que os mesmos podem sofrer alterações durante a operação do sistema. Contudo, como pode ser observado nas simulações, as gerações fotovoltaicas têm influência muito pequena nas correntes de curto-circuito e afetam somente as que fluem pelas linhas de distribuição. Assim, torna-se aceitável esta variação dos valores de corrente em relação ao especificado, pois esta variação afetará muito pouco o resultado global da metodologia de cálculo desenvolvida e implementada neste trabalho.

Com relação ao comportamento geral das correntes de curto-circuito obtido nas simulações, observa-se principalmente que, para cada barra onde ocorrem as faltas, as correntes assumem um valor único em cada status operacional. Isto possibilita identificar através dos módulos das mesmas, o ponto onde ocorreu a falta. Considerando por exemplo o elemento 1, se a corrente for de 17,87 kA, significa que existe um curto-circuito na barra 3 da microrrede. Esta análise é fundamental para a criação dos ajustes dos relés de proteção, que será abordada no item 4.4 adiante.

4.3 Validação do Programa

A validação dos cálculos executados pelo programa desenvolvido foi realizada através da comparação dos resultados das simulações com os obtidos com o programa *CCC.m*, de autoria do Dr. Clever Pereira, que é Orientador deste trabalho.

O programa *CCC.m* trabalha com a leitura de cartões de entrada no formato *.dat* e cria como dados de saída um outro cartão (relatório) no formato *.out*. Os cartões de entrada, assim como seus respectivos cartões de saída possuem os dados de uma única configuração da rede elétrica e são utilizados para simulação de um tipo de falta e em uma barra específica. Isto ocorre, pois o objetivo do programa *CCC.m* é a solução de redes elétricas de grande porte e a obtenção de relatórios para serem aplicados em diversos estudos envolvendo os sistemas elétricos de potência.

Um outra característica do programa *CCC.m* é que o mesmo não realiza simulações com sistemas fotovoltaicos, pois foi desenvolvido para realizar cálculos envolvendo geradores síncronos de grande porte. Com isto, foram comparados os valores de simulações somente das fontes provenientes de máquinas síncronas da microrrede, ou seja, os geradores a diesel e a conexão com a rede elétrica.

Ressalta-se aqui que os dois programas foram desenvolvidos para aplicações com finalidades diferentes e o objetivo aqui não foi a comparação dos mesmos e sim a validação dos cálculos utilizando os pontos que ambos programas têm em comum, que é o cálculo das correntes de curto-circuito.

Com isto, para a simulação de todas as possibilidades operacionais da microrrede considerando as fontes de máquinas síncronas, seria necessária a elaboração de 10.240 cartões de entrada *.dat*, que representam as 16 possibilidades operacionais das linhas de distribuição, as duas possibilidades de status das 3 gerações a diesel, os modos de operação conectado e ilhado, os 5 tipos de curto-circuito e as 8 barras da microrrede. De forma a otimizar este processo, optou-se por considerar somente uma condição operacional da microrrede relativa às linhas de distribuição, que consiste na mesma utilizada nas simulações no item anterior deste trabalho, ou seja, as linhas A, B e C ligadas e a linha D desligada. Foi considerado também somente o modo de operação conectado e com todas as gerações a diesel ligadas.

Com isto, para a execução das simulações o número de cartões de entrada foi reduzido para 35, ou seja, considerando os 5 tipos de curtos-circuitos nas 7 barras da microrrede. Observa-se que o número de barras caiu de 8 para 7, pois com a linha D desligada, a barra virtual número 8 deixa de existir nos cartões de entrada.

Uma vez elaborados os cartões de entrada, foram executadas as simulações e obtidos os 35 cartões de saída. Estes cartões possuem relatórios muito extensos que contem informações detalhadas sobre cada resultado de cálculo executado. De forma a tornar a apresentação mais simplificada, pois não é objetivo deste trabalho o detalhamento de funcionalidades específicas do programa *CCC.m*, optou-se por apresentar somente uma parte resumida destes cartões de saída, para que o leitor possa visualizar suas principais características. A Figura 4.6 apresenta o relatório resumido da simulação de uma falta do tipo AT na barra 1 da microrrede.

PROGRAMA DE CÁLCULO DE CURTO-CIRCUITO OU ASSIMETRIA SHUNT - CCC
UTILIZANDO COMPONENTES SIMÉTRICAS

ANÁLISE DE REDES ELÉTRICAS NO DOMÍNIO DA FREQÜÊNCIA - PROF. CLEVER PEREIRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGEE - UFMG

DADOS DE CONFIGURAÇÃO DO CASO

TIPO DO CASO (TF) .....fase-terra
BARRA DE FALTA OU DA ASSIMETRIA (NF) 1

DADOS DOS ELEMENTOS DA REDE

Num	De	Para	R0	X0	ModE0	AngE0	R1	X1	ModE1	AngE1	R2	X2	ModE2	AngE2
1	0	1	0.433	0.303	0	0	0.433	0.303	13.8	0	0.433	0.303	0	0
2	1	5	0.0805	0.062	0	0	0.0805	0.062	0	0	0.0805	0.062	0	0
3	5	2	0.0805	0.062	0	0	0.0805	0.062	0	0	0.0805	0.062	0	0
4	1	6	0.0966	0.0744	0	0	0.0966	0.0744	0	0	0.0966	0.0744	0	0
5	6	3	0.0966	0.0744	0	0	0.0966	0.0744	0	0	0.0966	0.0744	0	0
6	0	2	0.4869	0.236	0	0	6.469	3.133	13.8	0	1.643	0.796	0	0
7	0	3	0.4869	0.236	0	0	6.469	3.133	13.8	0	1.643	0.796	0	0
8	2	7	0.1208	0.093	0	0	0.1208	0.093	0	0	0.1208	0.093	0	0
9	7	4	0.1208	0.093	0	0	0.1208	0.093	0	0	0.1208	0.093	0	0
10	0	4	0.4869	0.236	0	0	6.469	3.133	13.8	0	1.643	0.796	0	0

CURTO-CIRCUITO

Vetor das Correntes de Fase de Falta (IFF)

36.7473 - j.23.6789

0.0000 + j.0.0000

0.0000 + j.0.0000

Vetor das Tensões de Fase na Barra de Falta (VFF)

0.0000 - j.0.0000

-4.4440 - j.10.3031

-4.2091 + j.10.3865

Figura 4.6 – Relatório de Simulação de uma Falta do Tipo AT na Barra 1 da Microrrede.

O relatório possui um título com as informações de autoria do programa, um item com o tipo de falta e a barra onde a mesma será simulada, os dados de entrada com a arquitetura da rede e as informações de saída. Estas informações, a título de análise foram limitadas às correntes e tensões de falta em componentes de fase.

A Figura 4.7 apresenta da mesma forma o relatório resumido da simulação de uma falta do tipo BC na barra 3 da microrrede:

```
**********************************************************************************************************************

                    PROGRAMA DE CÁLCULO DE CURTO-CIRCUITO OU ASSIMETRIA SHUNT - CCC
                                UTILIZANDO COMPONENTES SIMÉTRICAS

                ANÁLISE DE REDES ELÉTRICAS NO DOMÍNIO DA FREQÜÊNCIA - PROF. CLEVER PEREIRA
                     PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGEE - UFMG

**********************************************************************************************************************
                                        DADOS DE CONFIGURAÇÃO DO CASO
**********************************************************************************************************************

            TIPO DO CASO (TF) ..........................................................fase-fase
            BARRA DE FALTA OU DA ASSIMETRIA (NF) .....................................       3

**********************************************************************************************************************
                                        DADOS DOS ELEMENTOS DA REDE
**********************************************************************************************************************
  Num   De Para      R0      X0   ModE0   AngE0      R1      X1   ModE1   AngE1      R2      X2   ModE2   AngE2
    1    0    1   0.433   0.303       0       0   0.433   0.303    13.8       0   0.433   0.303       0       0
    2    1    5  0.0805   0.062       0       0  0.0805   0.062       0       0  0.0805   0.062       0       0
    3    5    2  0.0805   0.062       0       0  0.0805   0.062       0       0  0.0805   0.062       0       0
    4    1    6  0.0966  0.0744       0       0  0.0966  0.0744       0       0  0.0966  0.0744       0       0
    5    6    3  0.0966  0.0744       0       0  0.0966  0.0744       0       0  0.0966  0.0744       0       0
    6    0    2  0.4869   0.236       0       0   6.469   3.133    13.8       0   1.643   0.796       0       0
    7    0    3  0.4869   0.236       0       0   6.469   3.133    13.8       0   1.643   0.796       0       0
    8    2    7  0.1208   0.093       0       0  0.1208   0.093       0       0  0.1208   0.093       0       0
    9    7    4  0.1208   0.093       0       0  0.1208   0.093       0       0  0.1208   0.093       0       0
   10    0    4  0.4869   0.236       0       0   6.469   3.133    13.8       0   1.643   0.796       0       0
**********************************************************************************************************************
                                            CURTO-CIRCUITO
**********************************************************************************************************************

   Vetor das Correntes de Fase de Falta (IFF)

   0.0000 + j.0.0000

 -11.9971 - j.18.0291

  11.9971 + j.18.0291


   Vetor das Tensões de Fase na Barra de Falta (VFF)

  11.4462 - j.0.2110

  -5.7231 + j.0.1055

  -5.7231 + j.0.1055
```

Figura 4.7 – Relatório de Simulação de uma Falta do Tipo BC na Barra 3 da Microrrede.

Os dados presentes nos relatórios indicados nas Figuras 4.6 e 4.7 foram comparados com os resultados das simulações executadas pelo programa desenvolvido. Esta comparação foi realizada considerando os resultados relativos às mesmas condições operacionais da microrrede, ou seja, conforme a Simulação B, cujos os resultados globais constam no Apêndice B ao final deste trabalho. Pode-se observar nesta comparação que os valores obtidos são os mesmos, o que possibilita afirmar que os cálculos executados no programa desenvolvido estão consistentes.

Ressalta-se que os dados de todos os 35 cartões de saída foram comparados com resultados de simulação do programa desenvolvido e os cálculos se mostraram igualmente consistentes. Informa-se também que optou-se por apresentar somente 2 relatórios resumidos, de forma a não deixar este item muito extenso para o leitor, uma vez que o objetivo aqui se limita a relatar a consistência dos cálculos.

- NOTA: Os Apêndices A, B, C, D e E ao final deste trabalho, possuem os resultados globais das simulações A, B, C, D e E respectivamente.

4.4 Ajustes de Correntes dos Relés de Proteção

Após as etapas de simulação e validação do programa, inicia-se a etapa de aplicação dos resultados obtidos para gerar os ajustes de correntes dos relés de proteção. Este é o objetivo final da metodologia e programa desenvolvidos.

Os ajustes de correntes dos relés são fundamentais para a coordenação e seletividade do sistema de proteção, pois possibilitam detectar uma falta e desconectar somente as partes da microrrede afetadas pela mesma. Estes ajustes são realizados com base nos valores obtidos nas rotinas de cálculo de curto-circuito, que foram armazenados em diversas matrizes conforme citado anteriormente.

Analisando os resultados das simulações realizadas no item 4.2.1, observou-se que as correntes de curto-circuito nos elementos possuem valores máximos quando as faltas ocorrem nas barras onde os mesmos estão conectados e estes valores vão diminuindo a medida que o pontos de falta se distanciam, devido às impedâncias intrínsecas das linhas de distribuição.

Desta forma, foi implementada uma rotina no programa que lê as barras onde estão conectados os elementos, seleciona o menor valor em módulo de corrente diferente de zero, considerando os 5 tipos de curto-circuito, e cria através deste valor o primeiro ajuste do respectivo relé de proteção. Em seguida, o programa lê as barras adjacentes a este elemento e vai sucessivamente criando ajustes secundários, terciários, quaternários, com tempos de atuação seguidamente maiores. Estes ajustes consistem nas zonas de proteção dos relés. Em algumas situações, podem existir mais de uma barra a ser considerada secundária ou terciária na rotina de ajuste de correntes. Por exemplo, caso as linhas A, B e C estejam ligadas, a barra 1 será a primeira zona de proteção do Relé R01, as barras 2 e 3 serão a segunda e a barra 4 será a terceira. Este comportamento é dinâmico para todos os relés, e os ajustes são executados após os cálculos de curto-circuito sempre que ocorrer qualquer alteração nas condições de operação da microrrede. Isto pode ser observado nos 2 exemplos a seguir, onde a microrrede opera conforme as Figuras 4.8 e 4.9 e os ajustes de correntes dos relés constam nas Tabelas 4.6 e 4.7. É realizada a análise considerando o funcionamento da coordenação da proteção.

- Ajustes de Correntes para os Relés de Proteção – Exemplo 1

Caso ocorra uma falta na barra 3, conforme a Figura 4.8, os relés R04, R05, R07 e R14 atuarão com o tempo de 200 ms, pois trata-se de sua primeira zona de proteção. Se estes relés não atuarem, R01, R02 e R03 atuarão com 400 ms, R06, R08 e R09 atuarão com 600 ms e R12 atuará com 800 ms. Devido à interface por inversores, R13 e R15 também atuarão com 200 ms. Cada ponto de atuação tem sua corrente previamente calculada e parametrizada nos relés, conforme Tabela 4.6.

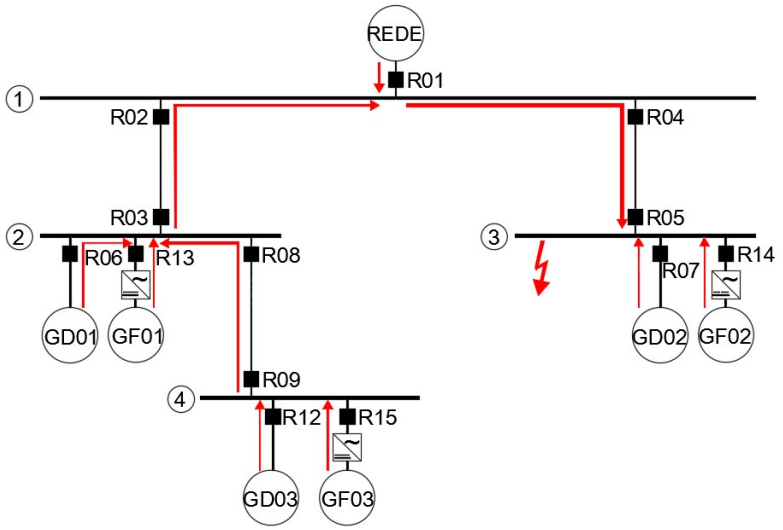


Figura 4.8 – Coordenação e Seletividade dos Relés de Proteção - Exemplo 1.

Tabela 4.6 – Ajustes de Corrente dos Relés de Proteção - Exemplo 1.

Ajustes de Corrente dos Relés de Proteção - Correntes (kA)				
Tempo de Atuação	**200 ms**	**400 ms**	**600 ms**	**800 ms**
Zona de Proteção	**1**	**2**	**3**	**4**
Relé R01	22,88	**14,59**	10,52	-
Relé R02	3,89	**2,67**	-	-
Relé R03	3,89	**2,67**	-	-
Relé R04	**2,02**	1,48	1,05	-
Relé R05	**2,02**	1,48	1,05	-
Relé R06	1,92	1,30	**1,20**	-
Relé R07	**1,92**	1,86	1,32	0,89
Relé R08	1,95	1.86	**1,25**	-
Relé R09	1,95	1.86	**1,25**	-
Relé R10	-	-	-	-
Relé R11	-	-	-	-
Relé R12	1,92	1,84	1,75	**1,15**
Relé R13	**0,24**	-	-	-
Relé R14	**0,18**	-	-	-
Relé R15	**0,12**	-	-	-

- Ajustes de Correntes para os Relés de Proteção – Exemplo 2

Neste exemplo, a microrrede está operando no modo ilhado da rede elétrica. Caso ocorra uma falta na barra 1, conforme a Figura 4.9, os relés R02 e R03 atuação com o tempo de 200 ms, pois trata-se de sua primeira zona de proteção. Se estes relés não atuarem, R06, R08 e R09 atuarão com 400 ms, R12, R10 e R11 atuarão com 600 ms e R07 atuará com 800 ms. Cada ponto de atuação tem sua corrente previamente calculada e parametrizada nos relés, conforme Tabela 4.7.

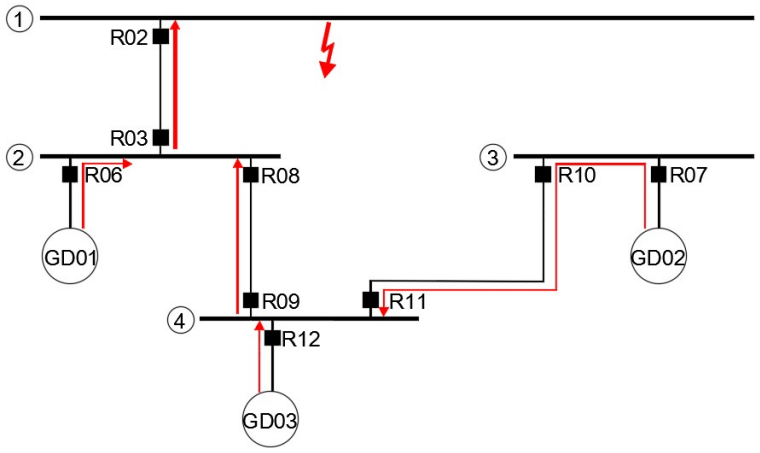


Figura 4.9 – Coordenação e Seletividade dos Relés de Proteção - Exemplo 2.

Tabela 4.7 – Ajustes de Corrente dos Relés de Proteção - Exemplo 2.

Ajustes de Corrente dos Relés de Proteção - Correntes (kA)				
Tempo de Atuação	**200 ms**	**400 ms**	**600 ms**	**800 ms**
Zona de Proteção	**1**	**2**	**3**	**4**
Relé R01	-	-	-	-
Relé R02	**4,96**	-	-	-
Relé R03	**4,96**	-	-	-
Relé R04	-	-	-	-
Relé R05	-	-	-	-
Relé R06	1,92	**1,78**	1,58	-
Relé R07	1,92	1,77	1,64	**1,52**
Relé R08	1,84	**1,58**	-	-
Relé R09	1,84	**1,58**	-	-
Relé R10	1,77	1,64	**1,52**	-
Relé R11	1,77	1,64	**1,52**	-
Relé R12	1,92	1,66	**1,65**	-
Relé R13	-	-	-	-
Relé R14	-	-	-	-
Relé R15	-	-	-	-

Quando são executados os cálculos de curto-circuito, chega-se ao resultado dos valores das correntes totais nos elementos considerando faltas em cada barra da microrrede. Assim, o sistema de controle central parametriza os relés com os valores de correntes de acordo com as zonas de proteção. Desta forma, considerando o relé R01 do exemplo 1, o primeiro ajuste de corrente é realizado considerando os 5 tipos de curto-circuito na barra 1 e os ajustes secundários e terciários são realizados considerando as barras (zonas de proteção) adjacentes. O programa pega os 5 valores de correntes em módulo e parametriza o relé com o menor deles. Assim, conforme indicado na Tabela 4.6, sabe-se que para qualquer tipo de falta na barra 1, a menor corrente no elemento 1 será de 22,88 kA. Quando ocorre uma falta nas barras virtuais 5 e 6 ou nas barras 2 e 3, o menor valor em módulo será 14,59 kA e se ocorrer uma falta na barra virtual 7 ou na barra 4, o menor valor será 10,52 kA.

Com isto, considerando uma falta na barra 3, conforme o exemplo 1, a corrente detectada por R01 indicará que é um curto-circuito na referida barra. O relé estará parametrizado para identificar esta falta e ter como tempo de atuação 400 ms. Caso a falta ocorra na barra 4 (terceira zona de proteção), o relé identificará a mesma através do valor de corrente e atuará com 600 ms. Este comportamento segue a mesma lógica para todos relés, sendo que, a parametrização é automaticamente alterada quando são modificadas as condições operacionais da microrrede.

Os valores destacados nas Tabelas 4.6 e 4.7 são referentes às faltas abordadas nos exemplos. Caso as mesmas ocorram em outro ponto da microrrede, os respectivos ajustes de correntes e tempos de atuação também estão parametrizados nos relés. Isto prioriza a coordenação e seletividade do sistema de proteção, pois na ocorrência de uma falta, somente a região afetada pela mesma será desconectada, mantendo em operação o fornecimento de energia para as demais cargas. Somente no caso da proteção da área afetada pela falta não atuar, é que serão sucessivamente desconectadas outras áreas da microrrede, até a falta ser isolada.

Conforme citado, os sistemas fotovoltaicos trabalham como fontes de corrente e se comportarão da mesma maneira para todas as barras de falta. Com isto, os relés referentes à estes sistemas são parametrizados para atuarem sempre com 200 ms. Caso a falta não seja na barra onde estes sistemas estão conectadas, a alimentação será restabelecida assim que a região afetada pela falta for desconectada.

4.5 Interface Gráfica para Supervisão e Controle

Após as etapas de simulação, validação do programa e ajustes de correntes dos relés de proteção, foi desenvolvida uma interface gráfica para supervisão e controle centralizado da microrrede. Através desta interface, o operador pode dar os comandos para ligar e desligar qualquer uma das gerações distribuídas, assim como trabalhar nos modos ilhado e conectado com a rede elétrica. Também é possível dar os comandos de abertura e fechamento das linhas de distribuição e ler os ajustes de correntes dos relés, considerando as zonas de proteção e tempos de atuação.

A interface, indicada na Figura 4.10, foi desenvolvida na plataforma Guide, que faz parte das ferramentas do software Matlab. Para a execução das simulações e operação da microrrede, são incluídas as condições operacionais das linhas de distribuição, gerações distribuídas e conexão com a rede elétrica nos campos da parte superior da tela, e acionado o botão “Calcular”. O programa simula os 5 tipos de curto-circuito nas barras e apresenta na parte direita da tela os ajustes de correntes para todos os relés da microrrede, considerando as respectivas zonas de proteção. Caso um relé não possua vários ajustes de corrente devido à arquitetura da microrrede, ou esteja desabilitado, o programa cancela o respectivo campo.

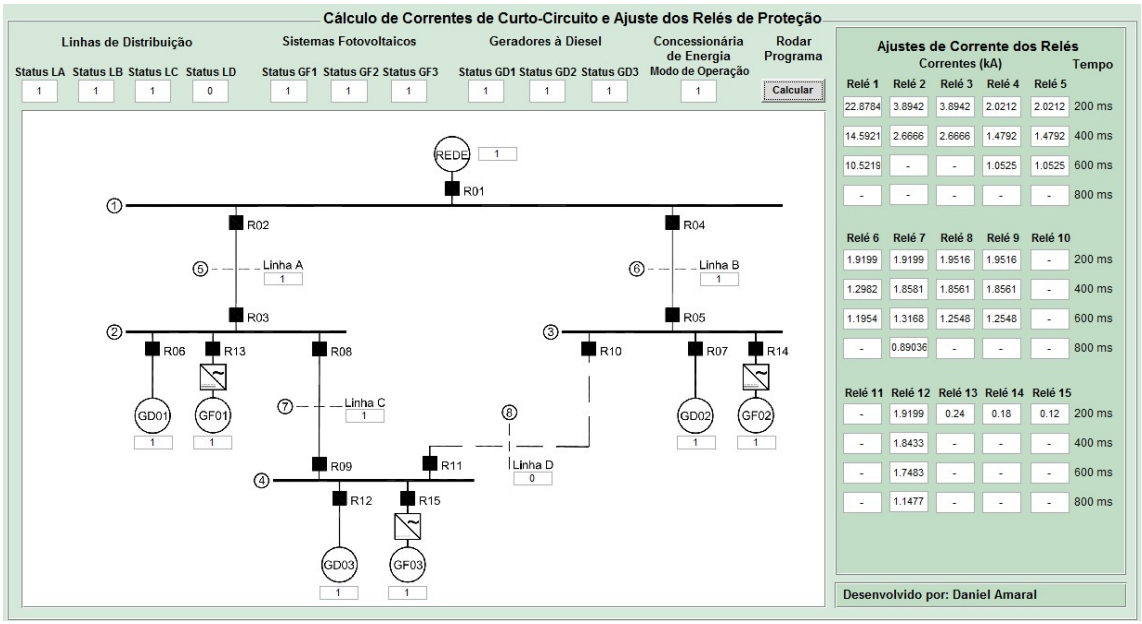


Figura 4.10 – Interface Gráfica para Supervisão e Controle da Microrrede.

4.6 Considerações Finais

Conforme citado, a metodologia de cálculo de correntes de curto-circuito desenvolvida neste trabalho pode ser implementada para qualquer arquitetura de microrrede e com diversas gerações distribuídas. Entretanto, para a implementação do programa utilizado nas simulações, foram incluídas funcionalidades específicas, para demonstrar, através de um estudo de caso, a aplicação da metodologia. Nestas funcionalidades, estão incluídos os comandos do operador e a interface gráfica.

No caso dos comandos do operador, o programa executa os cálculos com base nos dados de entrada da arquitetura da microrrede, que podem ser alterados de acordo com as condições operacionais, possibilitando maior flexibilidade. Para a aplicação em outra arquitetura com necessidades diferentes de comandos operacionais, o programa pode ser customizado de forma a se adaptar melhor a cada situação. Esta análise é a mesma no caso da interface gráfica. O objetivo em realizar estas customizações, foi demonstrar a capacidade dinâmica da metodologia e as possibilidades de adaptação e aplicações em microrredes com diversas arquiteturas.

Foi mencionado no Capítulo 3, que nos cálculos de curto-circuito as cargas seriam desprezadas, pois as mesmas tem pouca influência no resultado. Contudo, foi observado nos valores obtidos das correntes durante as simulações e criação dos ajustes dos relés, que em algumas situações as diferenças entre um ponto de ajuste e outro é muito pequena. Nestes casos, a corrente das cargas pode impactar a coordenação da proteção, principalmente quando a microrrede opera no modo ilhado. Desta forma, para uma implantação prática da metodologia desenvolvida, como uma instalação industrial, afim de se obter melhor desempenho da proteção, as correntes das cargas devem ser consideradas nas rotinas de cálculo.

Outra observação é a variação das correntes dos sistemas fotovoltaicos e os possíveis impactos no ajuste dos relés. Neste caso, os valores das correntes podem ser medidos e carregados dinamicamente no programa. Assim, a cada intervalo de tempo, que pode ser ajustável, os valores de correntes dos sistemas fotovoltaicos seriam carregados no programa e novos cálculos seriam executados, o que deixaria o modelo ainda mais preciso com referência a contribuição destes sistemas.

Capítulo 5

CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

5.1 Conclusões

O constante crescimento da utilização de gerações distribuídas de energia para aplicações em diversas áreas da sociedade, resultou na demanda de estudos específicos sobre os benefícios obtidos com as implantações e os consequentes desafios técnicos gerados na sua instalação e interface com as redes elétricas.

Este trabalho apresentou uma revisão bibliográfica sobre o tema, que contemplou as principais características das tecnologias envolvidas, as legislações internacionais e nacionais aplicadas, os benefícios da instalação de microrredes relativos a qualidade de energia, confiabilidade e resiliência, e as estruturas de supervisão e controle aplicadas. Em seguida, foi introduzido o assunto de proteção de microrredes, dando foco inicial para a interface com a rede elétrica e por fim nas metodologias encontradas na literatura relativas aos sistemas de proteção internos às microrredes.

A junção destes conhecimentos, tendo como destaque uma metodologia de cálculo de correntes de falta para os relés de proteção encontrada na literatura, assim como a superposição de circuitos, resultou no desenvolvimento e implementação de uma nova metodologia de cálculo de correntes de curto-circuito para microrredes. Esta metodologia foi implementada para simulação em uma arquitetura de microrrede proposta como estudo de caso e obteve-se os seguintes resultados e conclusões:

A metodologia de cálculo desenvolvida possibilitou resultados precisos de correntes de curto-circuito utilizando os dados de entrada, ou seja, sem aproximações. Isto é um ganho em relação aos modelos encontrados na literatura, pois os mesmos utilizam aproximações, o que pode comprometer o resultado final.

Apesar dos dados de entrada relativos à gerações fotovoltaicas poderem variar dinamicamente durante a operação, estes podem ser incluídos de forma dinâmica no programa, aumentando ainda mais a precisão e a qualidade dos resultados obtidos.

O programa desenvolvido para a aplicação da metodologia, possibilitou a simulação de todos os tipos de curtos-circuitos em um único ciclo de operação, e teve como dados de saída, diversas matrizes com todas as etapas de cálculos. Estes dados podem ser utilizados para diversos estudos do funcionamento das microrredes em situação normal de operação e também em situação de falta. Além disto, a simulação de curto-circuito em todas as barras da microrrede possibilitou a criação dos ajustes de correntes dos relés, considerando as zonas de proteção. Isto gerou uma melhor coordenação e seletividade de todo o sistema, onde na ocorrência de uma falta, somente as partes afetadas pela mesma serão desconectadas, mantendo em operação o fornecimento de energia para as demais áreas da microrrede.

Conforme o estudo de caso, a microrrede possuía arquitetura de operação variável e o programa desenvolvido se adaptou a todas possibilidades operacionais. Desta forma, em uma implantação prática, a metodologia pode ser utilizada em ambientes dinâmicos, onde as arquiteturas de operação variam ao longo do tempo, seja por questões técnicas, ou também por questões econômicas. Estas variações podem ser oriundas de intertravamentos em caso de faltas ou de comandos de um operador sistema. Para isto, foi desenvolvida uma interface gráfica para supervisão e controle, onde sua estrutura pode ser customizada para aplicação em qualquer arquitetura de microrrede. Os dados são inseridos por um operador e o sistema de controle centralizado executa as simulações e parametriza automaticamente os relés, indicando na interface gráfica os ajustes de correntes para as zonas de proteção.

Desta forma, pode-se concluir que os objetivos traçados ao início deste trabalho foram alcançados e que a metodologia desenvolvida e implementada obteve bons resultados, o que possibilita a aplicação em diversas implantações de microrredes, como complexos industriais, atividades rurais e condomínios residenciais.

5.2 Propostas de Continuidade

Sistemas de proteção para aplicação em microrredes é um tema relativamente novo e vem sendo estudado com frequência na comunidade científica. Tendo como base a metodologia desenvolvida neste trabalho, é possível identificar alguns pontos para melhorias e propostas de continuidade em trabalhos futuros, conforme segue:

Uma proposta seria a elaboração da matriz de incidência elemento-nó considerando os sistemas fotovoltaicos trabalhando como fontes de correntes. Neste caso, o cálculo do circuito pré-falta e as simulações de curto-circuito seriam modificados, pois a etapa dos sistemas fotovoltaicos seria realizada em conjunto com as demais, o que resultaria em uma melhoria significativa para o modelo desenvolvido.

O programa também pode ser adaptado para cálculo em redes trifásicas desequilibradas. Neste caso, quando é aplicada a Transformada de Fortescue, os circuitos equivalentes de Thévenin possuirão também tensões de sequência zero e negativa. As interligações entre os mesmos e as equações utilizadas nas simulações de curto-circuito necessitarão serem revisadas e adaptadas no programa. Conforme citado, alguns pontos já foram implementados prevendo este tipo de melhoria, como os vetores de fontes de tensão e fontes de corrente equivalentes.

Outro ponto de melhoria, que foi previamente citado no Capítulo 4, que abordou as simulações, seria a modelagem considerando as correntes das cargas conectadas na microrrede. Isto pode ser implementado, por exemplo, considerando os equivalentes de Thévenin das cargas conectadas em cada barra do sistema e incluindo os mesmos como elementos na tabela de arquitetura da microrrede. Além disto, também pode ser implementada a utilização das correntes instantâneas dos sistemas fotovoltaicos nos cálculos, através da leitura em tempo real das mesmas e do carregamento nas respectivas tabelas. Estas duas melhorias trariam maior precisão no cálculo dos ajustes dos relés, gerando um ganho significativo no desempenho da coordenação e seletividade do sistema de proteção.

Por fim, uma proposta de continuidade, que também vem sendo estudada na comunidade científica, é a modelagem do sistema de controle centralizado utilizando a norma IEC 61.850, tendo como foco a estrutura de comunicação dos relés.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] T. E. C. Huayllas “Micro-Redes Elétricas: Estado da Arte e Contribuição para o Dimensionamento, Aplicação e Comercialização da Energia Produzida”. 2015. 162 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Politécnica, USP, São Paulo.

[2] S. Parhizi, H. Lotfi, A. Khodaei, S. Bahramirad, “State of the Art in Research on Microgrids: A Review”, IEEE Access. Vol. 3, pp. 890-925, Jun. 2015.

[3] N. Hatziargyriou, H. Asano, R. Iravani, C. Marnay. “Microgrids: An Overview of Ongoing Research, Development, and Demonstration Projects,” IEEE Power And Energy Magazine, pp. 78-94, Jul./Aug. 2007.

[4] R. Bayindir, E. Bekiroglu, E. Hossain, E, Kabalci “Microgrid Facility at European Union”. IEEE - 3rd International Conference on Renewable Energy Research and Applications, Milwakuee, pp. 865-872, Oct. 2014.

[5] I. R. A. Rodrigues “Estudo de Proteção Elétrica de uma Microrrede Baseada na Rede de 34 barras do IEEE”. 2017. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

[6] M. H. K. Tushar “Unveiling the Hidden Connections Between E-mobility and Smart Microgrid,” The Optical Zeitgeist Laboratory, University of Québec. Disponível em: <http://www.zeitgeistlab.ca/doc/Unveiling_the_Hidden_Connections_between_E-mobility_and_Smart_Microgrid.html>. Acesso em 05 Set. 2017.

[7] T. R. de Oliveira “Microredes em Corrente Contínua,” DELT - Universidade Federal de Minas Gerais. Disponível em: <http://http://www.troliveira.com/l/distcc/>. Acesso em 05 Set. 2017.

[8] IEEE Std 1547-2003, “IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources With Electric Power Systems” IEEE - Institute of Electrical and Electronic Engineers, p.1-16.

[9] IEEE Std 1547.2-2008, “Application Guide for IEEE Std 1547, IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources With Electric Power Systems” IEEE - Institute of Electrical and Electronic Engineers, p.1-207, 2009.

[10] IEEE Std 1547.4-2011, “IEEE Guide for Design, Operation, and Integration of Distributed Resource Island Systems With Electric Power Systems” IEEE - Institute of Electrical and Electronic Engineers, Jul. 2011.

[11] ANEEL, “Resolução Normativa 482”, ANNEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, Abril, 2012.

[12] ANEEL, “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST - Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição”, ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, Março, 2016.

[13] H. Asano, S. Bando, “Load Fluctuation Analysis of Commercial and Residential Customers for Operation Planning of a Hybrid Photovoltaic and Cogeneration System”, in Proc. IEEE Power Eng. Soc. General Meeting, Jun. 2006.

[14] M. Sechilariu, B. Wang, and F. Locment, “Building Integrated Photovoltaic System with Energy Storage and Smart Grid Communication”, IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 60, no. 4, pp. 1607-1618, Apr. 2013.

[15] A. Elrayyah, Y. Sozer, M. Elbuluk, “Microgrid-Connected PV-Based Sources: A Novel Autonomous Control Method for Maintaining Maximum Power”, IEEE Ind. Appl. Mag., vol. 21, no. 2, pp. 19-29, Mar./Apr. 2015.

[16] A. D. Paquette, D. M. Divan, “Design Considerations for Microgrids with Energy Storage”, in Proc. IEEE Energy Convers. Congr. Expo. (ECCE), Sep. 2012, pp. 1966-1973.

[17] W. El-Khattam, M. M. A. Salama, “Distributed Generation Technologies, Definitions and Benefits”, Elsevier Electric Power Systems Research, v. 71, p. 119-128, 2004.

[18] SIEMENS, “Combined Cycle Power Plants”. Disponível em: < https://www.energy.siemens.com/mx/en/industries-utilities/power/processes/combined-cycle.htm/>. Acesso em 15 Set. 2017.

[19] Renewables First, “What is The Difference Between Micro, Mini and Small Hydro?” Disponível em: <http://www.renewablesfirst.co.uk/hydropower/hydropower-learning-centre/what-is-the-difference-between-micro-mini-and-small-hydro/>. Acesso em 15 Set. 2017.

[20] CERPCH – Centro nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas. Disponível em: <http://cerpch.unifei.edu.br/pt/>. Acesso em 15 Set. 2017.

[21] Centro Brasileiro de Energia Eólica - CBEE / UFPE. 2000. Disponível em: < http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/energia_eolica/6_4.htm>. Acesso em 15 Set. 2017.

[22] Tecnologia de Materiais, GE Wind do Brasil. Disponível em: < http://tecnologiademateriais.com.br/portaltm/2017/03/02/ge-brasil-fornecera-82-aerogeradores-cer-energia/post/>. Acesso em 15 Set. 2017.

[23] Itamar Aguiar, Palácio Piratini. Parque Eólico de Osório. Disponível em: < http://www.litoralmania.com.br/osorio-rio-grande-do-sul-comemora-dez-anos-de-energia-eolica-no-estado/>. Acesso em 15 Set. 2017.

[24] Energia Pura. Aerogerador de Pequeno Porte. Disponível em: < http://www.energiapura.com/aerogerador-air-silent-x>. Acesso em 15 Set. 2017.

[25] G. M. Jannuzzi, F. K. O. M. Varella, R. D. M. Gomes “Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica no Brasil: Panorama da Atual Legislação”, Relatório Final. International Energy Initiative para América Latina e UNICAMP, Campinas, Out., 2009.

[26] Portal Solar. Composição de Painéis Fotovoltaicos. Disponível em: < http://www.portalsolar.com.br/como-funciona-o-painel-solar-fotovoltaico.html>. Acesso em 15 Set. 2017.

[27] Portal Solar. Aplicação Residencial de Painéis Fotovoltaicos. Disponível em: < http://www.portalsolar.com.br/como-funciona-o-painel-solar-fotovoltaico.html >. Acesso em 15 Set. 2017.

[28] Ambiente Energia. Aplicação de Painéis Fotovoltaicos em Estádios de Futebol. Disponível em: https://www.ambienteenergia.com.br/index.php/2014/07/mineirao-e-o-primeiro-estadio-receber-selo-leed-platinum/24285>. Acesso em 15 Set. 2017.

[29] Sistel Engenharia. Aplicação Industrial de Painéis Fotovoltaicos. Disponível em: < http://sistelengenharia.com.br/painel-fotovoltaico-aprovado-por-lei/>. Acesso em 15 Set. 2017.

[30] Ambiente Energia. Aplicação de Painéis Fotovoltaicos em Universidades. Disponível em: <https://www.ambienteenergia.com.br/index.php/2015/04/energia-solar-ira-abastecer-centro-universitario-rs/25941>. Acesso em 15 Set. 2017.

[31] J. B. Rodrigues, "Utilização de Capacitores de Grande Porte para Substituição das Baterias Convencionais em Sistemas de Iluminação". 2012. 112 f. Monografia (Especialização em Desenvolvimento de Produtos Eletrônicos) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia - IFSC, Florianópolis.

[32] E. H. C. Rego, "Fornecimento de Energia para Bateria Através de Supercapacitores a Partir de Diferentes Níveis de Carga". 2011. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Manutenção Industrial) - Departamento Acadêmico de Eletromecânica COELM - Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Medianeira.

[33] M. V. P. Alcântara, "Capítulo VII - Microredes Inteligentes: Um Novo Modelo de Negócio para a Distribuição de Energia Elétrica", Portal - O Setor Elétrico, Dez. 2011, Disponível em: <http://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2012/02/Ed71_fasc_smart_grids_cap7.pdf> Acesso em 18 Set. 2017.

[34] SOCOMEC, Armazenamento de Energia – Flywhell de 80 a 900 kVA. Disponível em: < https://www.socomec.com/files/live/sites/systemsite/files/UPS/PDF_catalogue/pdf_web_PT/dcg_1420110_66-67_flywheel.pdf>. Acesso em 18 Set. 2017.

[35] S. Bahramirad, A. Khodaei, J. Svachula, J. R. Aguero, "Building Resilient Integrated Grids: One Neighborhood at a Time," IEEE Electrific. Mag., vol. 3, no. 1, pp. 48-55, Mar. 2015.

[36] A. D. Paquette, D. M. Divan, "Providing Improved Power Quality in Microgrids: Difficulties in Competing With Existing Power-quality Solutions", IEEE Ind. Appl. Mag., vol. 20, no. 5, pp. 34-43, Sep./Oct. 2014.

[37] J. E. Rocha "Qualidade da Energia Elétrica". Departamento de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Curitiba, 2016.

[38] ANEEL, "Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST - Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica", ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, Janeiro, 2017.

[39] Y. W. Li, D. M. Vilathgamuwa, P. C. Loh, "A Grid-interfacing Power Quality Compensator for Three-phase Three-wire Microgrid Applications", IEEE Trans. Power Electron., vol. 21, no. 4, pp. 1021-1031, Jul. 2006.

[40] Y. Li, D. M. Vilathgamuwa, P. C. Loh, "Microgrid Power Quality Enhancement Using a Three-phase Four-wire Grid-interfacing Compensator", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 41, no. 6, pp. 1707-1719, Nov./Dec. 2005.

[41] W. S. Andrade “Avaliação da Confiabilidade de Sistemas de Distribuição e Sub-Transmissão Considerando Geração Distribuída”. 2007. 215 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

[42] R. Yokoyama, T. Niimura, N. Saito, “Modeling and Evaluation of Supply Reliability of Microgrids Including PV and Wind Power”, in Proc. IEEE Power Energy Soc. General Meeting-Convers. Del. Elect. Energy 21st Century, Jul. 2008, pp. 1-5.

[43] A. Khodaei, “Resiliency-oriented Microgrid Optimal Scheduling”, IEEE Trans. Smart Grid, vol. 5, no. 4, pp. 1584-1591, Jul. 2014.

[44] D. J. Cox, “Microgrid Infrastructure Modeling for Residential Microgrids”, in Proc. IEEE Power Eng. Soc. General Meeting, Jun. 2007, pp. 1-6.

[45] A. Bidram, A. Davoudi, “Hierarchical Structure of Microgrids Control System”, IEEE Trans. Smart Grid, vol. 3, no. 4, pp. 1963-1976, Dec. 2012.

[46] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. de Vicuña, M. Castilla,” Hierarchical Control of Droop-controlled AC and DC Microgrids - A General Approach Toward Standardization”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 1, pp. 158-172, Jan. 2011.

[47] J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg, P. Rodríguez, “Control of Power Converters in AC Microgrids”, IEEE Trans. Power Electron., vol. 27, no. 11, pp. 4734-4749, Nov. 2012.

[48] D. E. Olivares, C. A. Canizares, M. Kazerani, “A Centralized Optimal Energy Management System for Microgrids," in Proc. IEEE Power Energy Soc. General Meeting, Jul. 2011, pp. 1-6.

[49] N. Cai, X. Xu, J. Mitra, “A Hierarchical Multi-Agent Control Scheme for a Black Start-Capable Microgrid”, in Proc. IEEE Power Energy Soc. General Meeting, Jul. 2011, pp. 1-7.

[50] J. Driesen, K. Visscher, “Virtual Synchronous Generators”, in Proc. IEEE Power Energy Soc. General Meeting-Convers. Del. Elect. Energy 21st Century, Jul. 2008, pp. 1-3.

[51] H. Laaksonen, P. Saari, R. Komulainen, “Voltage and Frequency Control of Inverter Based Weak LV Network Microgrid”, in Proc. Int. Conf. Future Power Syst., Nov. 2005, pp. 1-6.

[52] I. J. Balaguer, Q. Lei, S. Yang, U. Supatti, F. Z. Peng, “Control for Grid-Connected and Intentional Islanding Operations of Distributed Power Generation”, IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 58, no. 1, pp. 147-157, Jan. 2011.

[53] F. Katiraei, M. R. Iravani, P. W. Lehn, “Micro-Grid Autonomous Operation During and Subsequent to Islanding Process”, IEEE Trans. Power Del., vol. 20, no. 1, pp. 248-257, Jan. 2005.

[54] J. Kennedy, P. Ciufo, A. Agalgaonkar, “Intelligent Load Management in Microgrids”, in Proc. IEEE Power Energy Soc. General Meeting, Jul. 2012, pp. 1-8.

[55] C. L. Martins, “Avaliação dos Impactos da Geração Distribuída para a Proteção do Sistema Elétrico”, 2012. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

[56] R. A. Santos, “Proteção Contra Sobrecorrentes em Redes de Distribuição Aéreas de 13,8 kV: Análise do Desempenho do Sistema Atual e Propostas para Melhoria”, 2012. 42 f. Monografia (Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) - UFMG, Belo Horizonte.

[57] M. R. Miveh, M. Gandomkar, S. Mirsaeidi, M. R. Gharibdoost “A Review on Protection Challenges in Microgrids”, Electrical Power Distribution Networks, Teerã, Iran, 2012.

[58] IEEE Std C37.2-2008, “IEEE Standard of Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms, and Contact Designations” IEEE - Institute of Electrical and Electronic Engineers, p.1-56, 2003.

[59] H. Nikkhajoei, R. H. Lasseter, “Microgrid Protection”, in Proc. IEEE Power Eng. Soc. General Meeting, Jun. 2007, pp. 1-6.

[60] T. S. Ustun, C. Ozansoy, A. Zayegh, “Fault Current Coefficient and Time Delay Assignment for Microgrid Protection System with Central Protection Unit”, IEEE Trans. Power Syst., vol. 28, no. 2, pp. 598-606, May 2013.

[61] International Electrotechnical Comission. IEC-61850. Introduction and Overview. 2003.

[62] R. E. Mackiewicz, “Overview of IEC 61850 and Benefits”, in Proc. IEEE Power Eng. Soc. General Meeting, 2006, pp. 1-8.

[63] T. S. Ustun, C. Ozansoy, A. Zayegh, “Simulation of Communication Infrastructure of a Centralized Microgrid Protection System Based on IEC 61850-7-420”, in Proc. IEEE 3rd Int. Conf. Smart Grid Commun. (SmartGridComm) Nov. 2012, pp. 492-497.

[64] T. S. Ustun, C. Ozansoy, A. Zayegh, “Modeling of a Centralized Microgrid Protection System and Distributed Energy Resources According to IEC 61850-7-420”, IEEE Trans. Power Syst., vol. 27, no. 3, pp. 1560-1567, Aug. 2012.

[65] Y. Zhang, R. A. Dougal, “State of the Art of Fault Current Limiters and their Applications in Smart Grid”, in Proc. IEEE Power Energy Soc. General Meeting, Jul. 2012, pp. 1-6.

[66] T. Ghanbari, E. Farjah, “Unidirectional Fault Current Limiter: An Efficient Interface Between the Microgrid and Main Network”, IEEE Trans. Power Syst., vol. 28, no. 2, pp. 1591-1598, May 2012.

[67] C. Pereira, “Redes Elétricas no Domínio da Frequência” Artliber Editora, 1ª Edição, São Paulo, 2015.

[68] C. L. Fortescue, “Method of Symmetrical Co-ordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks” 34th Annual Convention of the American Institute of Electrical Engineers, Atlantic City, N. J., June 28, 1918.

[69] C. Pereira, "Notas de Aula - Proteção de SEP". Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.

[70] D. Amaral, C. Pereira, S. M. Silva, “Cálculo de Correntes de Curto-Circuito e Ajuste dos Relés de Proteção em Microredes”, XV-CEEL Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica, Nov. 2017.

[71] J. I. L. Seguel, “Projeto de um Sistema Fotovoltaico Autônomo de Suprimento de Energia Usando Técnica MPPT e Controle Digital”, 2009. 206f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia, UFMG, Belo Horizonte.

Apêndice A*

SIMULAÇÕES DE CURTO-CIRCUITO (SIMULAÇÃO A)

- **Status On-Grid - Linha D Desligada - Sistemas Fot. e Geradores Diesel Desligados**

Simulação de Curto-Circuito nas Barras da Microrrede – Correntes Totais de Falta (kA) Componentes de Fase - Status On-Grid - Linha D Desligada - Sistemas Fotov. e Geradores Diesel Desligados								
Barras	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
AT **Fases ABC**	21,39 - j14,97	15,31 - j11,01	14,49 - j10,45	10,73 - j7,87	17,85 - j12,69	17,28 - j12,31	12,62 - j9,18	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
BC **Fases ABC**	0	0	0	0	0	0	0	0
	-12,96 -j18,52	-9,53 - j13,26	-9,05 - j12,55	-6,82 - j9,29	-10,99 -j15,46	-10,66 -j14,96	-7,95 - j10,93	0
	12,96 +j18,52	9,53 + j13,26	9,05 + j12,55	6,82 + j9,29	10,99 +j15,46	10,66 +j14,96	7,95 + j10,93	0
BCT **Fases ABC**	0	0	0	0	0	0	0	0
	-23,66 -j11,04	-17,19 - j7,75	-16,31 - j7,32	-12,19 - j5,35	-19,91 - j9,11	-19,30 - j8,81	-14,26 - j6,34	0
	2,26 + j26,01	1,87 + j18,77	1,81 + j17,77	1,45 + j13,23	2,06 + j21,81	2,02 + j21,12	1,64 + j15,52	0
ABC **Fases ABC**	21,39 - j14,97	15,31 - j11,01	14,49 - j10,45	10,73 - j7,87	17,85 - j12,69	17,28 - j12,31	12,62 - j9,18	0
	-23,66 -j11,04	-17,19 - j7,75	-16,31 - j7,32	-12,19 - j5,35	-19,91 - j9,11	-19,31 - j8,81	-14,26 - j6,34	0
	2,26 + j26,01	1,87 + j18,77	1,81 + j17,77	1,45 + j13,23	2,06 + j21,80	2,02 + j21,12	1,64 + j15,52	0
ABCT **Fases ABC**	21,39 - j14,97	15,31 - j11,01	14,49 - j10,45	10,73 - j7,87	17,85 - j12,69	17,28 - j12,31	12,62 - j9,18	0
	-23,66 -j11,04	-17,19 - j7,75	-16,31 - j7,32	-12,19 - j5,35	-19,91 - j9,11	-19,31 - j8,81	-14,26 - j6,34	0
	2,26 + j26,01	1,87 + j18,77	1,81 + j17,77	1,45 + j13,23	2,06 + j21,80	2,02 + j21,12	1,64 + j15,52	0

Simulação de Curto-Circuito nas Barras da Microrrede – Tensões Totais de Falta (kV) Componentes de Fase - Status On-Grid - Linha D Desligada - Sistemas Fotov. e Geradores Diesel Desligados								
Barras	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
AT **Fases ABC**	0	0	0	0	0	0	0	0
	-6,90 - j11,95	-6,90 - j11,95	-6,90 - j11,95	-6,90 - j11,95	-6,90 - j11,95	-6,90 - j11,95	-6,90 - j11,95	0
	-6,90 + j11,95	-6,90 + j11,95	-6,90 + j11,95	-6,90 + j11,95	-6,90 + j11,95	-6,90 + j11,95	-6,90 + j11,95	0
BC **Fases ABC**	13,80 - j0	13,80 - j0	13,80 - j0	13,80 - j0	13,80 - j0	13,80 - j0	13,80 - j0	0
	-6,90 + j0	-6,90 + j0	-6,90 + j0	-6,90 + j0	-6,90 + j0	-6,90 + j0	-6,90 + j0	0
	-6,90 + j0	-6,90 + j0	-6,90 + j0	-6,90 + j0	-6,90 + j0	-6,90 + j0	-6,90 + j0	0
BCT **Fases ABC**	13,80 - j0	13,80 - j0	13,80 - j0	13,80 - j0	13,80 - j0	13,80 - j0	13,80 - j0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
ABC **Fases ABC**	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
ABCT **Fases ABC**	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0

Simulação de Curto-Circuito Tipo AT nas Barras da Microrrede **Correntes Totais (kA / °) - Status On-Grid - Linha D Desligada - Sistemas Fotov. e Geradores Diesel Desligados**																
Elem./Barra Fases ABC	**1**		**2**		**3**		**4**		**5**		**6**		**7**		**8**	
	Mód.	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**
1	26,1	-35	18,9	-35,7	17,9	-35,8	13,3	-36,3	21,9	-35,4	21,2	-35,5	15,6	-36	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	18,9	-35,7	0	0	13,3	-36,3	21,9	-35,4	0	0	15,6	-36	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	18,9	-35,7	0	0	13,3	-36,3	0	0	0	0	15,6	-36	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	17,9	-35,8	0	0	0	0	21,2	-35,5	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	17,9	-35,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	13,3	-36,3	0	0	0	0	15,6	-36	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	13,3	-36,3	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Simulação de Curto-Circuito Tipo BC nas Barras da Microrrede **Correntes Totais (kA / °) - Status On-Grid - Linha D Desligada - Sistemas Fotov. e Geradores Diesel Desligados**																
Elem./Barra Fases ABC	**1**		**2**		**3**		**4**		**5**		**6**		**7**		**8**	
	Mód.	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	22,6	-125	16,3	-126	15,5	-126	11,5	-126	19	-125	18,4	-125	13,5	-126	0	0
	22,6	55	16,3	54,3	15,5	54,2	11,5	53,7	19	54,6	18,4	54,5	13,5	54	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	16,3	-126	0	0	11,5	-126	19	-125	0	0	13,5	-126	0	0
	0	0	16,3	54,3	0	0	11,5	53,7	19	54,6	0	0	13,5	54	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	16,3	-126	0	0	11,5	-126	0	0	0	0	13,5	-126	0	0
	0	0	16,3	54,3	0	0	11,5	53,7	0	0	0	0	13,5	54	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	15,5	-126	0	0	0	0	18,4	-125	0	0	0	0
	0	0	0	0	15,5	54,2	0	0	0	0	18,4	54,5	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	15,5	-126	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	15,5	54,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	11,5	-126	0	0	0	0	13,5	-126	0	0
	0	0	0	0	0	0	11,5	53,7	0	0	0	0	13,5	54	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	11,5	-126	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	11,5	53,7	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Simulação de Curto-Circuito Tipo BCT nas Barras da Microrrede **Correntes Totais (kA / °) - Status On-Grid - Linha D Desligada - Sistemas Fotov. e Geradores Diesel Desligados**																
Elem./Barra Fases ABC	**1**		**2**		**3**		**4**		**5**		**6**		**7**		**8**	
	Mód.	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	26,1	-155	18,9	-156	17,9	-156	13,3	-156	21,9	-155	21,2	-155	15,6	-156	0	0
	26,1	85	18,9	84,3	17,9	84,2	13,3	83,7	21,9	84,6	21,2	84,5	15,6	84	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	18,9	-156	0	0	13,3	-156	21,9	-155	0	0	15,6	-156	0	0
	0	0	18,9	84,3	0	0	13,3	83,7	21,9	84,6	0	0	15,6	84	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	18,9	-156	0	0	13,3	-156	0	0	0	0	15,6	-156	0	0
	0	0	18,9	84,3	0	0	13,3	83,7	0	0	0	0	15,6	84	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	17,9	-156	0	0	0	0	21,2	-155	0	0	0	0
	0	0	0	0	17,9	84,2	0	0	0	0	21,2	84,5	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	17,9	-156	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	17,9	84,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	13,3	-156	0	0	0	0	15,6	-156	0	0
	0	0	0	0	0	0	13,3	83,7	0	0	0	0	15,6	84	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	13,3	-156	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	13,3	83,7	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Simulação de Curto-Circuito Tipo ABC nas Barras da Microrrede **Correntes Totais (kA / °) - Status On-Grid - Linha D Desligada - Sistemas Fotov. e Geradores Diesel Desligados**																
Elem./Barra Fases ABC	**1**		**2**		**3**		**4**		**5**		**6**		**7**		**8**	
	Mód.	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**
1	26,1	-35	18,9	-35,7	17,9	-35,8	13,3	-36,3	21,9	-35,4	21,2	-35,5	15,6	-36	0	0
	26,1	-155	18,9	-156	17,9	-156	13,3	-156	21,9	-155	21,2	-155	15,6	-156	0	0
	26,1	85	18,9	84,3	17,9	84,2	13,3	83,7	21,9	84,6	21,2	84,5	15,6	84	0	0
2	0	0	18,9	-35,7	0	0	13,3	-36,3	21,9	-35,4	0	0	15,6	-36	0	0
	0	0	18,9	-156	0	0	13,3	-156	21,9	-155	0	0	15,6	-156	0	0
	0	0	18,9	84,3	0	0	13,3	83,7	21,9	84,6	0	0	15,6	84	0	0
3	0	0	18,9	-35,7	0	0	13,3	-36,3	0	0	0	0	15,6	-36	0	0
	0	0	18,9	-156	0	0	13,3	-156	0	0	0	0	15,6	-156	0	0
	0	0	18,9	84,3	0	0	13,3	83,7	0	0	0	0	15,6	84	0	0
4	0	0	0	0	17,9	-35,8	0	0	0	0	21,2	-35,5	0	0	0	0
	0	0	0	0	17,9	-156	0	0	0	0	21,2	-155	0	0	0	0
	0	0	0	0	17,9	84,2	0	0	0	0	21,2	84,5	0	0	0	0
5	0	0	0	0	17,9	-35,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	17,9	-156	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	17,9	84,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	13,3	-36,3	0	0	0	0	15,6	-36	0	0
	0	0	0	0	0	0	13,3	-156	0	0	0	0	15,6	-156	0	0
	0	0	0	0	0	0	13,3	83,7	0	0	0	0	15,6	84	0	0
9	0	0	0	0	0	0	13,3	-36,3	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	13,3	-156	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	13,3	83,7	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Simulação de Curto-Circuito Tipo ABCT nas Barras da Microrrede **Correntes Totais (kA / °) - Status On-Grid - Linha D Desligada - Sistemas Fotov. e Geradores Diesel Desligados**																
Elem./Barra Fases ABC	**1**		**2**		**3**		**4**		**5**		**6**		**7**		**8**	
	Mód.	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**
1	26,1	-35	18,9	-35,7	17,9	-35,8	13,3	-36,3	21,9	-35,4	21,2	-35,5	15,6	-36	0	0
	26,1	-155	18,9	-156	17,9	-156	13,3	-156	21,9	-155	21,2	-155	15,6	-156	0	0
	26,1	85	18,9	84,3	17,9	84,2	13,3	83,7	21,9	84,6	21,2	84,5	15,6	84	0	0
2	0	0	18,9	-35,7	0	0	13,3	-36,3	21,9	-35,4	0	0	15,6	-36	0	0
	0	0	18,9	-156	0	0	13,3	-156	21,9	-155	0	0	15,6	-156	0	0
	0	0	18,9	84,3	0	0	13,3	83,7	21,9	84,6	0	0	15,6	84	0	0
3	0	0	18,9	-35,7	0	0	13,3	-36,3	0	0	0	0	15,6	-36	0	0
	0	0	18,9	-156	0	0	13,3	-156	0	0	0	0	15,6	-156	0	0
	0	0	18,9	84,3	0	0	13,3	83,7	0	0	0	0	15,6	84	0	0
4	0	0	0	0	17,9	-35,8	0	0	0	0	21,2	-35,5	0	0	0	0
	0	0	0	0	17,9	-156	0	0	0	0	21,2	-155	0	0	0	0
	0	0	0	0	17,9	84,2	0	0	0	0	21,2	84,5	0	0	0	0
5	0	0	0	0	17,9	-35,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	17,9	-156	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	17,9	84,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	13,3	-36,3	0	0	0	0	15,6	-36	0	0
	0	0	0	0	0	0	13,3	-156	0	0	0	0	15,6	-156	0	0
	0	0	0	0	0	0	13,3	83,7	0	0	0	0	15,6	84	0	0
9	0	0	0	0	0	0	13,3	-36,3	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	13,3	-156	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	13,3	83,7	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Apêndice B*

SIMULAÇÕES DE CURTO-CIRCUITO (SIMULAÇÃO B)

- **Status On-Grid - Linha D Desligada - Sistemas Fot. Desligadas - G. Diesel Ligados**

Simulação de Curto-Circuito nas Barras da Microrrede – Correntes Totais de Falta (kA) Componentes de Fase - Status On-Grid - Linha D Desligada - Sistemas Fotov. Desligadas - G. Diesel Ligados								
Barras	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
AT **Fases ABC**	36,74 - j23,67	29,82 - j19,01	25,38 - j16,53	21,03 - j13,57	32,21 - j20,81	29,39 - j19,23	24,04 - j15,61	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
BC **Fases ABC**	0	0	0	0	0	0	0	0
	-17,35 - j26,77	-13,42 - j20,69	-11,99 - j18,02	-9,57 - j14,50	-15,04 - j23,08	-14,11 - j21,34	-11,10 - j16,86	0
	17,35 + j26,77	13,42 + j20,69	11,99 + j18,02	9,57 + j14,50	15,04 + j23,08	14,11 + j21,34	11,10 + j16,86	0
BCT **Fases ABC**	0	0	0	0	0	0	0	0
	-35,17 - j12,42	-28,20 - j8,43	-24,79 - j7,78	-20,10 - j5,70	-30,69 - j10,19	-28,55 - j9,68	-22,90 - j6,93	0
	-2,64 + j37,25	-3,49 + j28,88	-2,30 + j25,44	-2,48 + j20,38	-2,70 + j32,19	-2,02 + j29,94	-2,39 + j23,63	0
ABC **Fases ABC**	26,25 - j17,39	19,53 - j13,11	17,62 - j12,06	13,67 - j9,35	22,28 - j14,91	21,01 - j14,22	16,01 - j10,89	0
	-28,18 - j14,03	-21,12 - j10,36	-19,26 - j9,23	-14,94 - j7,16	-24,05 - j11,84	-22,82 - j11,08	-17,44 - j8,42	0
	1,93 + j31,43	1,58 + j23,47	1,63 + j21,29	1,26 + j16,52	1,76 + j26,75	1,81 + j25,30	1,42 + j19,31	0
ABCT **Fases ABC**	26,25 - j17,39	19,53 - j13,11	17,62 - j12,06	13,67 - j9,35	22,28 - j14,91	21,01 - j14,22	16,01 - j10,89	0
	-28,18 - j14,03	-21,12 - j10,36	-19,26 - j9,23	-14,94 - j7,16	-24,05 - j11,84	-22,82 - j11,08	-17,44 - j8,42	0
	1,93 + j31,43	1,58 + j23,47	1,63 + j21,29	1,26 + j16,52	1,76 + j26,75	1,81 + j25,30	1,42 + j19,31	0

Simulação de Curto-Circuito nas Barras da Microrrede – Tensões Totais de Falta (kV) Componentes de Fase - Status On-Grid - Linha D Desligada - Sistemas Fotov. Desligadas - G. Diesel Ligados								
Barras	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
AT **Fases ABC**	0	0	0	0	0	0	0	0
	-4,44 - j10,30	-3,77 - j9,73	-4,14 - j10,14	-3,70 - j9,68	-4,21 - j10,09	-4,41 - j10,31	-3,92 - j9,85	0
	-4,21 + j10,38	-3,36 + j10,01	-3,81 + j10,46	-3,25 + j10,03	-3,91 + j10,22	-4,16 + j10,47	-3,54 + j10,07	0
BC **Fases ABC**	11,45 - j0,16	10,89 - j0,25	11,44 - j0,21	10,89 - j0,28	11,22 - j0,19	11,52 - j0,17	10,99 - j0,25	0
	-5,72 + j0,08	-5,44 + j0,12	-5,72 + j0,11	-5,44 + j0,14	-5,61 + j0,09	-5,76 + j0,08	-5,49 + j0,12	0
	-5,72 + j0,08	-5,45 + j0,13	-5,72 + j0,10	-5,44 + j0,14	-5,61 + j0,09	-5,76 + j0,08	-5,49 + j0,12	0
BCT **Fases ABC**	8,95 - j0,16	7,60 - j0,33	8,50 - j0,35	7,48 - j0,40	8,46 - j0,21	8,95 - j0,21	7,88 - j0,29	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
ABC **Fases ABC**	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
ABCT **Fases ABC**	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0

Simulação de Curto-Circuito Tipo AT nas Barras da Microrrede **Correntes Totais (kA / °) - Status On-Grid - Linha D Desligada - Sistemas Fotov. Desligadas - G. Diesel Ligados**																
Elem./Barra Fases ABC	**1**		**2**		**3**		**4**		**5**		**6**		**7**		**8**	
	Mód.	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**
	26,1	-35	17,8	-36,1	16	-36,5	11	-37,5	21,1	-35,7	19,8	-35,9	13,5	-37,1	0	0
1	5,6	179	5,52	180	4,65	179	4,26	-180	5,45	179	4,94	179	4,68	180	0	0
	5,89	115	5,82	115	4,88	116	4,54	113	5,74	115	5,19	115	4,96	114	0	0
	10,9	150	21,7	-35,2	6,05	148	13,2	-36,8	26,2	-34,6	7,89	149	16,4	-36,3	0	0
2	3,19	-179	4,53	179	1,24	-170	3,95	179	3,86	179	2	-176	4,1	178	0	0
	3,41	111	4,72	118	1,56	89,9	4,15	118	4,05	115	2,24	102	4,29	118	0	0
	10,9	150	21,7	-35,2	6,05	148	13,2	-36,8	12,2	151	7,89	149	16,4	-36,3	0	0
3	3,19	-179	4,53	179	1,24	-170	3,95	179	3,86	179	2	-176	4,1	178	0	0
	3,41	111	4,72	118	1,56	89,9	4,15	118	4,05	115	2,24	102	4,29	118	0	0
	6,74	151	3,98	149	22	-35,3	2,18	147	5,12	150	27,6	-34,6	2,86	148	0	0
4	2,41	177	0,99	-176	3,44	175	0,34	-158	1,59	179	2,96	175	0,59	-170	0	0
	2,5	120	1,14	101	3,54	127	0,52	73,2	1,69	113	3,05	125	0,74	90	0	0
	6,74	151	3,98	149	22	-35,3	2,18	147	5,12	150	7,55	152	2,86	148	0	0
5	2,41	177	0,99	-176	3,44	175	0,34	-158	1,59	179	2,96	175	0,59	-170	0	0
	2,5	120	1,14	101	3,54	127	0,52	73,2	1,69	113	3,05	125	0,74	90	0	0
	6,21	-29	7,83	-27,2	3,41	-31,4	4,15	-30,1	6,97	-28,2	4,47	-30,3	5,55	-28,8	0	0
6	2,11	-2,23	2,96	-3,14	0,85	3,9	1,12	2,6	2,53	-3,06	1,34	-0,28	1,84	-1,52	0	0
	2,17	-61,4	3,01	-55,1	0,98	-79,1	1,26	-74	2,58	-57,7	1,42	-68,7	1,91	-62,4	0	0
	6,74	-28,8	3,98	-30,8	8,35	-27,2	2,18	-33,1	5,12	-29,8	7,55	-28	2,86	-32,1	0	0
7	2,41	-3,41	0,99	4,48	3,44	-5,35	0,34	22,3	1,59	-0,93	2,96	-4,93	0,59	9,88	0	0
	2,5	-59,5	1,14	-78,6	3,54	-52,9	0,52	-107	1,69	-66,5	3,05	-55,3	0,74	-90	0	0
	4,7	149	5,87	150	2,64	147	17,4	-35,2	5,24	149	3,42	147	21,9	-34,4	0	0
8	1,09	-174	1,58	-177	0,41	-158	2,84	177	1,33	-176	0,67	-169	2,26	178	0	0
	1,29	97,3	1,77	106	0,63	73	2,93	123	1,52	103	0,87	87	2,38	118	0	0
	4,7	149	5,87	150	2,64	147	17,4	-35,2	5,24	149	3,42	147	6,81	151	0	0
9	1,09	-174	1,58	-177	0,41	-158	2,84	177	1,33	-176	0,67	-169	2,26	178	0	0
	1,29	97,3	1,77	106	0,63	73	2,93	123	1,52	103	0,87	87	2,38	118	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4,7	-31,4	5,87	-29,7	2,64	-33,3	7,74	-27,6	5,24	-30,6	3,42	-32,5	6,81	-28,6	0	0
12	1,09	6,12	1,58	2,93	0,41	22,1	2,84	-3,04	1,33	3,82	0,67	11,4	2,26	-1,6	0	0
	1,29	-82,7	1,77	-73,6	0,63	-107	2,93	-57,2	1,52	-77,2	0,87	-93	2,38	-62,3	0	0

Simulação de Curto-Circuito Tipo BC nas Barras da Microrrede **Correntes Totais (kA / °) - Status On-Grid - Linha D Desligada - Sistemas Fotov. Desligadas - G. Diesel Ligados**																
Elem./Barra Fases ABC	**1**		**2**		**3**		**4**		**5**		**6**		**7**		**8**	
	Mód.	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**
1	4,45	-30,9	4,26	-30,6	3,55	-31,1	3,38	-31,1	4,3	-30,9	3,88	-31,2	3,71	-31	0	0
	22,9	-131	16,1	-134	14,6	-133	10,5	-137	18,8	-132	17,8	-132	12,7	-135	0	0
	22,6	60,7	15,7	61,7	14,3	60,7	10,2	62,2	18,5	61	17,5	60,5	12,3	61,8	0	0
2	2,76	-31,8	3,27	-29,9	1,54	-35,2	2,84	-30	3,02	-30,8	2,02	-33,5	2,99	-30,1	0	0
	6,24	74,4	18,2	-130	3,85	71,5	11,8	-133	21,4	-129	4,77	72,8	14,3	-132	0	0
	6,08	-131	17,9	60,1	3,71	-132	11,5	60,5	21,2	59,4	4,63	-132	14	60,1	0	0
3	2,76	-31,8	3,27	-29,9	1,54	-35,2	2,84	-30	3,02	-30,8	2,02	-33,5	2,99	-30,1	0	0
	6,24	74,4	18,2	-130	3,85	71,5	11,8	-133	6,63	75,4	4,77	72,8	14,3	-132	0	0
	6,08	-131	17,9	60,1	3,71	-132	11,5	60,5	6,47	-131	4,63	-132	14	60,1	0	0
4	1,69	-29,6	0,99	-32,9	2,01	-27,9	0,54	-36,9	1,28	-31,2	1,86	-28,6	0,72	-34,9	0	0
	3,48	76,7	2,32	73,4	18,2	-128	1,46	70,2	2,8	75	22,2	-127	1,79	71,7	0	0
	3,42	-132	2,25	-131	17,9	58,1	1,39	-132	2,73	-132	22	57,9	1,73	-132	0	0
5	1,69	-29,6	0,99	-32,9	2,01	-27,9	0,54	-36,9	1,28	-31,2	1,86	-28,6	0,72	-34,9	0	0
	3,48	76,7	2,32	73,4	18,2	-128	1,46	70,2	2,8	75	3,67	77,8	1,79	71,7	0	0
	3,42	-132	2,25	-131	17,9	58,1	1,39	-132	2,73	-132	3,61	-132	1,73	-132	0	0
6	1,54	150	1,82	151	0,87	146	1,02	148	1,68	151	1,13	148	1,34	150	0	0
	3,31	-104	3,74	-102	2,04	-107	2,33	-106	3,51	-103	2,53	-106	2,88	-104	0	0
	3,24	48,5	3,67	49,1	1,98	47,9	2,27	48,7	3,45	48,7	2,46	48	2,82	48,7	0	0
7	1,69	150	0,99	147	2,01	152	0,54	143	1,28	149	1,86	151	0,72	145	0	0
	3,48	-103	2,32	-107	3,85	-101	1,46	-110	2,8	-105	3,67	-102	1,79	-108	0	0
	3,42	48,3	2,25	48,6	3,8	48,2	1,39	48,4	2,73	48,3	3,61	48,2	1,73	48,3	0	0
8	1,22	-33,5	1,45	-31,5	0,68	-37,2	1,82	-28,9	1,34	-32,4	0,89	-35,4	1,65	-30	0	0
	2,93	73	3,31	74,8	1,81	70	13,9	-129	3,12	73,9	2,25	71,4	16,9	-127	0	0
	2,84	-131	3,22	-131	1,74	-132	13,7	58,6	3,03	-131	2,17	-132	16,8	58,2	0	0
9	1,22	-33,5	1,45	-31,5	0,68	-37,2	1,82	-28,9	1,34	-32,4	0,89	-35,4	1,65	-30	0	0
	2,93	73	3,31	74,8	1,81	70	13,9	-129	3,12	73,9	2,25	71,4	3,53	76,3	0	0
	2,84	-131	3,22	-131	1,74	-132	13,7	58,6	3,03	-131	2,17	-132	3,45	-131	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	1,22	147	1,45	148	0,68	143	1,82	151	1,34	148	0,89	145	1,65	150	0	0
	2,93	-107	3,31	-105	1,81	-110	3,74	-103	3,12	-106	2,25	-109	3,53	-104	0	0
	2,84	48,6	3,22	49,2	1,74	48,2	3,67	49	3,03	48,8	2,17	48,2	3,45	48,9	0	0

Simulação de Curto-Circuito Tipo BCT nas Barras da Microrrede **Correntes Totais (kA / °) - Status On-Grid - Linha D Desligada - Sistemas Fotov. Desligadas - G. Diesel Ligados**																
Elem./Barra Fases ABC	**1**		**2**		**3**		**4**		**5**		**6**		**7**		**8**	
	Mód.	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**
	9,18	-33	8,96	-32,7	7,63	-32,7	7,01	-33,4	8,89	-33,1	8,12	-33,1	7,65	-33,3	0	0
1	26,1	-155	18,2	-155	16,6	-155	11,9	-155	21,4	-155	20,3	-155	14,3	-155	0	0
	26,1	85	18,2	83,1	16,6	82,4	11,9	80,4	21,4	83,8	20,3	83,3	14,3	81,2	0	0
	5,37	-34,2	7,23	-31,7	2,39	-40,6	6,34	-31,9	6,27	-32,8	3,55	-36,9	6,55	-32,1	0	0
2	7,14	8,54	20,6	-157	3,98	11,8	13,3	-156	24,6	-158	5,17	10,4	16,1	-156	0	0
	7,6	-68,8	20,7	86,7	4,29	-75,6	13,4	82,8	24,5	88	5,55	-72,7	16,2	84	0	0
	5,37	-34,2	7,23	-31,7	2,39	-40,6	6,34	-31,9	6,27	-32,8	3,55	-36,9	6,55	-32,1	0	0
3	7,14	8,54	20,6	-157	3,98	11,8	13,3	-156	8,03	5,9	5,17	10,4	16,1	-156	0	0
	7,6	-68,8	20,7	86,7	4,29	-75,6	13,4	82,8	8,45	-65	5,55	-72,7	16,2	84	0	0
	3,81	-31,4	1,74	-37,1	5,27	-29,1	0,69	-46,5	2,62	-33,6	4,58	-30,1	1,1	-40,7	0	0
4	4,46	4,09	2,57	7,08	20,5	-158	1,4	13,3	3,34	5,61	25,3	-158	1,83	10,8	0	0
	4,68	-62,5	2,76	-69,2	20,7	86,9	1,54	-78,7	3,54	-65,9	25,4	88,4	2	-74,9	0	0
	3,81	-31,4	1,74	-37,1	5,27	-29,1	0,69	-46,5	2,62	-33,6	4,58	-30,1	1,1	-40,7	0	0
5	4,46	4,09	2,57	7,08	20,5	-158	1,4	13,3	3,34	5,61	5,11	1,7	1,83	10,8	0	0
	4,68	-62,5	2,76	-69,2	20,7	86,9	1,54	-78,7	3,54	-65,9	5,28	-58,6	2	-74,9	0	0
	3,36	148	4,52	151	1,53	143	1,93	144	3,92	149	2,24	146	2,93	148	0	0
6	4,12	-174	5,38	-179	2,25	-171	2,72	-175	4,67	-177	2,96	-173	3,69	-177	0	0
	4,31	116	5,47	124	2,39	109	2,87	114	4,83	120	3,12	112	3,84	118	0	0
	3,81	149	1,74	143	5,27	151	0,69	134	2,62	146	4,58	150	1,1	139	0	0
7	4,46	-176	2,57	-173	5,82	179	1,4	-167	3,34	-174	5,11	-178	1,83	-169	0	0
	4,68	118	2,76	111	5,91	125	1,54	101	3,54	114	5,28	121	2	105	0	0
	2,01	-38	2,72	-35,3	0,87	-46,2	4,42	-30,3	2,36	-36,5	1,32	-41,3	3,62	-32,1	0	0
8	3,03	12,6	3,81	6,27	1,73	16	15,8	-159	3,37	9,67	2,23	14,6	19,6	-160	0	0
	3,32	-74,8	4,06	-66,5	1,91	-81,1	15,9	88,1	3,66	-71,1	2,45	-78,5	19,5	90,4	0	0
	2,01	-38	2,72	-35,3	0,87	-46,2	4,42	-30,3	2,36	-36,5	1,32	-41,3	3,62	-32,1	0	0
9	3,03	12,6	3,81	6,27	1,73	16	15,8	-159	3,37	9,67	2,23	14,6	4,51	3,24	0	0
	3,32	-74,8	4,06	-66,5	1,91	-81,1	15,9	88,1	3,66	-71,1	2,45	-78,5	4,72	-61,4	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2,01	142	2,72	145	0,87	134	4,42	150	2,36	144	1,32	139	3,62	148	0	0
12	3,03	-167	3,81	-174	1,73	-164	5,3	-180	3,37	-170	2,23	-165	4,51	-177	0	0
	3,32	105	4,06	113	1,91	98,9	5,41	124	3,66	109	2,45	102	4,72	119	0	0

Simulação de Curto-Circuito Tipo ABC nas Barras da Microrrede **Correntes Totais (kA / °) - Status On-Grid - Linha D Desligada - Sistemas Fotov. Desligadas - G. Diesel Ligados**																
Elem./Barra Fases ABC	**1**		**2**		**3**		**4**		**5**		**6**		**7**		**8**	
	Mód.	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**
1	26,1	-35	18,5	-35,9	17,1	-36,2	12,5	-36,9	21,7	-35,5	20,7	-35,7	14,9	-36,5	0	0
	26,1	-155	18,5	-156	17,1	-156	12,5	-157	21,7	-156	20,7	-156	14,9	-157	0	0
	26,1	85	18,5	84,1	17,1	83,8	12,5	83,1	21,7	84,5	20,7	84,3	14,9	83,5	0	0
2	3,57	153	19,8	-35,3	2,34	152	13,4	-36,3	23,2	-34,9	2,83	153	16	-35,9	0	0
	3,57	33,3	19,8	-155	2,34	32,1	13,4	-156	23,2	-155	2,83	32,6	16	-156	0	0
	3,57	-86,7	19,8	84,7	2,34	-87,9	13,4	83,7	23,2	85,1	2,83	-87,4	16	84,1	0	0
3	3,57	153	19,8	-35,3	2,34	152	13,4	-36,3	3,66	154	2,83	153	16	-35,9	0	0
	3,57	33,3	19,8	-155	2,34	32,1	13,4	-156	3,66	33,6	2,83	32,6	16	-156	0	0
	3,57	-86,7	19,8	84,7	2,34	-87,9	13,4	83,7	3,66	-86,4	2,83	-87,4	16	84,1	0	0
4	1,86	154	1,32	153	19,5	-35,2	0,89	152	1,54	153	23,5	-34,7	1,06	152	0	0
	1,86	33,8	1,32	32,8	19,5	-155	0,89	31,8	1,54	33,2	23,5	-155	1,06	32,2	0	0
	1,86	-86,2	1,32	-87,2	19,5	84,8	0,89	-88,2	1,54	-86,8	23,5	85,3	1,06	-87,8	0	0
5	1,86	154	1,32	153	19,5	-35,2	0,89	152	1,54	153	1,89	154	1,06	152	0	0
	1,86	33,8	1,32	32,8	19,5	-155	0,89	31,8	1,54	33,2	1,89	34	1,06	32,2	0	0
	1,86	-86,2	1,32	-87,2	19,5	84,8	0,89	-88,2	1,54	-86,8	1,89	-86	1,06	-87,8	0	0
6	1,82	-26,4	1,92	-25,8	1,2	-27,7	1,3	-26,8	1,87	-26,1	1,44	-27,2	1,55	-26,4	0	0
	1,82	-146	1,92	-146	1,2	-148	1,3	-147	1,87	-146	1,44	-147	1,55	-146	0	0
	1,82	93,6	1,92	94,2	1,2	92,3	1,3	93,2	1,87	93,9	1,44	92,8	1,55	93,6	0	0
7	1,86	-26,2	1,32	-27,2	1,92	-25,8	0,89	-28,2	1,54	-26,8	1,89	-26	1,06	-27,8	0	0
	1,86	-146	1,32	-147	1,92	-146	0,89	-148	1,54	-147	1,89	-146	1,06	-148	0	0
	1,86	93,8	1,32	92,8	1,92	94,2	0,89	91,8	1,54	93,2	1,89	94	1,06	92,2	0	0
8	1,75	153	1,84	154	1,15	152	14,7	-35,5	1,79	153	1,39	152	17,5	-35,1	0	0
	1,75	33,1	1,84	33,7	1,15	31,8	14,7	-156	1,79	33,4	1,39	32,3	17,5	-155	0	0
	1,75	-86,9	1,84	-86,3	1,15	-88,2	14,7	84,5	1,79	-86,6	1,39	-87,7	17,5	84,9	0	0
9	1,75	153	1,84	154	1,15	152	14,7	-35,5	1,79	153	1,39	152	1,88	154	0	0
	1,75	33,1	1,84	33,7	1,15	31,8	14,7	-156	1,79	33,4	1,39	32,3	1,88	33,9	0	0
	1,75	-86,9	1,84	-86,3	1,15	-88,2	14,7	84,5	1,79	-86,6	1,39	-87,7	1,88	-86,1	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	1,75	-26,9	1,84	-26,3	1,15	-28,2	1,92	-25,8	1,79	-26,6	1,39	-27,7	1,88	-26,1	0	0
	1,75	-147	1,84	-146	1,15	-148	1,92	-146	1,79	-147	1,39	-148	1,88	-146	0	0
	1,75	93,1	1,84	93,7	1,15	91,8	1,92	94,2	1,79	93,4	1,39	92,3	1,88	93,9	0	0

Simulação de Curto-Circuito Tipo ABCT nas Barras da Microrrede **Correntes Totais (kA / °) - Status On-Grid - Linha D Desligada - Sistemas Fotov. Desligadas - G. Diesel Ligados**																
Elem./Barra Fases ABC	**1**		**2**		**3**		**4**		**5**		**6**		**7**		**8**	
	Mód.	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**
1	26,1	-35	18,5	-35,9	17,1	-36,2	12,5	-36,9	21,7	-35,5	20,7	-35,7	14,9	-36,5	0	0
	26,1	-155	18,5	-156	17,1	-156	12,5	-157	21,7	-156	20,7	-156	14,9	-157	0	0
	26,1	85	18,5	84,1	17,1	83,8	12,5	83,1	21,7	84,5	20,7	84,3	14,9	83,5	0	0
2	3,57	153	19,8	-35,3	2,34	152	13,4	-36,3	23,2	-34,9	2,83	153	16	-35,9	0	0
	3,57	33,3	19,8	-155	2,34	32,1	13,4	-156	23,2	-155	2,83	32,6	16	-156	0	0
	3,57	-86,7	19,8	84,7	2,34	-87,9	13,4	83,7	23,2	85,1	2,83	-87,4	16	84,1	0	0
3	3,57	153	19,8	-35,3	2,34	152	13,4	-36,3	3,66	154	2,83	153	16	-35,9	0	0
	3,57	33,3	19,8	-155	2,34	32,1	13,4	-156	3,66	33,6	2,83	32,6	16	-156	0	0
	3,57	-86,7	19,8	84,7	2,34	-87,9	13,4	83,7	3,66	-86,4	2,83	-87,4	16	84,1	0	0
4	1,86	154	1,32	153	19,5	-35,2	0,89	152	1,54	153	23,5	-34,7	1,06	152	0	0
	1,86	33,8	1,32	32,8	19,5	-155	0,89	31,8	1,54	33,2	23,5	-155	1,06	32,2	0	0
	1,86	-86,2	1,32	-87,2	19,5	84,8	0,89	-88,2	1,54	-86,8	23,5	85,3	1,06	-87,8	0	0
5	1,86	154	1,32	153	19,5	-35,2	0,89	152	1,54	153	1,89	154	1,06	152	0	0
	1,86	33,8	1,32	32,8	19,5	-155	0,89	31,8	1,54	33,2	1,89	34	1,06	32,2	0	0
	1,86	-86,2	1,32	-87,2	19,5	84,8	0,89	-88,2	1,54	-86,8	1,89	-86	1,06	-87,8	0	0
6	1,82	-26,4	1,92	-25,8	1,2	-27,7	1,3	-26,8	1,87	-26,1	1,44	-27,2	1,55	-26,4	0	0
	1,82	-146	1,92	-146	1,2	-148	1,3	-147	1,87	-146	1,44	-147	1,55	-146	0	0
	1,82	93,6	1,92	94,2	1,2	92,3	1,3	93,2	1,87	93,9	1,44	92,8	1,55	93,6	0	0
7	1,86	-26,2	1,32	-27,2	1,92	-25,8	0,89	-28,2	1,54	-26,8	1,89	-26	1,06	-27,8	0	0
	1,86	-146	1,32	-147	1,92	-146	0,89	-148	1,54	-147	1,89	-146	1,06	-148	0	0
	1,86	93,8	1,32	92,8	1,92	94,2	0,89	91,8	1,54	93,2	1,89	94	1,06	92,2	0	0
8	1,75	153	1,84	154	1,15	152	14,7	-35,5	1,79	153	1,39	152	17,5	-35,1	0	0
	1,75	33,1	1,84	33,7	1,15	31,8	14,7	-156	1,79	33,4	1,39	32,3	17,5	-155	0	0
	1,75	-86,9	1,84	-86,3	1,15	-88,2	14,7	84,5	1,79	-86,6	1,39	-87,7	17,5	84,9	0	0
9	1,75	153	1,84	154	1,15	152	14,7	-35,5	1,79	153	1,39	152	1,88	154	0	0
	1,75	33,1	1,84	33,7	1,15	31,8	14,7	-156	1,79	33,4	1,39	32,3	1,88	33,9	0	0
	1,75	-86,9	1,84	-86,3	1,15	-88,2	14,7	84,5	1,79	-86,6	1,39	-87,7	1,88	-86,1	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	1,75	-26,9	1,84	-26,3	1,15	-28,2	1,92	-25,8	1,79	-26,6	1,39	-27,7	1,88	-26,1	0	0
	1,75	-147	1,84	-146	1,15	-148	1,92	-146	1,79	-147	1,39	-148	1,88	-146	0	0
	1,75	93,1	1,84	93,7	1,15	91,8	1,92	94,2	1,79	93,4	1,39	92,3	1,88	93,9	0	0

Apêndice C*

SIMULAÇÕES DE CURTO-CIRCUITO (SIMULAÇÃO C)

- **Status On-Grid - Linha D Desligada - Sistemas Fot. e Geradores Diesel Ligados**

Simulação de Curto-Circuito nas Barras da Microrrede – Correntes Totais de Falta (kA) Componentes de Fase - Status On-Grid - Linha D Desligada - Sistemas Fotov. e Geradores Diesel Ligados								
Barras	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
AT **Fases ABC**	36,74 - j23,67	29,82 - j19,01	25,38 - j16,53	21,03 - j13,57	32,21 - j20,81	29,39 - j19,23	24,04 - j15,61	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
BC **Fases ABC**	0	0	0	0	0	0	0	0
	-17,35 - j26,77	-13,42 - j20,69	-11,99 - j18,03	-9,57 - j14,50	-15,04 - j23,08	-14,11 - j21,34	-11,10 - j16,86	0
	17,35 + j26,77	13,42 + j20,69	11,99 + j18,03	9,57 + j14,50	15,04 + j23,08	14,11 + j21,34	11,10 + j16,86	0
BCT **Fases ABC**	0	0	0	0	0	0	0	0
	-35,17 - j12,42	-28,20 - j8,43	-24,79 - j7,78	-20,10 - j5,70	-30,69 - j10,19	-28,55 - j9,68	-22,90 - j6,93	0
	-2,64 + j37,25	-3,49 + j28,88	-2,30 + j25,45	-2,48 + j20,38	-2,70 + j32,19	-2,02 + j29,94	-2,39 + j23,63	0
ABC **Fases ABC**	26,25 - j17,39	19,53 - j13,11	17,62 - j12,06	13,67 - j9,35	22,28 - j14,90	21,01 - j14,22	16,01 - j10,89	0
	-28,18 - j14,03	-21,12 - j10,35	-19,26 - j9,23	-14,94 - j7,16	-24,05 - j11,84	-22,82 - j11,08	-17,44 - j8,42	0
	1,93 + j31,43	1,58 + j23,47	1,63 + j21,29	1,26 + j16,52	1,76 + j26,75	1,81 + j25,30	1,42 + j19,31	0
ABCT **Fases ABC**	26,25 - j17,39	19,53 - j13,11	17,62 - j12,06	13,67 - j9,35	22,28 - j14,90	21,01 - j14,22	16,01 - j10,89	0
	-28,18 - j14,03	-21,12 - j10,35	-19,26 - j9,23	-14,94 - j7,16	-24,05 - j11,84	-22,82 - j11,08	-17,44 - j8,42	0
	1,93 + j31,43	1,58 + j23,47	1,63 + j21,29	1,26 + j16,52	1,76 + j26,75	1,81 + j25,30	1,42 + j19,31	0

Simulação de Curto-Circuito nas Barras da Microrrede – Tensões Totais de Falta (kV) Componentes de Fase - Status On-Grid - Linha D Desligada - Sistemas Fotov. e Geradores Diesel Ligados								
Barras	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
AT **Fases ABC**	0	0	0	0	0	0	0	0
	-4,44 - j10,30	-3,76 - j9,73	-4,14 - j10,14	-3,70 - j9,68	-4,20 - j10,09	-4,41 - j10,31	-3,91 - j9,84	0
	-4,20 + j10,38	-3,36 + j10,01	-3,81 + j10,46	-3,25 + j10,03	-3,91 + j10,22	-4,16 + j10,47	-3,54 + j10,07	0
BC **Fases ABC**	11,45 - j0,16	10,89 - j0,25	11,44 - j0,21	10,89 - j0,28	11,22 - j0,19	11,52 - j0,17	10,99 - j0,24	0
	-5,72 + j0,08	-5,44 + j0,12	-5,72 + j0,10	-5,44 + j0,14	-5,61 + j0,09	-5,76 + j0,08	-5,49 + j0,12	0
	-5,72 + j0,08	-5,44 + j0,12	-5,72 + j0,10	-5,44 + j0,14	-5,61 + j0,09	-5,76 + j0,08	-5,49 + j0,12	0
BCT **Fases ABC**	8,95 - j0,16	7,60 - j0,33	8,50 - j0,35	7,48 - j0,40	8,46 - j0,21	8,95 - j0,21	7,88 - j0,29	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
ABC **Fases ABC**	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
ABCT **Fases ABC**	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0

Simulação de Curto-Circuito Tipo AT nas Barras da Microrrede **Correntes Totais (kA / °) - Status On-Grid - Linha D Desligada - Sistemas Fotov. e Geradores Diesel Ligados**																
Elem./Barra Fases ABC	**1**		**2**		**3**		**4**		**5**		**6**		**7**		**8**	
	Mód.	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**
1	26,1	-35	17,8	-36,1	16	-36,5	11	-37,5	21,1	-35,7	19,8	-35,9	13,5	-37,1	0	0
	5,6	179	5,52	180	4,65	179	4,26	-180	5,45	179	4,94	179	4,68	180	0	0
	5,89	115	5,82	115	4,88	116	4,54	113	5,74	115	5,19	115	4,96	114	0	0
2	11,2	151	21,9	-34,9	6,36	150	13,4	-36,3	26,3	-34,3	8,2	150	16,5	-35,9	0	0
	3,02	175	4,62	-179	1,05	174	4,04	-179	3,95	-178	1,82	174	4,19	-179	0	0
	3,05	110	4,9	118	1,27	81,7	4,33	118	4,23	115	1,9	98,8	4,47	118	0	0
3	11,2	151	21,9	-34,9	6,36	150	13,4	-36,3	12,5	152	8,2	150	16,5	-35,9	0	0
	3,02	175	4,62	-179	1,05	174	4,04	-179	3,69	174	1,82	174	4,19	-179	0	0
	3,05	110	4,9	118	1,27	81,7	4,33	118	3,69	115	1,9	98,8	4,47	118	0	0
4	6,9	152	4,14	150	22,3	-34,8	2,34	149	5,27	151	27,9	-34,2	3,02	150	0	0
	2,34	173	0,9	175	3,6	180	0,22	173	1,51	173	3,13	-179	0,49	174	0	0
	2,32	121	0,97	98	3,89	126	0,42	55,1	1,51	113	3,41	124	0,59	81,3	0	0
5	6,9	152	4,14	150	22,3	-34,8	2,34	149	5,27	151	7,71	153	3,02	150	0	0
	2,34	173	0,9	175	3,6	180	0,22	173	1,51	173	2,89	172	0,49	174	0	0
	2,32	121	0,97	98	3,89	126	0,42	55,1	1,51	113	2,87	125	0,59	81,3	0	0
6	6,21	-29	7,83	-27,2	3,41	-31,4	4,15	-30,1	6,97	-28,2	4,47	-30,3	5,55	-28,8	0	0
	2,11	-2,23	2,96	-3,14	0,85	3,9	1,12	2,6	2,53	-3,06	1,34	-0,28	1,84	-1,52	0	0
	2,17	-61,4	3,01	-55,1	0,98	-79,1	1,26	-74	2,58	-57,7	1,42	-68,7	1,91	-62,4	0	0
7	6,74	-28,8	3,98	-30,8	8,35	-27,2	2,18	-33,1	5,12	-29,8	7,55	-28	2,86	-32,1	0	0
	2,41	-3,41	0,99	4,48	3,44	-5,35	0,34	22,3	1,59	-0,93	2,96	-4,93	0,59	9,88	0	0
	2,5	-59,5	1,14	-78,6	3,54	-52,9	0,52	-107	1,69	-66,5	3,05	-55,3	0,74	-90	0	0
8	4,8	149	5,97	151	2,74	148	17,7	-34,4	5,35	150	3,52	149	22,2	-33,8	0	0
	1,02	-179	1,51	179	0,32	-171	3,05	-176	1,27	179	0,6	-177	2,49	-173	0	0
	1,18	95,1	1,66	105	0,56	63,9	3,35	122	1,41	101	0,77	82,1	2,8	118	0	0
9	4,8	149	5,97	151	2,74	148	17,7	-34,4	5,35	150	3,52	149	6,91	152	0	0
	1,02	-179	1,51	179	0,32	-171	3,05	-176	1,27	179	0,6	-177	2,21	176	0	0
	1,18	95,1	1,66	105	0,56	63,9	3,35	122	1,41	101	0,77	82,1	2,26	118	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	4,7	-31,4	5,87	-29,7	2,64	-33,3	7,74	-27,6	5,24	-30,6	3,42	-32,5	6,81	-28,6	0	0
	1,09	6,12	1,58	2,93	0,41	22,1	2,84	-3,04	1,33	3,82	0,67	11,4	2,26	-1,6	0	0
	1,29	-82,7	1,77	-73,6	0,63	-107	2,93	-57,2	1,52	-77,2	0,87	-93	2,38	-62,3	0	0

Simulação de Curto-Circuito Tipo BC nas Barras da Microrrede **Correntes Totais (kA / °) - Status On-Grid - Linha D Desligada - Sistemas Fotov. e Geradores Diesel Ligados**																
Elem./Barra Fases ABC	**1**		**2**		**3**		**4**		**5**		**6**		**7**		**8**	
	Mód.	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**
	4,45	-30,9	4,26	-30,6	3,55	-31,1	3,38	-31,1	4,3	-30,9	3,88	-31,2	3,71	-31	0	0
1	22,9	-131	16,1	-134	14,6	-133	10,5	-137	18,8	-132	17,8	-132	12,7	-135	0	0
	22,6	60,7	15,7	61,7	14,3	60,7	10,2	62,2	18,5	61	17,5	60,5	12,3	61,8	0	0
	2,46	-36,2	3,43	-28,4	1,27	-44,6	3	-28,3	3,18	-29,1	1,73	-40,1	3,15	-28,5	0	0
2	6,59	73,6	18,3	-130	4,2	70,5	12	-133	21,5	-129	5,13	71,9	14,5	-132	0	0
	6,2	-128	18	60,6	3,84	-127	11,6	61,3	21,3	59,8	4,76	-128	14,1	60,7	0	0
	2,46	-36,2	3,43	-28,4	1,27	-44,6	3	-28,3	2,72	-34,7	1,73	-40,1	3,15	-28,5	0	0
3	6,59	73,6	18,3	-130	4,2	70,5	12	-133	6,97	74,6	5,13	71,9	14,5	-132	0	0
	6,2	-128	18	60,6	3,84	-127	11,6	61,3	6,6	-128	4,76	-128	14,1	60,7	0	0
	1,53	-32,9	0,84	-39,6	2,34	-23,8	0,41	-52,1	1,13	-35,9	2,19	-24,1	0,58	-45,1	0	0
4	3,65	75,8	2,5	72,5	18,5	-128	1,63	69,1	2,97	74,1	22,6	-127	1,97	70,7	0	0
	3,48	-129	2,31	-127	18,1	59,1	1,46	-125	2,79	-128	22,2	58,7	1,8	-126	0	0
	1,53	-32,9	0,84	-39,6	2,34	-23,8	0,41	-52,1	1,13	-35,9	1,71	-31,5	0,58	-45,1	0	0
5	3,65	75,8	2,5	72,5	18,5	-128	1,63	69,1	2,97	74,1	3,84	77	1,97	70,7	0	0
	3,48	-129	2,31	-127	18,1	59,1	1,46	-125	2,79	-128	3,67	-129	1,8	-126	0	0
	1,54	150	1,82	151	0,87	146	1,02	148	1,68	151	1,13	148	1,34	150	0	0
6	3,31	-104	3,74	-102	2,04	-107	2,33	-106	3,51	-103	2,53	-106	2,88	-104	0	0
	3,24	48,5	3,67	49,1	1,98	47,9	2,27	48,7	3,45	48,7	2,46	48	2,82	48,7	0	0
	1,69	150	0,99	147	2,01	152	0,54	143	1,28	149	1,86	151	0,72	145	0	0
7	3,48	-103	2,32	-107	3,85	-101	1,46	-110	2,8	-105	3,67	-102	1,79	-108	0	0
	3,42	48,3	2,25	48,6	3,8	48,2	1,39	48,4	2,73	48,3	3,61	48,2	1,73	48,3	0	0
	1,12	-36,9	1,35	-34,2	0,59	-44,3	2,2	-23,6	1,24	-35,4	0,79	-40,4	2,03	-24	0	0
8	3,05	72,5	3,43	74,3	1,93	69,4	14,4	-129	3,23	73,4	2,37	70,8	17,3	-127	0	0
	2,88	-129	3,26	-129	1,78	-128	14	60,1	3,07	-129	2,21	-129	17	59,5	0	0
	1,12	-36,9	1,35	-34,2	0,59	-44,3	2,2	-23,6	1,24	-35,4	0,79	-40,4	1,55	-32,2	0	0
9	3,05	72,5	3,43	74,3	1,93	69,4	14,4	-129	3,23	73,4	2,37	70,8	3,64	75,8	0	0
	2,88	-129	3,26	-129	1,78	-128	14	60,1	3,07	-129	2,21	-129	3,49	-129	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,22	147	1,45	148	0,68	143	1,82	151	1,34	148	0,89	145	1,65	150	0	0
12	2,93	-107	3,31	-105	1,81	-110	3,74	-103	3,12	-106	2,25	-109	3,53	-104	0	0
	2,84	48,6	3,22	49,2	1,74	48,2	3,67	49	3,03	48,8	2,17	48,2	3,45	48,9	0	0

Simulação de Curto-Circuito Tipo BCT nas Barras da Microrrede **Correntes Totais (kA / °) - Status On-Grid - Linha D Desligada - Sistemas Fotov. e Geradores Diesel Ligados**																
Elem./Barra Fases ABC	**1**		**2**		**3**		**4**		**5**		**6**		**7**		**8**	
	Mód.	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**
1	9,18	-33	8,96	-32,7	7,63	-32,7	7,01	-33,4	8,89	-33,1	8,12	-33,1	7,65	-33,3	0	0
	26,1	-155	18,2	-155	16,6	-155	11,9	-155	21,4	-155	20,3	-155	14,3	-155	0	0
	26,1	85	18,2	83,1	16,6	82,4	11,9	80,4	21,4	83,8	20,3	83,3	14,3	81,2	0	0
2	5,07	-36,5	7,38	-30,9	2,13	-46,9	6,49	-31,1	6,43	-32	3,27	-40,7	6,71	-31,3	0	0
	7,37	10,7	20,8	-157	4,22	15,5	13,4	-155	24,7	-157	5,41	13,3	16,2	-156	0	0
	7,95	-68,4	20,8	87	4,63	-74,4	13,5	83,3	24,7	88,2	5,9	-71,9	16,3	84,4	0	0
3	5,07	-36,5	7,38	-30,9	2,13	-46,9	6,49	-31,1	5,97	-34,7	3,27	-40,7	6,71	-31,3	0	0
	7,37	10,7	20,8	-157	4,22	15,5	13,4	-155	8,24	7,93	5,41	13,3	16,2	-156	0	0
	7,95	-68,4	20,8	87	4,63	-74,4	13,5	83,3	8,81	-64,8	5,9	-71,9	16,3	84,4	0	0
4	3,66	-32,9	1,6	-41	5,59	-27,3	0,58	-59,4	2,47	-36	4,89	-28	0,98	-47,6	0	0
	4,57	5,97	2,69	10,1	20,8	-157	1,53	18,3	3,45	8,04	25,6	-157	1,95	14,8	0	0
	4,86	-62,4	2,93	-68,7	21	87,4	1,71	-76,8	3,72	-65,7	25,8	88,8	2,18	-73,7	0	0
5	3,66	-32,9	1,6	-41	5,59	-27,3	0,58	-59,4	2,47	-36	4,42	-31,3	0,98	-47,6	0	0
	4,57	5,97	2,69	10,1	20,8	-157	1,53	18,3	3,45	8,04	5,2	3,38	1,95	14,8	0	0
	4,86	-62,4	2,93	-68,7	21	87,4	1,71	-76,8	3,72	-65,7	5,46	-58,7	2,18	-73,7	0	0
6	3,36	148	4,52	151	1,53	143	1,93	144	3,92	149	2,24	146	2,93	148	0	0
	4,12	-174	5,38	-179	2,25	-171	2,72	-175	4,67	-177	2,96	-173	3,69	-177	0	0
	4,31	116	5,47	124	2,39	109	2,87	114	4,83	120	3,12	112	3,84	118	0	0
7	3,81	149	1,74	143	5,27	151	0,69	134	2,62	146	4,58	150	1,1	139	0	0
	4,46	-176	2,57	-173	5,82	179	1,4	-167	3,34	-174	5,11	-178	1,83	-169	0	0
	4,68	118	2,76	111	5,91	125	1,54	101	3,54	114	5,28	121	2	105	0	0
8	1,92	-40,2	2,62	-36,8	0,79	-52,5	4,78	-27,8	2,27	-38,3	1,23	-45	3,98	-28,9	0	0
	3,11	14,2	3,88	7,69	1,82	18,6	16,2	-158	3,45	11,2	2,31	16,7	19,9	-159	0	0
	3,44	-74,3	4,18	-66,3	2,02	-79,8	16,2	88,9	3,78	-70,8	2,56	-77,6	19,9	91	0	0
9	1,92	-40,2	2,62	-36,8	0,79	-52,5	4,78	-27,8	2,27	-38,3	1,23	-45	3,52	-33,1	0	0
	3,11	14,2	3,88	7,69	1,82	18,6	16,2	-158	3,45	11,2	2,31	16,7	4,58	4,49	0	0
	3,44	-74,3	4,18	-66,3	2,02	-79,8	16,2	88,9	3,78	-70,8	2,56	-77,6	4,84	-61,4	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	2,01	142	2,72	145	0,87	134	4,42	150	2,36	144	1,32	139	3,62	148	0	0
	3,03	-167	3,81	-174	1,73	-164	5,3	-180	3,37	-170	2,23	-165	4,51	-177	0	0
	3,32	105	4,06	113	1,91	98,9	5,41	124	3,66	109	2,45	102	4,72	119	0	0

Simulação de Curto-Circuito Tipo ABC nas Barras da Microrrede **Correntes Totais (kA / °) - Status On-Grid - Linha D Desligada - Sistemas Fotov. e Geradores Diesel Ligados**																
Elem./Barra Fases ABC	**1**		**2**		**3**		**4**		**5**		**6**		**7**		**8**	
	Mód.	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**
1	26,1	-35	18,5	-35,9	17,1	-36,2	12,5	-36,9	21,7	-35,5	20,7	-35,7	14,9	-36,5	0	0
	26,1	-155	18,5	-156	17,1	-156	12,5	-157	21,7	-156	20,7	-156	14,9	-157	0	0
	26,1	85	18,5	84,1	17,1	83,8	12,5	83,1	21,7	84,5	20,7	84,3	14,9	83,5	0	0
2	3,89	156	20	-35	2,67	156	13,5	-35,9	23,3	-34,7	3,15	156	16,1	-35,6	0	0
	3,89	35,7	20	-155	2,67	35,7	13,5	-156	23,3	-155	3,15	35,6	16,1	-156	0	0
	3,89	-84,3	20	85	2,67	-84,3	13,5	84,1	23,3	85,3	3,15	-84,4	16,1	84,4	0	0
3	3,89	156	20	-35	2,67	156	13,5	-35,9	3,99	156	3,15	156	16,1	-35,6	0	0
	3,89	35,7	20	-155	2,67	35,7	13,5	-156	3,99	35,9	3,15	35,6	16,1	-156	0	0
	3,89	-84,3	20	85	2,67	-84,3	13,5	84,1	3,99	-84,1	3,15	-84,4	16,1	84,4	0	0
4	2,02	156	1,48	156	19,8	-34,6	1,05	156	1,7	156	23,8	-34,2	1,22	156	0	0
	2,02	36	1,48	36	19,8	-155	1,05	36,5	1,7	36	23,8	-154	1,22	36,2	0	0
	2,02	-84	1,48	-84	19,8	85,4	1,05	-83,5	1,7	-84	23,8	85,8	1,22	-83,8	0	0
5	2,02	156	1,48	156	19,8	-34,6	1,05	156	1,7	156	2,05	156	1,22	156	0	0
	2,02	36	1,48	36	19,8	-155	1,05	36,5	1,7	36	2,05	36,2	1,22	36,2	0	0
	2,02	-84	1,48	-84	19,8	85,4	1,05	-83,5	1,7	-84	2,05	-83,8	1,22	-83,8	0	0
6	1,82	-26,4	1,92	-25,8	1,2	-27,7	1,3	-26,8	1,87	-26,1	1,44	-27,2	1,55	-26,4	0	0
	1,82	-146	1,92	-146	1,2	-148	1,3	-147	1,87	-146	1,44	-147	1,55	-146	0	0
	1,82	93,6	1,92	94,2	1,2	92,3	1,3	93,2	1,87	93,9	1,44	92,8	1,55	93,6	0	0
7	1,86	-26,2	1,32	-27,2	1,92	-25,8	0,89	-28,2	1,54	-26,8	1,89	-26	1,06	-27,8	0	0
	1,86	-146	1,32	-147	1,92	-146	0,89	-148	1,54	-147	1,89	-146	1,06	-148	0	0
	1,86	93,8	1,32	92,8	1,92	94,2	0,89	91,8	1,54	93,2	1,89	94	1,06	92,2	0	0
8	1,86	155	1,95	155	1,25	154	15	-34,6	1,9	155	1,49	154	17,9	-34,3	0	0
	1,86	34,8	1,95	35,2	1,25	34,4	15	-155	1,9	35	1,49	34,5	17,9	-154	0	0
	1,86	-85,2	1,95	-84,8	1,25	-85,6	15	85,4	1,9	-85	1,49	-85,5	17,9	85,7	0	0
9	1,86	155	1,95	155	1,25	154	15	-34,6	1,9	155	1,49	154	1,99	155	0	0
	1,86	34,8	1,95	35,2	1,25	34,4	15	-155	1,9	35	1,49	34,5	1,99	35,4	0	0
	1,86	-85,2	1,95	-84,8	1,25	-85,6	15	85,4	1,9	-85	1,49	-85,5	1,99	-84,6	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	1,75	-26,9	1,84	-26,3	1,15	-28,2	1,92	-25,8	1,79	-26,6	1,39	-27,7	1,88	-26,1	0	0
	1,75	-147	1,84	-146	1,15	-148	1,92	-146	1,79	-147	1,39	-148	1,88	-146	0	0
	1,75	93,1	1,84	93,7	1,15	91,8	1,92	94,2	1,79	93,4	1,39	92,3	1,88	93,9	0	0

Simulação de Curto-Circuito Tipo ABCT nas Barras da Microrrede **Correntes Totais (kA / °) - Status On-Grid - Linha D Desligada - Sistemas Fotov. e Geradores Diesel Ligados**																
Elem./Barra	**1**		**2**		**3**		**4**		**5**		**6**		**7**		**8**	
Fases ABC	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**
	26,1	-35	18,5	-35,9	17,1	-36,2	12,5	-36,9	21,7	-35,5	20,7	-35,7	14,9	-36,5	0	0
1	26,1	-155	18,5	-156	17,1	-156	12,5	-157	21,7	-156	20,7	-156	14,9	-157	0	0
	26,1	85	18,5	84,1	17,1	83,8	12,5	83,1	21,7	84,5	20,7	84,3	14,9	83,5	0	0
	3,89	156	20	-35	2,67	156	13,5	-35,9	23,3	-34,7	3,15	156	16,1	-35,6	0	0
2	3,89	35,7	20	-155	2,67	35,7	13,5	-156	23,3	-155	3,15	35,6	16,1	-156	0	0
	3,89	-84,3	20	85	2,67	-84,3	13,5	84,1	23,3	85,3	3,15	-84,4	16,1	84,4	0	0
	3,89	156	20	-35	2,67	156	13,5	-35,9	3,99	156	3,15	156	16,1	-35,6	0	0
3	3,89	35,7	20	-155	2,67	35,7	13,5	-156	3,99	35,9	3,15	35,6	16,1	-156	0	0
	3,89	-84,3	20	85	2,67	-84,3	13,5	84,1	3,99	-84,1	3,15	-84,4	16,1	84,4	0	0
	2,02	156	1,48	156	19,8	-34,6	1,05	156	1,7	156	23,8	-34,2	1,22	156	0	0
4	2,02	36	1,48	36	19,8	-155	1,05	36,5	1,7	36	23,8	-154	1,22	36,2	0	0
	2,02	-84	1,48	-84	19,8	85,4	1,05	-83,5	1,7	-84	23,8	85,8	1,22	-83,8	0	0
	2,02	156	1,48	156	19,8	-34,6	1,05	156	1,7	156	2,05	156	1,22	156	0	0
5	2,02	36	1,48	36	19,8	-155	1,05	36,5	1,7	36	2,05	36,2	1,22	36,2	0	0
	2,02	-84	1,48	-84	19,8	85,4	1,05	-83,5	1,7	-84	2,05	-83,8	1,22	-83,8	0	0
	1,82	-26,4	1,92	-25,8	1,2	-27,7	1,3	-26,8	1,87	-26,1	1,44	-27,2	1,55	-26,4	0	0
6	1,82	-146	1,92	-146	1,2	-148	1,3	-147	1,87	-146	1,44	-147	1,55	-146	0	0
	1,82	93,6	1,92	94,2	1,2	92,3	1,3	93,2	1,87	93,9	1,44	92,8	1,55	93,6	0	0
	1,86	-26,2	1,32	-27,2	1,92	-25,8	0,89	-28,2	1,54	-26,8	1,89	-26	1,06	-27,8	0	0
7	1,86	-146	1,32	-147	1,92	-146	0,89	-148	1,54	-147	1,89	-146	1,06	-148	0	0
	1,86	93,8	1,32	92,8	1,92	94,2	0,89	91,8	1,54	93,2	1,89	94	1,06	92,2	0	0
	1,86	155	1,95	155	1,25	154	15	-34,6	1,9	155	1,49	154	17,9	-34,3	0	0
8	1,86	34,8	1,95	35,2	1,25	34,4	15	-155	1,9	35	1,49	34,5	17,9	-154	0	0
	1,86	-85,2	1,95	-84,8	1,25	-85,6	15	85,4	1,9	-85	1,49	-85,5	17,9	85,7	0	0
	1,86	155	1,95	155	1,25	154	15	-34,6	1,9	155	1,49	154	1,99	155	0	0
9	1,86	34,8	1,95	35,2	1,25	34,4	15	-155	1,9	35	1,49	34,5	1,99	35,4	0	0
	1,86	-85,2	1,95	-84,8	1,25	-85,6	15	85,4	1,9	-85	1,49	-85,5	1,99	-84,6	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,75	-26,9	1,84	-26,3	1,15	-28,2	1,92	-25,8	1,79	-26,6	1,39	-27,7	1,88	-26,1	0	0
12	1,75	-147	1,84	-146	1,15	-148	1,92	-146	1,79	-147	1,39	-148	1,88	-146	0	0
	1,75	93,1	1,84	93,7	1,15	91,8	1,92	94,2	1,79	93,4	1,39	92,3	1,88	93,9	0	0

Apêndice D*

SIMULAÇÕES DE CURTO-CIRCUITO (SIMULAÇÃO D)

- **Status Off-Grid - Linha D Desligada - Sistemas Fot. Desligadas - G. Diesel Ligados**

Simulação de Curto-Circuito nas Barras da Microrrede – Correntes Totais de Falta (kA) Componentes de Fase - Status Off-Grid - Linha D Desligada - Sistemas Fotov. Desligadas - G. Diesel Ligados								
Barras	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
AT **Fases ABC**	10,20 - j5,24	10,86 - j5,43	9,85 - j5,08	10,15 - j5,18	10,48 - j5,32	9,97 - j5,15	10,40 - j5,29	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
BC **Fases ABC**	0	0	0	0	0	0	0	0
	-3,27 - j6,47	-3,36 - j6,77	-3,19 - j6,23	-3,24 - j6,39	-3,31 - j6,61	-3,23- j6,33	-3,30 - j6,55	0
	3,27 + j6,47	3,36 + j6,77	3,19 + j6,23	3,24 + j6,39	3,31 + j6,61	3,23+ j6,33	3,30 + j6,55	0
BCT **Fases ABC**	0	0	0	0	0	0	0	0
	-7,16 - j2,58	-7,62 - j2,53	-7,07 - j2,44	-7,23 - j2,47	-7,33 - j2,57	-7,06 - j2,53	-7,31 - j2,55	0
	-2,18 + j7,45	-2,60 + j7,67	-2,19 + j7,19	-2,31 + j7,34	-2,33 + j7,57	-2,13 + j7,32	-2,33 + j7,51	0
ABC **Fases ABC**	4,85 - j2,42	4,99 - j2,46	4,71 - j2,37	4,80 - j2,40	4,92 - j2,44	4,78 - j2,40	4,89 - j2,43	0
	-4,52 - j2,99	4,63 - j3,09	-4,41 - j2,89	-4,48 - j2,95	-4,57 - j3,04	-4,46 - j2,94	-4,55 - j3,02	0
	-0,32 + j5,41	-0,36 + j5,56	-0,29 + j5,27	-0,31 + j5,36	-0,34 + j5,48	-0,31 + j5,34	-0,33 + j5,45	0
ABCT **Fases ABC**	4,85 - j2,42	4,99 - j2,46	4,71 - j2,37	4,80 - j2,40	4,92 - j2,44	4,78 - j2,40	4,89 - j2,43	0
	-4,52 - j2,99	-4,63 - j3,09	-4,41 - j2,89	-4,48 - j2,95	-4,57 - j3,04	-4,46 - j2,94	-4,55 - j3,02	0
	-0,32 + j5,41	-0,36 + j5,56	-0,29 + j5,27	-0,31 + j5,36	-0,34 + j5,48	-0,31 + j5,34	-0,33 + j5,45	0

Simulação de Curto-Circuito nas Barras da Microrrede – Tensões Totais de Falta (kV) Componentes de Fase - Status Off-Grid - Linha D Desligada - Sistemas Fotov. Desligadas - G. Diesel Ligados								
Barras	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
AT **Fases ABC**	0	0	0	0	0	0	0	0
	-1,67 - j6,13	-1,42 - j5,72	-1,65 - j6,19	-1,58 - j6,05	-1,58 - j5,97	-1,70 - j6,21	-1,58 - j5,98	0
	-1,94 + j5,91	-1,57 + j5,62	-1,88 + j6,09	-1,79 + j5,95	-1,81 + j5,78	-1,97 + j6,02	-1,80 + j5,82	0
BC **Fases ABC**	6,29 + j0,13	5,98 + j0,07	6,47 + j0,12	6,32 + j0,11	6,16 + j0,10	6,41 + j0,13	6,19 + j0,10	0
	-3,14 - j0,06	-2,99 - j0,03	-3,23 - j0,06	-3,16 - j0,05	-3,08 - j0,05	-3,20 - j0,06	-3,09 - j0,05	0
	-3,14 - j0,06	-2,99 - j0,03	-3,23 - j0,06	-3,16 - j0,05	-3,08 - j0,05	-3,20 - j0,06	-3,09 - j0,05	0
BCT **Fases ABC**	3,32 + j0,17	2,82 + j0,08	3,32 + j0,10	3,17 + j0,09	3,14 + j0,15	3,40 + j0,16	3,14 + j0,13	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
ABC **Fases ABC**	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
ABCT **Fases ABC**	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0

Simulação de Curto-Circuito Tipo AT nas Barras da Microrrede **Correntes Totais (kA / °) - Status Off-Grid - Linha D Desligada - Sistemas Fotov. Desligadas - G. Diesel Ligados**																
Elem./Barra Fases ABC	**1**		**2**		**3**		**4**		**5**		**6**		**7**		**8**	
	Mód.	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	7,22	152	3,56	-27,8	5,95	151	2,78	-29,9	3,9	-27,1	6,55	152	3,13	-29	0	0
	0,21	-1,64	0,26	178	0,73	-1,94	0,5	178	0,02	176	0,47	-1,94	0,38	178	0	0
	0,21	-42,1	0,27	144	0,75	-40	0,52	139	0,02	169	0,49	-40,5	0,4	140	0	0
3	7,22	152	3,56	-27,8	5,95	151	2,78	-29,9	7,86	153	6,55	152	3,13	-29	0	0
	0,21	-1,64	0,26	178	0,73	-1,94	0,5	178	0,02	176	0,47	-1,94	0,38	178	0	0
	0,21	-42,1	0,27	144	0,75	-40	0,52	139	0,02	169	0,49	-40,5	0,4	140	0	0
4	4,25	154	3,56	152	5,95	-29,3	2,78	150	3,9	153	6,55	-28,5	3,13	151	0	0
	0,21	178	0,26	-1,56	0,73	178	0,5	-1,56	0,02	-4,47	0,47	178	0,38	-1,64	0	0
	0,21	138	0,27	-36	0,75	140	0,52	-41,4	0,02	-10,8	0,49	139	0,4	-39,7	0	0
5	4,25	154	3,56	152	5,95	-29,3	2,78	150	3,9	153	4,68	154	3,13	151	0	0
	0,21	178	0,26	-1,56	0,73	178	0,5	-1,56	0,02	-4,47	0,47	178	0,38	-1,64	0	0
	0,21	138	0,27	-36	0,75	140	0,52	-41,4	0,02	-10,8	0,49	139	0,4	-39,7	0	0
6	3,98	-26,8	4,76	-25	3,25	-28,5	3,6	-27,8	4,34	-25,9	3,59	-27,7	4,13	-26,4	0	0
	0,1	-2,86	0,41	-1,86	0,24	178	0,13	177	0,25	-2,33	0,08	178	0,13	-1,97	0	0
	0,1	-29,8	0,41	-32,9	0,25	143	0,13	152	0,25	-32,6	0,08	139	0,13	-36,4	0	0
7	4,25	-26,4	3,56	-27,8	5,14	-25	2,78	-29,9	3,9	-27,1	4,68	-25,7	3,13	-29	0	0
	0,21	-1,64	0,26	178	0,73	-1,94	0,5	178	0,02	176	0,47	-1,94	0,38	178	0	0
	0,21	-42,1	0,27	144	0,75	-40	0,52	139	0,02	169	0,49	-40,5	0,4	140	0	0
8	3,25	151	3,83	153	2,71	150	6,38	-28,7	3,52	152	2,96	151	7,26	-27,5	0	0
	0,3	-2,03	0,14	-2,43	0,48	-1,77	0,63	178	0,22	-2,1	0,39	-1,95	0,26	179	0	0
	0,31	-38,3	0,14	-27	0,51	-41,6	0,65	141	0,23	-34,8	0,41	-40,5	0,27	139	0	0
9	3,25	151	3,83	153	2,71	150	6,38	-28,7	3,52	152	2,96	151	4,41	154	0	0
	0,3	-2,03	0,14	-2,43	0,48	-1,77	0,63	178	0,22	-2,1	0,39	-1,95	0,26	179	0	0
	0,31	-38,3	0,14	-27	0,51	-41,6	0,65	141	0,23	-34,8	0,41	-40,5	0,27	139	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	3,25	-28,7	3,83	-27,2	2,71	-30,1	5,03	-25	3,52	-28	2,96	-29,5	4,41	-26,1	0	0
	0,3	178	0,14	178	0,48	178	0,63	-1,85	0,22	178	0,39	178	0,26	-1,47	0	0
	0,31	142	0,14	153	0,51	138	0,65	-38,6	0,23	145	0,41	140	0,27	-41,3	0	0

Simulação de Curto-Circuito Tipo BC nas Barras da Microrrede **Correntes Totais (kA / °) - Status Off-Grid - Linha D Desligada - Sistemas Fotov. Desligadas - G. Diesel Ligados**																
Elem./Barra Fases ABC	**1**		**2**		**3**		**4**		**5**		**6**		**7**		**8**	
	Mód.	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0,09	162	0,1	-16,5	0,3	162	0,22	-18	0	14,5	0,2	162	0,16	-17,5	0	0
	4,7	62,3	2,38	-118	4,23	59,7	2,07	-122	2,47	-117	4,45	61	2,22	-120	0	0
	4,69	-117	2,36	64,1	4,17	-116	2,03	64,5	2,47	63,3	4,42	-116	2,19	64,2	0	0
3	0,09	162	0,1	-16,5	0,3	162	0,22	-18	0	14,5	0,2	162	0,16	-17,5	0	0
	4,7	62,3	2,38	-118	4,23	59,7	2,07	-122	4,93	63,4	4,45	61	2,22	-120	0	0
	4,69	-117	2,36	64,1	4,17	-116	2,03	64,5	4,93	-117	4,42	-116	2,19	64,2	0	0
4	0,09	-18	0,1	164	0,3	-17,9	0,22	162	0	-165	0,2	-17,9	0,16	163	0	0
	2,56	64,7	2,38	61,8	4,23	-120	2,07	58,5	2,47	63,3	4,45	-119	2,22	60,1	0	0
	2,57	-117	2,36	-116	4,17	63,8	2,03	-116	2,47	-117	4,42	63,5	2,19	-116	0	0
5	0,09	-18	0,1	164	0,3	-17,9	0,22	162	0	-165	0,2	-17,9	0,16	163	0	0
	2,56	64,7	2,38	61,8	4,23	-120	2,07	58,5	2,47	63,3	2,67	66,3	2,22	60,1	0	0
	2,57	-117	2,36	-116	4,17	63,8	2,03	-116	2,47	-117	2,7	-118	2,19	-116	0	0
6	0,03	165	0,14	164	0,09	-17,2	0,04	-14	0,08	164	0,03	-18	0,05	163	0	0
	2,46	-116	2,71	-114	2,2	-119	2,35	-118	2,58	-115	2,32	-118	2,52	-116	0	0
	2,46	63	2,73	63	2,19	63,4	2,34	63,3	2,59	63	2,32	63,1	2,52	63	0	0
7	0,09	162	0,1	-16,5	0,3	162	0,22	-18	0	14,5	0,2	162	0,16	-17,5	0	0
	2,56	-115	2,38	-118	2,79	-112	2,07	-122	2,47	-117	2,67	-114	2,22	-120	0	0
	2,57	62,7	2,36	64,1	2,83	61,5	2,03	64,5	2,47	63,3	2,7	62	2,19	64,2	0	0
8	0,12	163	0,04	166	0,21	162	0,25	-17,4	0,08	164	0,17	162	0,11	-17,8	0	0
	2,25	60,8	2,47	62,9	2,02	58,2	4,42	-119	2,35	61,8	2,13	59,5	4,73	-118	0	0
	2,22	-116	2,46	-116	1,98	-116	4,37	63,8	2,34	-116	2,1	-116	4,71	63,6	0	0
9	0,12	163	0,04	166	0,21	162	0,25	-17,4	0,08	164	0,17	162	0,11	-17,8	0	0
	2,25	60,8	2,47	62,9	2,02	58,2	4,42	-119	2,35	61,8	2,13	59,5	2,61	65,2	0	0
	2,22	-116	2,46	-116	1,98	-116	4,37	63,8	2,34	-116	2,1	-116	2,63	-117	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0,12	-17,3	0,04	-13,5	0,21	-18,2	0,25	163	0,08	-16,3	0,17	-17,9	0,11	162	0	0
	2,25	-119	2,47	-117	2,02	-122	2,77	-113	2,35	-118	2,13	-120	2,61	-115	0	0
	2,22	63,8	2,46	63,8	1,98	64,2	2,8	62	2,34	63,7	2,1	64	2,63	62,7	0	0

Simulação de Curto-Circuito Tipo BCT nas Barras da Microrrede **Correntes Totais (kA / °) - Status Off-Grid - Linha D Desligada - Sistemas Fotov. Desligadas - G. Diesel Ligados**																
Elem./Barra Fases ABC	**1**		**2**		**3**		**4**		**5**		**6**		**7**		**8**	
	Mód.	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0,25	159	0,32	-18,4	0,89	160	0,62	-20,8	0,02	-6,73	0,57	159	0,46	-20,2	0	0
	4,84	21	2,38	-159	4,16	24	1,98	-154	2,57	-160	4,48	22,7	2,15	-156	0	0
	4,96	-75,5	2,46	104	4,3	-80,7	2,07	96,6	2,63	107	4,61	-78,3	2,25	99,6	0	0
3	0,25	159	0,32	-18,4	0,89	160	0,62	-20,8	0,02	-6,73	0,57	159	0,46	-20,2	0	0
	4,84	21	2,38	-159	4,16	24	1,98	-154	5,2	19,3	4,48	22,7	2,15	-156	0	0
	4,96	-75,5	2,46	104	4,3	-80,7	2,07	96,6	5,29	-72,6	4,61	-78,3	2,25	99,6	0	0
4	0,25	-21,3	0,32	162	0,89	-20,3	0,62	159	0,02	173	0,57	-20,6	0,46	160	0	0
	2,78	17,7	2,38	21,4	4,16	-156	1,98	26	2,57	19,6	4,48	-157	2,15	24,2	0	0
	2,82	-70,5	2,46	-76,2	4,3	99,3	2,07	-83,4	2,63	-73,3	4,61	102	2,25	-80,4	0	0
5	0,25	-21,3	0,32	162	0,89	-20,3	0,62	159	0,02	173	0,57	-20,6	0,46	160	0	0
	2,78	17,7	2,38	21,4	4,16	-156	1,98	26	2,57	19,6	3,04	15,4	2,15	24,2	0	0
	2,82	-70,5	2,46	-76,2	4,3	99,3	2,07	-83,4	2,63	-73,3	3,05	-66,9	2,25	-80,4	0	0
6	0,11	164	0,47	163	0,29	-18,9	0,15	-15	0,28	163	0,09	-20,7	0,15	161	0	0
	2,63	-161	3,12	-165	2,23	-158	2,42	-160	2,85	-163	2,42	-159	2,72	-162	0	0
	2,67	108	3,09	115	2,29	102	2,47	105	2,86	111	2,46	105	2,75	109	0	0
7	0,25	159	0,32	-18,4	0,89	160	0,62	-20,8	0,02	-6,73	0,57	159	0,46	-20,2	0	0
	2,78	-162	2,38	-159	3,36	-167	1,98	-154	2,57	-160	3,04	-165	2,15	-156	0	0
	2,82	110	2,46	104	3,31	117	2,07	96,6	2,63	107	3,05	113	2,25	99,6	0	0
8	0,36	160	0,16	165	0,6	159	0,77	-19,6	0,26	162	0,48	159	0,31	-20,8	0	0
	2,21	23,6	2,53	19,8	1,94	26,2	4,39	-157	2,36	21,9	2,06	25	4,87	-159	0	0
	2,31	-79,5	2,6	-73,8	2,02	-83,9	4,53	101	2,44	-77	2,16	-81,9	4,98	105	0	0
9	0,36	160	0,16	165	0,6	159	0,77	-19,6	0,26	162	0,48	159	0,31	-20,8	0	0
	2,21	23,6	2,53	19,8	1,94	26,2	4,39	-157	2,36	21,9	2,06	25	2,88	16,7	0	0
	2,31	-79,5	2,6	-73,8	2,02	-83,9	4,53	101	2,44	-77	2,16	-81,9	2,9	-68,9	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0,36	-19,8	0,16	-14,6	0,6	-20,9	0,77	160	0,26	-18,3	0,48	-20,6	0,31	159	0	0
	2,21	-156	2,53	-160	1,94	-154	3,29	-166	2,36	-158	2,06	-155	2,88	-163	0	0
	2,31	101	2,6	106	2,02	96,1	3,24	116	2,44	103	2,16	98,1	2,9	111	0	0

Simulação de Curto-Circuito Tipo ABC nas Barras da Microrrede **Correntes Totais (kA / °) - Status Off-Grid - Linha D Desligada - Sistemas Fotov. Desligadas - G. Diesel Ligados**																
Elem./Barra Fases ABC	**1**		**2**		**3**		**4**		**5**		**6**		**7**		**8**	
	Mód.	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	3,57	153	1,81	-26,5	3,36	153	1,67	-27,4	1,83	-26,4	3,46	153	1,74	-27	0	0
	3,57	33,3	1,81	-147	3,36	32,7	1,67	-147	1,83	-146	3,46	33	1,74	-147	0	0
	3,57	-86,7	1,81	93,5	3,36	-87,3	1,67	92,6	1,83	93,6	3,46	-87	1,74	93	0	0
3	3,57	153	1,81	-26,5	3,36	153	1,67	-27,4	3,66	154	3,46	153	1,74	-27	0	0
	3,57	33,3	1,81	-147	3,36	32,7	1,67	-147	3,66	33,6	3,46	33	1,74	-147	0	0
	3,57	-86,7	1,81	93,5	3,36	-87,3	1,67	92,6	3,66	-86,4	3,46	-87	1,74	93	0	0
4	1,86	154	1,81	153	3,36	-27,3	1,67	153	1,83	154	3,46	-27	1,74	153	0	0
	1,86	33,8	1,81	33,5	3,36	-147	1,67	32,6	1,83	33,6	3,46	-147	1,74	33	0	0
	1,86	-86,2	1,81	-86,5	3,36	92,7	1,67	-87,4	1,83	-86,4	3,46	93	1,74	-87	0	0
5	1,86	154	1,81	153	3,36	-27,3	1,67	153	1,83	154	1,89	154	1,74	153	0	0
	1,86	33,8	1,81	33,5	3,36	-147	1,67	32,6	1,83	33,6	1,89	34	1,74	33	0	0
	1,86	-86,2	1,81	-86,5	3,36	92,7	1,67	-87,4	1,83	-86,4	1,89	-86	1,74	-87	0	0
6	1,82	-26,4	1,92	-25,8	1,71	-27,1	1,78	-26,7	1,87	-26,1	1,77	-26,8	1,85	-26,3	0	0
	1,82	-146	1,92	-146	1,71	-147	1,78	-147	1,87	-146	1,77	-147	1,85	-146	0	0
	1,82	93,6	1,92	94,2	1,71	92,9	1,78	93,3	1,87	93,9	1,77	93,2	1,85	93,7	0	0
7	1,86	-26,2	1,81	-26,5	1,92	-25,8	1,67	-27,4	1,83	-26,4	1,89	-26	1,74	-27	0	0
	1,86	-146	1,81	-147	1,92	-146	1,67	-147	1,83	-146	1,89	-146	1,74	-147	0	0
	1,86	93,8	1,81	93,5	1,92	94,2	1,67	92,6	1,83	93,6	1,89	94	1,74	93	0	0
8	1,75	153	1,84	154	1,65	152	3,45	-27	1,79	153	1,7	153	3,58	-26,6	0	0
	1,75	33,1	1,84	33,7	1,65	32,4	3,45	-147	1,79	33,4	1,7	32,7	3,58	-147	0	0
	1,75	-86,9	1,84	-86,3	1,65	-87,6	3,45	93	1,79	-86,6	1,7	-87,3	3,58	93,4	0	0
9	1,75	153	1,84	154	1,65	152	3,45	-27	1,79	153	1,7	153	1,88	154	0	0
	1,75	33,1	1,84	33,7	1,65	32,4	3,45	-147	1,79	33,4	1,7	32,7	1,88	33,9	0	0
	1,75	-86,9	1,84	-86,3	1,65	-87,6	3,45	93	1,79	-86,6	1,7	-87,3	1,88	-86,1	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	1,75	-26,9	1,84	-26,3	1,65	-27,6	1,92	-25,8	1,79	-26,6	1,7	-27,3	1,88	-26,1	0	0
	1,75	-147	1,84	-146	1,65	-148	1,92	-146	1,79	-147	1,7	-147	1,88	-146	0	0
	1,75	93,1	1,84	93,7	1,65	92,4	1,92	94,2	1,79	93,4	1,7	92,7	1,88	93,9	0	0

Simulação de Curto-Circuito Tipo ABCT nas Barras da Microrrede **Correntes Totais (kA / °) - Status Off-Grid - Linha D Desligada - Sistemas Fotov. Desligadas - G. Diesel Ligados**																
Elem./Barra Fases ABC	**1**		**2**		**3**		**4**		**5**		**6**		**7**		**8**	
	Mód.	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	3,57	153	1,81	-26,5	3,36	153	1,67	-27,4	1,83	-26,4	3,46	153	1,74	-27	0	0
	3,57	33,3	1,81	-147	3,36	32,7	1,67	-147	1,83	-146	3,46	33	1,74	-147	0	0
	3,57	-86,7	1,81	93,5	3,36	-87,3	1,67	92,6	1,83	93,6	3,46	-87	1,74	93	0	0
3	3,57	153	1,81	-26,5	3,36	153	1,67	-27,4	3,66	154	3,46	153	1,74	-27	0	0
	3,57	33,3	1,81	-147	3,36	32,7	1,67	-147	3,66	33,6	3,46	33	1,74	-147	0	0
	3,57	-86,7	1,81	93,5	3,36	-87,3	1,67	92,6	3,66	-86,4	3,46	-87	1,74	93	0	0
4	1,86	154	1,81	153	3,36	-27,3	1,67	153	1,83	154	3,46	-27	1,74	153	0	0
	1,86	33,8	1,81	33,5	3,36	-147	1,67	32,6	1,83	33,6	3,46	-147	1,74	33	0	0
	1,86	-86,2	1,81	-86,5	3,36	92,7	1,67	-87,4	1,83	-86,4	3,46	93	1,74	-87	0	0
5	1,86	154	1,81	153	3,36	-27,3	1,67	153	1,83	154	1,89	154	1,74	153	0	0
	1,86	33,8	1,81	33,5	3,36	-147	1,67	32,6	1,83	33,6	1,89	34	1,74	33	0	0
	1,86	-86,2	1,81	-86,5	3,36	92,7	1,67	-87,4	1,83	-86,4	1,89	-86	1,74	-87	0	0
6	1,82	-26,4	1,92	-25,8	1,71	-27,1	1,78	-26,7	1,87	-26,1	1,77	-26,8	1,85	-26,3	0	0
	1,82	-146	1,92	-146	1,71	-147	1,78	-147	1,87	-146	1,77	-147	1,85	-146	0	0
	1,82	93,6	1,92	94,2	1,71	92,9	1,78	93,3	1,87	93,9	1,77	93,2	1,85	93,7	0	0
7	1,86	-26,2	1,81	-26,5	1,92	-25,8	1,67	-27,4	1,83	-26,4	1,89	-26	1,74	-27	0	0
	1,86	-146	1,81	-147	1,92	-146	1,67	-147	1,83	-146	1,89	-146	1,74	-147	0	0
	1,86	93,8	1,81	93,5	1,92	94,2	1,67	92,6	1,83	93,6	1,89	94	1,74	93	0	0
8	1,75	153	1,84	154	1,65	152	3,45	-27	1,79	153	1,7	153	3,58	-26,6	0	0
	1,75	33,1	1,84	33,7	1,65	32,4	3,45	-147	1,79	33,4	1,7	32,7	3,58	-147	0	0
	1,75	-86,9	1,84	-86,3	1,65	-87,6	3,45	93	1,79	-86,6	1,7	-87,3	3,58	93,4	0	0
9	1,75	153	1,84	154	1,65	152	3,45	-27	1,79	153	1,7	153	1,88	154	0	0
	1,75	33,1	1,84	33,7	1,65	32,4	3,45	-147	1,79	33,4	1,7	32,7	1,88	33,9	0	0
	1,75	-86,9	1,84	-86,3	1,65	-87,6	3,45	93	1,79	-86,6	1,7	-87,3	1,88	-86,1	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	1,75	-26,9	1,84	-26,3	1,65	-27,6	1,92	-25,8	1,79	-26,6	1,7	-27,3	1,88	-26,1	0	0
	1,75	-147	1,84	-146	1,65	-148	1,92	-146	1,79	-147	1,7	-147	1,88	-146	0	0
	1,75	93,1	1,84	93,7	1,65	92,4	1,92	94,2	1,79	93,4	1,7	92,7	1,88	93,9	0	0

Apêndice E*

SIMULAÇÕES DE CURTO-CIRCUITO (SIMULAÇÃO E)

- **Status Off-Grid - Linha D Desligada - Sistemas Fot. e Geradores Diesel Ligados**

Simulação de Curto-Circuito nas Barras da Microrrede – Correntes Totais de Falta (kA) Componentes de Fase - Status Off-Grid - Linha D Desligada - Sistemas Fotov. e Geradores Diesel Ligados								
Barras	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
AT **Fases ABC**	10,20 - j5,24	10,86 - j5,42	9,85 - j5,08	10,15 - j5,18	10,48 - j5,32	9,97 - j5,15	10,40 - j5,29	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
BC **Fases ABC**	0	0	0	0	0	0	0	0
	-3,27 - j6,47	-3,36 - j6,77	-3,19 - j6,23	-3,24 - j6,39	-3,32 - j6,61	-3,23 - j6,33	-3,30 - j6,55	0
	3,27 + j6,47	3,36 + j6,77	3,19 + j6,23	3,24 + j6,39	3,32 + j6,61	3,23 + j6,33	3,30 + j6,55	0
BCT **Fases ABC**	0	0	0	0	0	0	0	0
	-7,16 - j2,58	-7,62 - j2,53	-7,07 - j2,44	-7,23 - j2,47	-7,33 - j2,57	-7,06 - j2,53	-7,31 - j2,55	0
	-2,18 + j7,45	-2,60 + j7,67	-2,19 + j7,19	-2,31 + j7,34	-2,33 + j7,57	-2,13 + j7,32	-2,33 + j7,51	0
ABC **Fases ABC**	4,85 - j2,42	4,99 - j2,46	4,71 - j2,37	4,80 - j2,40	4,92 - j2,44	4,78 - j2,40	4,89 - j2,43	0
	-4,52 - j2,99	-4,63 - j3,09	-4,41 - j2,89	-4,48 - j2,95	-4,57 - j3,04	-4,46 - j2,94	-4,55 - j3,02	0
	-0,32 + j5,41	-0,36 + j5,56	-0,29 + j5,27	-0,31 + j5,36	-0,34 + j5,48	-0,31 + j5,34	-0,33 + j5,45	0
ABCT **Fases ABC**	4,85 - j2,42	4,99 - j2,46	4,71 - j2,37	4,80 - j2,40	4,92 - j2,44	4,78 - j2,40	4,89 - j2,43	0
	-4,52 - j2,99	-4,63 - j3,09	-4,41 - j2,89	-4,48 - j2,95	-4,57 - j3,04	-4,46 - j2,94	-4,55 - j3,02	0
	-0,32 + j5,41	-0,36 + j5,56	-0,29 + j5,27	-0,31 + j5,36	-0,34 + j5,48	-0,31 + j5,34	-0,33 + j5,45	0

Simulação de Curto-Circuito nas Barras da Microrrede – Tensões Totais de Falta (kV) Componentes de Fase - Status Off-Grid - Linha D Desligada - Sistemas Fotov. e Geradores Diesel Ligados								
Barras	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
AT **Fases ABC**	0	0	0	0	0	0	0	0
	-1,67 - j6,13	-1,42 - j5,71	-1,65 - j6,19	-1,58 - j6,05	-1,58 - j5,97	-1,70 - j6,21	-1,58 - j5,98	0
	-1,94 + j5,91	-1,57 + j5,62	-1,88 + j6,09	-1,79 + j5,95	-1,81 + j5,78	-1,97 + j6,02	-1,80 + j5,82	0
BC **Fases ABC**	6,29 + j0,12	5,98 + j0,07	6,47 + j0,12	6,32 + j0,11	6,16 + j0,11	6,41 + j0,13	6,19 + j0,11	0
	-3,14 - j0,06	-2,99 - j0,03	-3,23 - j0,06	-3,16 - j0,05	-3,08 - j0,05	-3,20 - j0,06	-3,09 - j0,05	0
	-3,14 - j0,06	-2,99 - j0,03	-3,23 - j0,06	-3,16 - j0,05	-3,08 - j0,05	-3,20 - j0,06	-3,09 - j0,05	0
BCT **Fases ABC**	3,32 + 0,17	2,82 + j0,08	3,32 + j0,10	3,17 + j0,09	3,14 + j0,15	3,40 + j0,16	3,14 + j0,13	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
ABC **Fases ABC**	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
ABCT **Fases ABC**	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0

Simulação de Curto-Circuito Tipo AT nas Barras da Microrrede **Correntes Totais (kA / °) - Status Off-Grid - Linha D Desligada - Sistemas Fotov. e Geradores Diesel Ligados**																
Elem./Barra Fases ABC	**1**		**2**		**3**		**4**		**5**		**6**		**7**		**8**	
	Mód.	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	7,54	154	3,72	-26,5	6,27	152	2,94	-28,1	4,06	-25,9	6,87	153	3,29	-27,4	0	0
	0,49	38,5	0,38	-157	0,95	17,6	0,61	-166	0,19	-126	0,71	24,6	0,49	-163	0	0
	0,57	-53,3	0,44	134	1,1	-46,5	0,69	134	0,2	125	0,83	-48,8	0,57	134	0	0
3	7,54	154	3,72	-26,5	6,27	152	2,94	-28,1	8,18	154	6,87	153	3,29	-27,4	0	0
	0,49	38,5	0,38	-157	0,95	17,6	0,61	-166	0,35	63,4	0,71	24,6	0,49	-163	0	0
	0,57	-53,3	0,44	134	1,1	-46,5	0,69	134	0,34	-63	0,83	-48,8	0,57	134	0	0
4	4,41	155	3,72	153	6,27	-27,6	2,94	152	4,06	154	6,87	-27	3,29	153	0	0
	0,2	125	0,38	22,7	0,95	-162	0,61	13,6	0,19	53,7	0,71	-155	0,49	17,1	0	0
	0,07	-170	0,44	-45,5	1,1	134	0,69	-46,2	0,2	-54,7	0,83	131	0,57	-46	0	0
5	4,41	155	3,72	153	6,27	-27,6	2,94	152	4,06	154	4,84	155	3,29	153	0	0
	0,2	125	0,38	22,7	0,95	-162	0,61	13,6	0,19	53,7	0,41	156	0,49	17,1	0	0
	0,07	-170	0,44	-45,5	1,1	134	0,69	-46,2	0,2	-54,7	0,32	150	0,57	-46	0	0
6	3,98	-26,8	4,76	-25	3,25	-28,5	3,6	-27,8	4,34	-25,9	3,59	-27,7	4,13	-26,4	0	0
	0,1	-2,86	0,41	-1,86	0,24	178	0,13	177	0,25	-2,33	0,08	178	0,13	-1,97	0	0
	0,1	-29,8	0,41	-32,9	0,25	143	0,13	152	0,25	-32,6	0,08	139	0,13	-36,4	0	0
7	4,25	-26,4	3,56	-27,8	5,14	-25	2,78	-29,9	3,9	-27,1	4,68	-25,7	3,13	-29	0	0
	0,21	-1,64	0,26	178	0,73	-1,94	0,5	178	0,02	176	0,47	-1,94	0,38	178	0	0
	0,21	-42,1	0,27	144	0,75	-40	0,52	139	0,02	169	0,49	-40,5	0,4	140	0	0
8	3,35	152	3,94	154	2,81	151	6,75	-27	3,63	153	3,06	152	7,64	-26,1	0	0
	0,37	14,5	0,22	26	0,55	9,28	0,91	-158	0,3	18,8	0,46	11,3	0,59	-142	0	0
	0,42	-44,3	0,25	-42,1	0,62	-45,1	1,05	133	0,34	-43,5	0,52	-44,9	0,68	127	0	0
9	3,35	152	3,94	154	2,81	151	6,75	-27	3,63	153	3,06	152	4,52	155	0	0
	0,37	14,5	0,22	26	0,55	9,28	0,91	-158	0,3	18,8	0,46	11,3	0,22	150	0	0
	0,42	-44,3	0,25	-42,1	0,62	-45,1	1,05	133	0,34	-43,5	0,52	-44,9	0,16	153	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	3,25	-28,7	3,83	-27,2	2,71	-30,1	5,03	-25	3,52	-28	2,96	-29,5	4,41	-26,1	0	0
	0,3	178	0,14	178	0,48	178	0,63	-1,85	0,22	178	0,39	178	0,26	-1,47	0	0
	0,31	142	0,14	153	0,51	138	0,65	-38,6	0,23	145	0,41	140	0,27	-41,3	0	0

Simulação de Curto-Circuito Tipo BC nas Barras da Microrrede **Correntes Totais (kA / °) - Status Off-Grid - Linha D Desligada - Sistemas Fotov. e Geradores Diesel Ligados**																
Elem./Barra Fases ABC	**1**		**2**		**3**		**4**		**5**		**6**		**7**		**8**	
	Mód.	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0,45	176	0,28	-5,82	0,66	172	0,39	-9,87	0,18	0,14	0,55	174	0,34	-8,23	0	0
	5,06	62,1	2,56	-118	4,59	59,7	2,25	-121	2,65	-117	4,81	60,9	2,4	-120	0	0
	4,89	-113	2,47	67,6	4,38	-112	2,14	68,4	2,57	66,7	4,63	-113	2,29	67,9	0	0
3	0,45	176	0,28	-5,82	0,66	172	0,39	-9,87	0,36	180	0,55	174	0,34	-8,23	0	0
	5,06	62,1	2,56	-118	4,59	59,7	2,25	-121	5,29	63,1	4,81	60,9	2,4	-120	0	0
	4,89	-113	2,47	67,6	4,38	-112	2,14	68,4	5,14	-113	4,63	-113	2,29	67,9	0	0
4	0,1	-163	0,28	174	0,66	-8,2	0,39	170	0,18	-180	0,55	-6,37	0,34	172	0	0
	2,74	64,4	2,56	61,6	4,59	-120	2,25	58,6	2,65	63,1	4,81	-119	2,4	60,1	0	0
	2,67	-114	2,47	-112	4,38	67,7	2,14	-112	2,57	-113	4,63	67,3	2,29	-112	0	0
5	0,1	-163	0,28	174	0,66	-8,2	0,39	170	0,18	-180	0,06	-80,4	0,34	172	0	0
	2,74	64,4	2,56	61,6	4,59	-120	2,25	58,6	2,65	63,1	2,85	65,9	2,4	60,1	0	0
	2,67	-114	2,47	-112	4,38	67,7	2,14	-112	2,57	-113	2,8	-115	2,29	-112	0	0
6	0,03	165	0,14	164	0,09	-17,2	0,04	-14	0,08	164	0,03	-18	0,05	163	0	0
	2,46	-116	2,71	-114	2,2	-119	2,35	-118	2,58	-115	2,32	-118	2,52	-116	0	0
	2,46	63	2,73	63	2,19	63,4	2,34	63,3	2,59	63	2,32	63,1	2,52	63	0	0
7	0,09	162	0,1	-16,5	0,3	162	0,22	-18	0	14,5	0,2	162	0,16	-17,5	0	0
	2,56	-115	2,38	-118	2,79	-112	2,07	-122	2,47	-117	2,67	-114	2,22	-120	0	0
	2,57	62,7	2,36	64,1	2,83	61,5	2,03	64,5	2,47	63,3	2,7	62	2,19	64,2	0	0
8	0,24	171	0,16	177	0,33	168	0,67	-6,55	0,2	173	0,28	170	0,53	-3,72	0	0
	2,37	60,7	2,59	62,8	2,14	58,3	4,84	-119	2,47	61,7	2,25	59,5	5,15	-118	0	0
	2,29	-114	2,53	-114	2,05	-113	4,62	68,1	2,41	-114	2,17	-113	4,95	67,6	0	0
9	0,24	171	0,16	177	0,33	168	0,67	-6,55	0,2	173	0,28	170	0,04	-111	0	0
	2,37	60,7	2,59	62,8	2,14	58,3	4,84	-119	2,47	61,7	2,25	59,5	2,73	64,9	0	0
	2,29	-114	2,53	-114	2,05	-113	4,62	68,1	2,41	-114	2,17	-113	2,7	-115	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0,12	-17,3	0,04	-13,5	0,21	-18,2	0,25	163	0,08	-16,3	0,17	-17,9	0,11	162	0	0
	2,25	-119	2,47	-117	2,02	-122	2,77	-113	2,35	-118	2,13	-120	2,61	-115	0	0
	2,22	63,8	2,46	63,8	1,98	64,2	2,8	62	2,34	63,7	2,1	64	2,63	62,7	0	0

Simulação de Curto-Circuito Tipo BCT nas Barras da Microrrede **Correntes Totais (kA / °) - Status Off-Grid - Linha D Desligada - Sistemas Fotov. e Geradores Diesel Ligados**																
Elem./Barra Fases ABC	**1**		**2**		**3**		**4**		**5**		**6**		**7**		**8**	
	Mód.	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0,6	171	0,49	-11,8	1,24	166	0,79	-16,1	0,2	-0,76	0,92	167	0,64	-14,6	0	0
	5,13	23,5	2,53	-156	4,46	26,7	2,13	-151	2,71	-158	4,77	25,3	2,3	-153	0	0
	5,31	-74,4	2,63	105	4,64	-79,1	2,23	98,4	2,81	108	4,96	-77	2,42	101	0	0
3	0,6	171	0,49	-11,8	1,24	166	0,79	-16,1	0,34	-180	0,92	167	0,64	-14,6	0	0
	5,13	23,5	2,53	-156	4,46	26,7	2,13	-151	5,48	21,7	4,77	25,3	2,3	-153	0	0
	5,31	-74,4	2,63	105	4,64	-79,1	2,23	98,4	5,64	-71,8	4,96	-77	2,42	101	0	0
4	0,11	-59,1	0,49	168	1,24	-14,5	0,79	164	0,2	179	0,92	-12,7	0,64	165	0	0
	2,91	20,1	2,53	24	4,46	-153	2,13	28,7	2,71	22,1	4,77	-155	2,3	26,8	0	0
	2,99	-69,8	2,63	-75,1	4,64	101	2,23	-81,6	2,81	-72,4	4,96	103	2,42	-78,9	0	0
5	0,11	-59,1	0,49	168	1,24	-14,5	0,79	164	0,2	179	0,41	-29,6	0,64	165	0	0
	2,91	20,1	2,53	24	4,46	-153	2,13	28,7	2,71	22,1	3,17	17,7	2,3	26,8	0	0
	2,99	-69,8	2,63	-75,1	4,64	101	2,23	-81,6	2,81	-72,4	3,23	-66,6	2,42	-78,9	0	0
6	0,11	164	0,47	163	0,29	-18,9	0,15	-15	0,28	163	0,09	-20,7	0,15	161	0	0
	2,63	-161	3,12	-165	2,23	-158	2,42	-160	2,85	-163	2,42	-159	2,72	-162	0	0
	2,67	108	3,09	115	2,29	102	2,47	105	2,86	111	2,46	105	2,75	109	0	0
7	0,25	159	0,32	-18,4	0,89	160	0,62	-20,8	0,02	-6,73	0,57	159	0,46	-20,2	0	0
	2,78	-162	2,38	-159	3,36	-167	1,98	-154	2,57	-160	3,04	-165	2,15	-156	0	0
	2,82	110	2,46	104	3,31	117	2,07	96,6	2,63	107	3,05	113	2,25	99,6	0	0
8	0,47	165	0,28	172	0,72	163	1,17	-12,7	0,38	167	0,59	163	0,72	-8,88	0	0
	2,31	25,3	2,63	21,5	2,04	28	4,73	-154	2,45	23,7	2,16	26,9	5,2	-156	0	0
	2,42	-78,5	2,72	-73,2	2,13	-82,6	4,92	103	2,56	-76,2	2,27	-80,8	5,38	106	0	0
9	0,47	165	0,28	172	0,72	163	1,17	-12,7	0,38	167	0,59	163	0,21	-32,8	0	0
	2,31	25,3	2,63	21,5	2,04	28	4,73	-154	2,45	23,7	2,16	26,9	2,97	18,3	0	0
	2,42	-78,5	2,72	-73,2	2,13	-82,6	4,92	103	2,56	-76,2	2,27	-80,8	3,02	-68,5	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0,36	-19,8	0,16	-14,6	0,6	-20,9	0,77	160	0,26	-18,3	0,48	-20,6	0,31	159	0	0
	2,21	-156	2,53	-160	1,94	-154	3,29	-166	2,36	-158	2,06	-155	2,88	-163	0	0
	2,31	101	2,6	106	2,02	96,1	3,24	116	2,44	103	2,16	98,1	2,9	111	0	0

Simulação de Curto-Circuito Tipo ABC nas Barras da Microrrede **Correntes Totais (kA / °) - Status Off-Grid - Linha D Desligada - Sistemas Fotov. e Geradores Diesel Ligados**																
Elem./Barra	**1**		**2**		**3**		**4**		**5**		**6**		**7**		**8**	
Fases ABC	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	3,89	156	1,97	-24,2	3,68	155	1,84	-24,8	2	-24,1	3,79	155	1,9	-24,5	0	0
	3,89	35,7	1,97	-144	3,68	35,2	1,84	-145	2	-144	3,79	35,5	1,9	-145	0	0
	3,89	-84,3	1,97	95,8	3,68	-84,8	1,84	95,2	2	95,9	3,79	-84,5	1,9	95,5	0	0
3	3,89	156	1,97	-24,2	3,68	155	1,84	-24,8	3,99	156	3,79	155	1,9	-24,5	0	0
	3,89	35,7	1,97	-144	3,68	35,2	1,84	-145	3,99	35,9	3,79	35,5	1,9	-145	0	0
	3,89	-84,3	1,97	95,8	3,68	-84,8	1,84	95,2	3,99	-84,1	3,79	-84,5	1,9	95,5	0	0
4	2,02	156	1,97	156	3,68	-24,8	1,84	155	2	156	3,79	-24,5	1,9	155	0	0
	2,02	36	1,97	35,8	3,68	-145	1,84	35,2	2	35,9	3,79	-145	1,9	35,5	0	0
	2,02	-84	1,97	-84,2	3,68	95,2	1,84	-84,8	2	-84,1	3,79	95,5	1,9	-84,5	0	0
5	2,02	156	1,97	156	3,68	-24,8	1,84	155	2	156	2,05	156	1,9	155	0	0
	2,02	36	1,97	35,8	3,68	-145	1,84	35,2	2	35,9	2,05	36,2	1,9	35,5	0	0
	2,02	-84	1,97	-84,2	3,68	95,2	1,84	-84,8	2	-84,1	2,05	-83,8	1,9	-84,5	0	0
6	1,82	-26,4	1,92	-25,8	1,71	-27,1	1,78	-26,7	1,87	-26,1	1,77	-26,8	1,85	-26,3	0	0
	1,82	-146	1,92	-146	1,71	-147	1,78	-147	1,87	-146	1,77	-147	1,85	-146	0	0
	1,82	93,6	1,92	94,2	1,71	92,9	1,78	93,3	1,87	93,9	1,77	93,2	1,85	93,7	0	0
7	1,86	-26,2	1,81	-26,5	1,92	-25,8	1,67	-27,4	1,83	-26,4	1,89	-26	1,74	-27	0	0
	1,86	-146	1,81	-147	1,92	-146	1,67	-147	1,83	-146	1,89	-146	1,74	-147	0	0
	1,86	93,8	1,81	93,5	1,92	94,2	1,67	92,6	1,83	93,6	1,89	94	1,74	93	0	0
8	1,86	155	1,95	155	1,75	154	3,83	-24,2	1,9	155	1,8	154	3,96	-23,9	0	0
	1,86	34,8	1,95	35,2	1,75	34,3	3,83	-144	1,9	35	1,8	34,5	3,96	-144	0	0
	1,86	-85,2	1,95	-84,8	1,75	-85,7	3,83	95,8	1,9	-85	1,8	-85,5	3,96	96,1	0	0
9	1,86	155	1,95	155	1,75	154	3,83	-24,2	1,9	155	1,8	154	1,99	155	0	0
	1,86	34,8	1,95	35,2	1,75	34,3	3,83	-144	1,9	35	1,8	34,5	1,99	35,4	0	0
	1,86	-85,2	1,95	-84,8	1,75	-85,7	3,83	95,8	1,9	-85	1,8	-85,5	1,99	-84,6	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	1,75	-26,9	1,84	-26,3	1,65	-27,6	1,92	-25,8	1,79	-26,6	1,7	-27,3	1,88	-26,1	0	0
	1,75	-147	1,84	-146	1,65	-148	1,92	-146	1,79	-147	1,7	-147	1,88	-146	0	0
	1,75	93,1	1,84	93,7	1,65	92,4	1,92	94,2	1,79	93,4	1,7	92,7	1,88	93,9	0	0

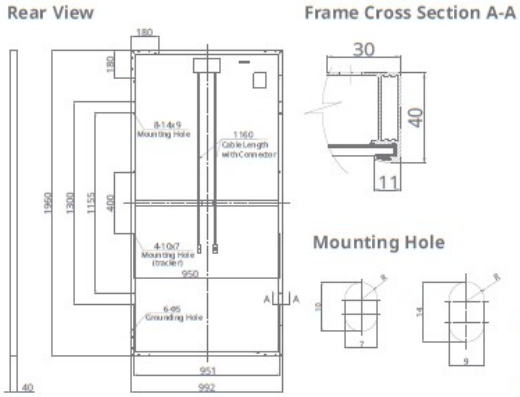
Simulação de Curto-Circuito Tipo ABCT nas Barras da Microrrede **Correntes Totais (kA / °) - Status Off-Grid - Linha D Desligada - Sistemas Fotov. e Geradores Diesel Ligados**																
Elem./Barra Fases ABC	**1**		**2**		**3**		**4**		**5**		**6**		**7**		**8**	
	Mód.	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**	**Mód.**	**Âng.**
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	3,89	156	1,97	-24,2	3,68	155	1,84	-24,8	2	-24,1	3,79	155	1,9	-24,5	0	0
	3,89	35,7	1,97	-144	3,68	35,2	1,84	-145	2	-144	3,79	35,5	1,9	-145	0	0
	3,89	-84,3	1,97	95,8	3,68	-84,8	1,84	95,2	2	95,9	3,79	-84,5	1,9	95,5	0	0
3	3,89	156	1,97	-24,2	3,68	155	1,84	-24,8	3,99	156	3,79	155	1,9	-24,5	0	0
	3,89	35,7	1,97	-144	3,68	35,2	1,84	-145	3,99	35,9	3,79	35,5	1,9	-145	0	0
	3,89	-84,3	1,97	95,8	3,68	-84,8	1,84	95,2	3,99	-84,1	3,79	-84,5	1,9	95,5	0	0
4	2,02	156	1,97	156	3,68	-24,8	1,84	155	2	156	3,79	-24,5	1,9	155	0	0
	2,02	36	1,97	35,8	3,68	-145	1,84	35,2	2	35,9	3,79	-145	1,9	35,5	0	0
	2,02	-84	1,97	-84,2	3,68	95,2	1,84	-84,8	2	-84,1	3,79	95,5	1,9	-84,5	0	0
5	2,02	156	1,97	156	3,68	-24,8	1,84	155	2	156	2,05	156	1,9	155	0	0
	2,02	36	1,97	35,8	3,68	-145	1,84	35,2	2	35,9	2,05	36,2	1,9	35,5	0	0
	2,02	-84	1,97	-84,2	3,68	95,2	1,84	-84,8	2	-84,1	2,05	-83,8	1,9	-84,5	0	0
6	1,82	-26,4	1,92	-25,8	1,71	-27,1	1,78	-26,7	1,87	-26,1	1,77	-26,8	1,85	-26,3	0	0
	1,82	-146	1,92	-146	1,71	-147	1,78	-147	1,87	-146	1,77	-147	1,85	-146	0	0
	1,82	93,6	1,92	94,2	1,71	92,9	1,78	93,3	1,87	93,9	1,77	93,2	1,85	93,7	0	0
7	1,86	-26,2	1,81	-26,5	1,92	-25,8	1,67	-27,4	1,83	-26,4	1,89	-26	1,74	-27	0	0
	1,86	-146	1,81	-147	1,92	-146	1,67	-147	1,83	-146	1,89	-146	1,74	-147	0	0
	1,86	93,8	1,81	93,5	1,92	94,2	1,67	92,6	1,83	93,6	1,89	94	1,74	93	0	0
8	1,86	155	1,95	155	1,75	154	3,83	-24,2	1,9	155	1,8	154	3,96	-23,9	0	0
	1,86	34,8	1,95	35,2	1,75	34,3	3,83	-144	1,9	35	1,8	34,5	3,96	-144	0	0
	1,86	-85,2	1,95	-84,8	1,75	-85,7	3,83	95,8	1,9	-85	1,8	-85,5	3,96	96,1	0	0
9	1,86	155	1,95	155	1,75	154	3,83	-24,2	1,9	155	1,8	154	1,99	155	0	0
	1,86	34,8	1,95	35,2	1,75	34,3	3,83	-144	1,9	35	1,8	34,5	1,99	35,4	0	0
	1,86	-85,2	1,95	-84,8	1,75	-85,7	3,83	95,8	1,9	-85	1,8	-85,5	1,99	-84,6	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	1,75	-26,9	1,84	-26,3	1,65	-27,6	1,92	-25,8	1,79	-26,6	1,7	-27,3	1,88	-26,1	0	0
	1,75	-147	1,84	-146	1,65	-148	1,92	-146	1,79	-147	1,7	-147	1,88	-146	0	0
	1,75	93,1	1,84	93,7	1,65	92,4	1,92	94,2	1,79	93,4	1,7	92,7	1,88	93,9	0	0

Anexo A*

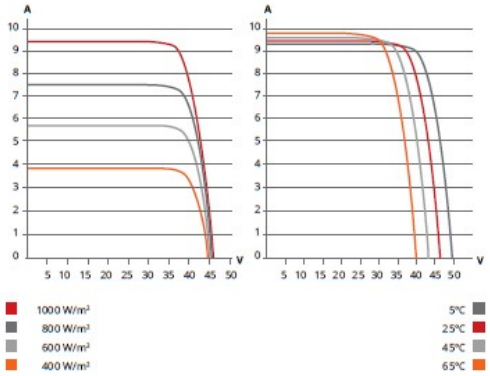
DADOS DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

- **MAXPOWER CS6U-330M/335M/340M/345M (CanadianSolar)**

ENGINEERING DRAWING (mm)



CS6U-335M / I-V CURVES



ELECTRICAL DATA | STC*

CS6U	330M	335M	340M	345M
Nominal Max. Power (Pmax)	330 W	335 W	340 W	345 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	37.5 V	37.8 V	37.9 V	38.1 V
Opt. Operating Current (Imp)	8.80 A	8.87 A	8.97 A	9.06 A
Open Circuit Voltage (Voc)	45.9 V	46.1 V	46.2 V	46.4 V
Short Circuit Current (Isc)	9.31 A	9.41 A	9.48 A	9.56 A
Module Efficiency	16.97%	17.23%	17.49%	17.74%
Operating Temperature	-40°C ~ +85°C			
Max. System Voltage	1000 V (IEC) or 1000 V (UL)			
Module Fire Performance	TYPE 1 (UL 1703) or CLASS C (IEC 61730)			
Max. Series Fuse Rating	15 A			
Application Classification	Class A			
Power Tolerance	0 ~ + 5 W			

* Under Standard Test Conditions (STC) of irradiance of 1000 W/m², spectrum AM 1.5 and cell temperature of 25°C.

MECHANICAL DATA

Specification	Data
Cell Type	Mono-crystalline, 6 inch
Cell Arrangement	72 (6×12)
Dimensions	1960×992×40 mm (77.2×39.1×1.57 in)
Weight	22.4 kg (49.4 lbs)
Front Cover	3.2 mm tempered glass
Frame Material	Anodized aluminium alloy
J-Box	IP68, 3 diodes
Cable	4.0 mm² (IEC), 12 AWG (UL), 1160 mm (45.7 in)
Connector	T4 series
Per Pallet	26 pieces, 635 kg (1400 lbs)
Per Container (40' HQ)	624 pieces

ELECTRICAL DATA | NMOT*

CS6U	330M	335M	340M	345M
Nominal Max. Power (Pmax)	242 W	246 W	250 W	253 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	34.5 V	34.8 V	34.9 V	35.1 V
Opt. Operating Current (Imp)	7.03 A	7.08 A	7.16 A	7.23 A
Open Circuit Voltage (Voc)	42.7 V	42.9 V	43.0 V	43.2 V
Short Circuit Current (Isc)	7.52 A	7.60 A	7.66 A	7.72 A

* Under Nominal Module Operating Temperature (NMOT), irradiance of 800 W/m², spectrum AM 1.5, ambient temperature 20°C, wind speed 1 m/s.

TEMPERATURE CHARACTERISTICS

Specification	Data
Temperature Coefficient (Pmax)	-0.41 % / °C
Temperature Coefficient (Voc)	-0.31 % / °C
Temperature Coefficient (Isc)	0.05 % / °C
Nominal Module Operating Temperature (NMOT)	43 ± 2 °C