

Universidade Federal de Juiz de Fora
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Mestrado em Engenharia Elétrica

Jonatas Marques Rodrigues

**ALGORITMO PARA RESTAURAÇÃO DE SISTEMAS DE
DISTRIBUIÇÃO CONSIDERANDO MEDIÇÕES E REDUZIDAS
INFORMAÇÕES DE PARÂMETROS DA REDE ELÉTRICA**

Juiz de Fora

2015

Jonatas Marques Rodrigues

**ALGORITMO PARA RESTAURAÇÃO DE SISTEMAS DE
DISTRIBUIÇÃO CONSIDERANDO MEDIÇÕES E REDUZIDAS
INFORMAÇÕES DE PARÂMETROS DA REDE ELÉTRICA**

Dissertação submetida ao corpo docente da coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de mestre em ciências em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Leandro Ramos de Araujo, D. Sc.

Co-orientador: Prof^a. Débora Rosana Ribeiro Penido Araujo, D. Sc.

Juiz de Fora

2015

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Rodrigues, Jonatas Marques.

ALGORITMO PARA RESTAURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO CONSIDERANDO MEDIÇÕES E REDUZIDAS INFORMAÇÕES DE PARÂMETROS DA REDE ELÉTRICA / Jonatas Marques Rodrigues. -- 2015.
133 f.

Orientador: Leandro Ramos de Araujo

Coorientadora: Débora Rosana Ribeiro Penido Araujo

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2015.

1. Restauração de Redes. 2. Realocação de Cargas. 3. Implementação Computacional. 4. Sistemas Elétricos de Distribuição. 5. Proteção de Sistemas de Distribuição. I. Araujo, Leandro Ramos de, orient. II. Araujo, Débora Rosana Ribeiro Penido, coorient. III. Título.

ALGORITMO PARA RESTAURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO
CONSIDERANDO MEDIÇÕES E REDUZIDAS INFORMAÇÕES DE
PARÂMETROS DA REDE ELÉTRICA

JONATAS MARQUES RODRIGUES

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DE JUIZ DE FORA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA
ELÉTRICA.

Aprovada por:

Prof. Leandro Ramos de Araujo, D.Sc. - UFJF

Profa. Débora Rosana Ribeiro Penido Araujo, D.Sc. - UFJF

Prof. Carlos Augusto Duque, D.Sc. - UFJF

Prof. Delberis Araujo Lima, D. Sc. - PUC-Rio

JUIZ DE FORA, MG – BRASIL

AGOSTO DE 2015

RODRIGUES, JONATAS MARQUES

Algoritmo para Restauração de Sistemas de Distribuição Considerando Medições e
Reduzidas Informações de Parâmetros da Rede Elétrica

[Juiz de Fora] 2015

Dissertação – Universidade Federal de Juiz
de Fora, PPEE/UFJF

1. Restauração de Redes
2. Realocação de Cargas
3. Implementação Computacional
4. Sistemas Elétricos de Distribuição
5. Proteção de Sistemas de Distribuição

Este trabalho dedico a meus familiares, professores e colegas de curso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente e acima de tudo a meu Deus, pois sem Ele não teria conseguido chegar até aqui. Sua força e virtude me guiaram pelos caminhos de dificuldade e me fizeram chegar até este momento.

Agradeço também aos meus pais, Marcos Antônio Rodrigues e Maria do Carmo Marques Rodrigues, que sempre me ajudaram e mesmo que longe fisicamente na maior parte do tempo, estiveram ao meu lado me ajudando com suas palavras de ânimo e coragem sempre.

Também quero agradecer à minha avó Luzia de Castro, e à minha tia Catarina, estas que me acolheram por muitos anos em seu lar, e sempre me ajudaram, estando ao meu lado, e cuidando de mim com muito amor. Agradecimentos também a toda minha família que sempre me apoiou, incluindo meus primos e tios.

Agradeço aos meus professores, em especial aos professores Leandro Ramos de Araujo e Débora Rosana Ribeiro Penido Araujo, estes que me ajudaram sem medir esforços durante muitos anos os quais estivemos juntos e pude aprender muito com eles, ao professor Vander Menengoy da Costa, que desde o principio da graduação também muito me ajudou. Agradeço também a muitos outros professores, dentre os quais os Professores João Alberto Passos Filho e Ivo Chaves da Silva Júnior.

Também agradeço a todos os meus amigos que conheci nesta jornada, em especial ao Ricardo Viol dos Santos, que passamos por vários “perrengues” juntos e tive o prazer de conhecê-lo, se tornando um grande amigo para mim.

Também agradeço a CAPES, pelo apoio intelectual e financeiro durante os anos de Mestrado.

Resumo da Dissertação apresentada ao PPEE/UFJF como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

Algoritmo para Restauração de Sistemas de Distribuição Considerando Medições e Reduzidas Informações de Parâmetros da Rede Elétrica

Jonatas Marques Rodrigues

Agosto / 2015

Orientadores: Leandro Ramos de Araujo, D.Sc.

Débora Rosana Ribeiro Penido Araujo, D.Sc.

Programa: Engenharia Elétrica

Este trabalho propõe uma metodologia capaz de restaurar um sistema elétrico radial frente a uma contingência em qualquer ponto do sistema, necessitando de poucas informações, reenergizando o maior número de cargas possível ou trechos prioritários.

A principal contribuição deste trabalho consiste que o processo de decisão empregado na metodologia é baseado apenas nas condições de estados das chaves e religadores do sistema e nos dados de tensão e corrente pré-falta provenientes dos transformadores de instrumentos do sistema, que são informações facilmente obtidas na prática, diferentemente de outras metodologias que são dependentes de outros parâmetros da rede, muitas vezes ausentes ou cheios de incertezas. Destaca-se que não é necessário o conhecimento dos valores de impedâncias das linhas, demanda das cargas e controles, dentre outras características.

A metodologia pode ser resumida da seguinte forma. A partir dos dados adquiridos pelos transformadores de instrumentos e das ligações entre os dispositivos de manobra, o algoritmo é capaz de identificar a área compreendida entre dispositivos de manobra na qual o defeito ocorreu, e determinar quais barras ficam impossibilitadas de reenergização frente a uma restauração. Após isso, é realizada a reenergização das cargas possíveis, respeitando os limites de carregamento de alimentadores e mantendo o sistema radial. Simplificadamente, o método é baseado em árvores de decisões. A topologia de restauração escolhida pelo algoritmo depende de critério pré-estabelecido pelo usuário, que pode ser o maior número de barras reenergizadas ou a reenergização de trechos prioritários do sistema em questão.

Abstract of Thesis presented to PPEE/UFJF as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

Restoration Algorithm for Distribution Systems Considering Measurements and Reduced Information of Electrical Network Parameters

Jonatas Marques Rodrigues

August / 2015

Advisors: Leandro Ramos de Araujo, Ph.D.

Débora Rosana Ribeiro Penido Araujo, Ph.D.

Department: Electrical Engineering

This work proposes a methodology able to restore a radial electrical system in front of a contingency in any point of the system, needing little information, re-energizing the largest number of loads or priority sections.

The main contribution of this work consists that the decision process used in this methodology is based only at the conditions of system's switches and reclosers and of the pre-fault voltage and current data from system's instrument transformers, that are information easily obtained in practice, differently of other methodologies that are dependent of other network parameters, often absent or full of uncertainties. It can be highlighted that in the proposed methodology it is not necessary the knowledge of the network impedances, load demands and controls, among other characteristics.

The methodology can be summarized as follows. From the instrument transformers acquired data and the links of maneuvering devices, the algorithm is able to identify the area between the disconnectors devices where the fault occurs, and to determine which bars are unable to re-energizing in front of a restoration. After this, a load re-energizing is accomplished, respecting the feeders load limits and keeping the system radial. The restoration topology chosen by the algorithm depends of the criteria predetermined by the user, that can be the largest number of re-energized bars or the reenergization of priority system sections.

SUMÁRIO

Capítulo 1	Introdução.....	1
1.1	Considerações Iniciais	1
1.2	Motivações	2
1.3	Revisão Bibliográfica.....	3
1.4	Objetivos do Trabalho.....	9
1.5	Publicações Relacionadas ao Trabalho.....	11
1.6	Estrutura do Trabalho	11
1.7	Convenções e Nomenclaturas Utilizadas	11
Capítulo 2	Metodologia e Modelos.....	15
2.1	Introdução	15
2.2	Metodologia Proposta.....	16
2.2.1	Entrada de Dados.....	18
2.2.2	Critérios de Prioridade.....	22
2.2.3	Análise de Topologia.....	23
2.2.4	Estimativa de Carregamento.....	27
2.2.5	Análise da Restauração.....	36
2.2.6	Exemplo de Funcionamento do Algoritmo Proposto.....	52
2.2.7	Impressão dos Resultados.....	62
2.3	Conclusões do Capítulo	64
Capítulo 3	Testes e Resultados	65
3.1	Introdução	65
3.2	Testes com o Sistema de 10 Barras.....	65
3.2.1	Resultados no Sistema de 10 Barras	67
3.3	Testes com o Sistema de 21 Barras.....	72
3.3.1	Resultados no Sistema de 21 Barras	75
3.4	Testes com o Sistema de 50 Barras.....	83
3.4.1	Resultados no Sistema de 50 Barras	86
3.5	Testes com o Sistema de 150 Barras.....	96
3.5.1	Resultados no Sistema de 150 Barras	99
3.6	Conclusões do Capítulo	110
Capítulo 4	Conclusões	111
4.1	Conclusões Gerais.....	111
4.2	Trabalhos Futuros	112

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1.1 – Sistema de distribuição primária com os postes representados.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 1.2 – Esquema reduzido do mesmo sistema de distribuição da Figura 1.1</i>	<i>14</i>
<i>Figura 2.1 - Fluxograma das etapas gerais de operação.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 2.2 – Sistema teste 10 barras.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 2.3 – Submódulos contidos na etapa de análise de topologia.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 2.4 – Fluxograma da montagem da Matriz dos Trechos da Rede.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 2.5 - Esquema de estimação de carga.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 2.6 – Estimação de carga pelas medidas de tensão e corrente</i>	<i>29</i>
<i>Figura 2.7 - Estimação de carga pelas medidas de corrente apenas.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 2.8 – Fluxograma da etapa de estimação de carga.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 2.9 – Valores de carregamento de um dos ramos do sistema de 10 barras....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 2.10 – Fluxograma da etapa de análise de restauração</i>	<i>37</i>
<i>Figura 2.11 – Identificação da etapa 1 no sistema de 12 barras</i>	<i>38</i>
<i>Figura 2.12 – Modelo de análise de ação da proteção em primeira instância.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 2.13 – Etapa 2 no sistema de 12 barras</i>	<i>40</i>
<i>Figura 2.14 – Fluxograma referente à etapa 2</i>	<i>42</i>
<i>Figura 2.15 – Fluxograma referente ao conjunto de etapas 3</i>	<i>43</i>
<i>Figura 2.16 – Sistema 10 barras com destaque para os “ramos de realocação”.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 2.17 – Ação do conjunto de etapas 3 no sistema de 12 barras</i>	<i>45</i>
<i>Figura 2.18 – Ação do conjunto de etapas 4 no sistema de 12 barras</i>	<i>47</i>
<i>Figura 2.19 – Fluxograma da estrutura “busca_ conexão”</i>	<i>48</i>
<i>Figura 2.20 - Ação do conjunto de etapas 5 no sistema de 12 barras</i>	<i>49</i>
<i>Figura 2.21 - Ação do conjunto de etapas 6 no sistema de 12 barras</i>	<i>51</i>
<i>Figura 2.22 – Nova configuração do sistema de 12 barras</i>	<i>52</i>
<i>Figura 2.23 – Sistema típico de distribuição primária.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 2.24 – Sistema típico com algumas modificações</i>	<i>56</i>
<i>Figura 2.25 – Mesmo sistema típico com outras modificações</i>	<i>58</i>
<i>Figura 2.26 – Análise com a mudança da região em falta para trecho 10.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 2.27 – Análise com a mudança da região em falta para trecho 7.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 2.28 – Parte dos dados de saída disponibilizados pelo algoritmo.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 3.1 – Representação do sistema de 10 barras.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 3.2 – Faltas simuladas no sistema de 10 barras.....</i>	<i>67</i>

<i>Figura 3.3 – Nova topologia do sistema de 10 barras após realocação de cargas.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 3.4 – Representação do sistema de 21 barras, com indicação das faltas simuladas</i>	<i>73</i>
<i>Figura 3.5 – Sistema de 21 barras com modificação para simulação da falta “c”</i>	<i>79</i>
<i>Figura 3.6 - Nova topologia do sistema de 21 barras após realocação de cargas</i>	<i>83</i>
<i>Figura 3.7 – Representação do sistema teste de 50 barras, com indicação de faltas simuladas</i>	<i>85</i>
<i>Figura 3.8 – Parte da Lista de Sequência de Rede do sistema de 50 barras</i>	<i>86</i>
<i>Figura 3.9 – Matriz dos Trechos de Rede do sistema de 50 barras</i>	<i>86</i>
<i>Figura 3.10 – Nova configuração do sistema de 50 barras após reconfiguração realizada pelo algoritmo</i>	<i>91</i>
<i>Figura 3.11 – Representação do sistema de distribuição teste de 150 barras com indicação de faltas analisadas.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 3.12 – Parte da Lista de Sequência de Rede do sistema de 150 barras</i>	<i>98</i>
<i>Figura 3.13 – Matriz de Trechos da Rede do sistema de 150 barras.....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 3.14 - Nova configuração do sistema de 150 barras</i>	<i>103</i>

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1.1-Convenções adotadas para escrita de variáveis</i>	<i>12</i>
<i>Tabela 1.2-Convenções adotadas para funções e operações</i>	<i>12</i>
<i>Tabela 1.3-Convenções adotadas para designar grandezas e variáveis</i>	<i>12</i>
<i>Tabela 2.1 – Estrutura de entrada de dados para topologia, medição e disposição de dispositivos de seccionamento NF.</i>	<i>20</i>
<i>Tabela 2.2 – Estrutura de dados para o exemplo de dispositivos de seccionamento NA.</i>	<i>21</i>
<i>Tabela 2.3 – Estrutura de informações de detecção de correntes de falta</i>	<i>22</i>
<i>Tabela 2.4 – Lista de Sequência de Rede.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabela 2.5 – Estrutura da Matriz dos Trechos da Rede.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabela 2.6 – Dados de tensão provenientes dos transformadores de instrumentação</i>	<i>33</i>
<i>Tabela 2.7 – Corrente na condição pré falta (valores em p.u.).....</i>	<i>34</i>
<i>Tabela 2.8 – Valores de potência obtidos com medições fasoriais de tensão e corrente</i>	<i>34</i>
<i>Tabela 2.9 - Valores de potência obtidos com medições não-fasoriais de corrente....</i>	<i>35</i>
<i>Tabela 2.10 – Matriz dos Trechos de Rede para o sistema de 12 barras.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabela 3.1 – Lista de Sequência de Rede do sistema de 10 barras</i>	<i>66</i>
<i>Tabela 3.2 –Matriz dos Trechos de Rede do sistema de 10 barras</i>	<i>66</i>
<i>Tabela 3.3 – Dados de saída para a falta no trecho 6 do sistema de 10 barras</i>	<i>68</i>
<i>Tabela 3.4 – Dados de saída para a falta no trecho 9 do sistema de 10 barras</i>	<i>70</i>
<i>Tabela 3.5 – Dados de saída para a falta no trecho 2 do sistema de 10 barras</i>	<i>71</i>
<i>Tabela 3.6 – Lista de Sequência de Rede para o sistema de 21 barras</i>	<i>74</i>
<i>Tabela 3.7 – Matriz dos Trechos de Rede para o sistema de 21 barras.....</i>	<i>74</i>
<i>Tabela 3.8 - Dados de saída para a falta no trecho 17 do sistema de 21 barras</i>	<i>75</i>
<i>Tabela 3.9 - Dados de saída para a falta no trecho 7 do sistema de 21 barras</i>	<i>77</i>
<i>Tabela 3.10 - Dados de saída para a falta no trecho 2 do sistema de 21 barras modificado.....</i>	<i>80</i>
<i>Tabela 3.11 - Dados de saída para a falta no trecho 3 do sistema de 50 barras</i>	<i>87</i>
<i>Tabela 3.12 – Conexões encontradas pelo algoritmo no sistema de 50 barras.....</i>	<i>89</i>
<i>Tabela 3.13 - Dados de saída para a falta no trecho 27 do sistema de 50 barras</i>	<i>92</i>
<i>Tabela 3.14 - Dados de saída para a falta no trecho 40 do sistema de 50 barras</i>	<i>94</i>
<i>Tabela 3.15 - Dados de saída para a falta no trecho 7 do sistema de 150 barras</i>	<i>100</i>
<i>Tabela 3.16 – Conexões encontradas no sistema 150 barras (falta trecho 7).....</i>	<i>101</i>
<i>Tabela 3.17 - Dados de saída para a falta no trecho 29 do sistema de 150 barras ...</i>	<i>104</i>

Tabela 3.18 - Dados de saída para a falta no trecho 77 do sistema de 150 barras ... 106

Tabela 3.19 - Dados de saída para a falta no trecho 118 do sistema de 150 barras . 108

LISTA DE SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica;

IED - Intelligent Electronic Device;

MLP – Perceptron Multi-Camadas;

ACO – Ant Colony Optimization Algorithm;

PSO – Particle Swarm Optimization;

RBF – Otimização Radial Básica;

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais;

CEMIG-G – Companhia Energética de Minas Gerais – Geração;

CEMIG-T – Companhia Energética de Minas Gerais – Transmissão;

CEMIG-D – Companhia Energética de Minas Gerais – Distribuição;

RTDS – Real Time Digital Device;

FEC – Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora;

FIC – Frequência de Interrupção por Unidade Consumidora;

DEC – Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora;

DIC – Duração de Interrupção por Unidade Consumidora;

DMIC - Duração Máxima de Interrupção por Unidade Consumidora.

Capítulo 1 Introdução

1.1 Considerações Iniciais

A continuidade do serviço em sistemas de energia elétrica tem grande importância. Isto leva a um considerável interesse no desenvolvimento de ferramentas computacionais que apoiem e auxiliem os engenheiros na tarefa de melhorar indicadores de continuidade e de restabelecer sistemas após situações de defeito, sendo este aspecto o foco principal deste trabalho.

Dentro do ambiente industrial e de distribuição urbano existem cargas prioritárias, as quais correspondem a processos que não devem ser paradas. Em sistemas industriais uma determinada parada de um processo pode causar um grande prejuízo, influenciando diretamente até mesmo na subsistência do empreendimento, no cada vez mais competitivo mercado industrial. No âmbito da distribuição urbana, verificam-se cargas cuja desenergização também pode trazer grandes prejuízos, sejam eles de ordem econômica ou relacionados a questões de segurança.

Sendo assim, devem ser tomados cuidados com as redes de distribuição de energia elétrica, especialmente em situações de falha, onde uma possível falha precisa ser detectada com rapidez, isolada, e a maior parte possível do sistema restante deve ser reestabelecida, preferencialmente respeitando os tempos máximos definidos em normas e obedecendo às características e limitações dos alimentadores.

É nesse contexto que se encaixam dois tópicos importantes, a continuidade e a flexibilidade. Tais características estão diretamente associadas aos arranjos dos circuitos e aos tipos de equipamentos utilizados na rede (se são modernos, adequados às necessidades do sistema, se possuem baixos índices de falhas, se estão instalados corretamente, etc.) (Araujo, 2014).

Para sistemas de distribuição, os arranjos mais comuns são: radial, secundário seletivo, secundário malhado, primário seletivo e primário em anel, sendo que cada um dos tipos de arranjos citados possui suas próprias características, tais como custo, segurança, flexibilidade, confiabilidade, simplicidade, regulação de tensão, entre outros. Para escolher o arranjo mais adequado são realizados estudos que levam em conta a confiabilidade e o custo de projeto (Silva, 2004).

Especialmente devido a questões de custos, dentre os arranjos, o tipo mais utilizado é o radial, especialmente no âmbito da distribuição urbana, no qual um (ou mais) alimentador primário (expandido ou não) alimenta várias cargas. Dentre as vantagens da utilização de alimentadores radiais encontra-se o menor custo de investimento se comparado a outros arranjos, sua relativa facilidade de operação e expansão, além de permitir um esquema de proteção mais intuitivo e simples. Devido a sua grande utilização, a maioria das metodologias de síntese ou análise de sistemas de distribuição foca em sistemas com configurações radiais, o que também será realizado neste trabalho.

Atualmente, a questão de restabelecimento de energia em sistemas de distribuição, após situações de falhas que possuem quantidades de ocorrências consideráveis nestas redes, ainda não está totalmente definida, mesmo considerando suas características de arranjos radiais (o que poderia ser considerado como um fator facilitador), e devido a sua importância é de interesse para pesquisas.

1.2 Motivações

A grande maioria dos trabalhos sobre restauração e reconfiguração de redes elétricas de distribuição encontrados na literatura baseia-se em dados que não estão disponíveis com exatidão em todas as concessionárias, como por exemplo, os dados de impedância dos alimentadores, valores atuais do carregamento do sistema ou até mesmo condições ambientais.

Muitas vezes, na tentativa de mitigar a falta de informações precisas sobre os dados de alimentadores, são realizadas aproximações nos mesmos, como a utilização de valores de impedâncias típicas, porém algumas vezes estas aproximações terminam por inviabilizar a aplicação de metodologias mais complexas, seja devido a falta de precisão dos resultados, seja devido a dificuldade de aplicação na operação do sistema, ou ainda, uma combinação destes itens.

Em diversos trabalhos encontrados na literatura são propostos métodos para otimizar a restauração, conseguindo excelentes resultados, porém como muitos dos dados necessários para a aplicação destas metodologias não estão completamente disponíveis em todas as concessionárias, esta vantagem pode não ser realmente verificada na prática.

Por outro lado, existem algumas informações básicas, que toda concessionária tem, fáceis de obter, e que podem ser empregadas com razoável precisão para o auxílio ao restabelecimento dos sistemas após um defeito. Dentre estes dados destacam-se a posição dos equipamentos de proteção e seccionamento, tais como religadores e chaves, bem como a distância entre estes equipamentos.

Desta forma, é de grande interesse o desenvolvimento de metodologias que não sejam fortemente dependentes de dados elétricos das redes, que podem ser difíceis de obter, e ainda que sejam capazes de trabalhar com as incertezas inerentes aos sistemas de distribuição, como por exemplo, a variação do carregamento, ou que seus resultados não sejam tão dependentes dessas incertezas. Isto foi um motivador no desenvolvimento deste trabalho.

1.3 Revisão Bibliográfica

Na literatura existem vários trabalhos ligados à área de pesquisa considerada, onde os autores apresentam propostas diferentes das que serão apresentadas. Os principais trabalhos encontrados e estudados como base de conhecimento para o desenvolvimento do presente trabalho têm seus principais aspectos apresentados na sequência.

Em Civanlar (1988), os autores definem a reconfiguração de rede como uma alteração da topologia de um sistema pela alteração dos estados das chaves seccionadoras e dos religadores *tie* (disjuntores que interligam ramais diferentes). No trabalho é apresentado um esquema em que se utiliza da reconfiguração de rede para a reestruturação do alimentador primário para a redução das perdas.

Em Shirmohammadi (1989) uma técnica heurística é abordada onde é descrito um algoritmo para reconfiguração de redes de distribuição, de forma a reduzir as perdas diante da operação normal do sistema. Os autores afirmam que a abordagem proposta pode ser utilizada tanto no ambiente de planejamento como no de operação em tempo real do sistema.

Em Goswami (1992) os autores propõem um algoritmo heurístico baseado em técnicas de fluxo de potência para a determinação das mínimas perdas na configuração de um sistema radial. O algoritmo é baseado em fluxo de potência ótimo, que é

determinado pela solução de equações chamadas de *KVL* e *KCL* (leis de tensão e corrente de *Kirchhoff*, respectivamente).

Em Hsu (1993) os autores enfatizam a importância do impacto da reconfiguração de um sistema na coordenação dos equipamentos de proteção aplicados ao mesmo, pois caso ocorra uma mudança na topologia do sistema, equipamentos de proteção que eram de retaguarda podem atuar antes que os equipamentos de atuação em primeira instância. Porém a ênfase principal deste trabalho está baseada na ideia de ser impraticável realizar intensas operações de chaveamento (muitos chaveamentos) devido a limitações no número de chaveamentos que estão vinculados à expectativa de vida útil de cada chave, assim é necessário limitar tais reconfigurações a variações de carga que sejam mais duradouras.

Em Peponis (1995) os autores se baseiam em métodos heurísticos para reconfiguração de sistemas radiais de distribuição, tendo como objetivo a minimização das perdas resistivas na linha durante a operação, o balanceamento de carga e o alívio de sobrecargas durante os processos de restauração de serviço. É apresentada uma abordagem para o problema de balanceamento de carga, utilizando operações de chaveamento, e é apresentado também um algoritmo genético para a redução do tamanho do modelo da rede sem diminuição da exatidão computacional para todos os métodos.

Em Celli (1999), os autores afirmam que se tem feito um número cada vez maior de tentativas de restringir a duração das interrupções no serviço, e em geral tais tentativas incluem a introdução de chaves seccionadoras automáticas (ASSD's). Neste trabalho é proposto um procedimento que permite a determinação do número ótimo e a posição de dispositivos ASSD, tanto em redes radiais como malhadas. A princípio, os autores avaliaram a utilização de técnicas heurísticas para a resolução do problema proposto, porém considerou-se que tais técnicas não garantem a exatidão dos resultados, além de ser necessário um alto tempo computacional, podendo tornar-se inviável para sistemas reais e de grande porte. A fim de se obter a solução ótima, os autores fizeram uso do princípio da otimalidade de Bellmann (Kaufmann, 1972). Na prática, a aplicação do princípio de Bellmann leva a uma explosão combinatória, e isto torna impraticável sua utilização em redes de grande porte. Por isso, para cada instalação real existe um cálculo preliminar dos benefícios derivados da instalação de ASSD's, e com este novo método, o número de combinações é reduzido drasticamente. Segundo os autores o

algoritmo mostrou-se eficaz, com uma grande redução no custo final e um menor esforço computacional quando comparado a técnicas heurísticas de solução.

Em Teng (2002) os autores buscam o mesmo objetivo, o número e o posicionamento ótimo das chaves em um sistema, porém desta vez os autores propõem uma aproximação heurística em conjunto com uma enumeração simples.

A estratégia de solução de reconfiguração para minimização das perdas proposta em Augugliaro (2003) é dividida em duas fases, a primeira corresponde à fase fechada, e é definida pelo uso de redes neurais, e a segunda, definida como a fase aberta, é baseada em um algoritmo determinístico, que realiza a checagem local da existência de uma malha na configuração de rede obtida.

Radhia (2003) apresenta uma integração entre dois algoritmos, um deles baseado na topologia da rede (Teng, 2000), o qual explora a topologia da rede para obter a solução direta, e o outro usado para detecção das perdas de potência na rede de distribuição (Morton 2000), o qual segundo os autores é altamente eficiente pelo uso de técnicas que envolvem transformações semi-esparsas e pode ser aplicado para qualquer rede, possuindo vantagens sobre outros algoritmos existentes para reconfiguração de rede de modo que pode ser facilmente estendido para levar em conta fases desbalanceadas e restrições de operação de rede, porém mais detalhes sobre esta extensão não são mostrados no trabalho.

Um planejamento eficiente de um sistema de distribuição inclui, entre outros investimentos, a alocação ótima de chaves seccionadoras e dispositivos de proteção em pontos estratégicos do circuito de distribuição. Isto é o que os autores de Silva (2004) afirmam ao se referir a formas de impactar positivamente os índices de confiabilidade e melhorar o fornecimento de energia aos consumidores. Neste trabalho é proposto um modelo matemático baseado em um algoritmo genético de programação não linear inteira mista para o problema de alocação, em pontos estratégicos do sistema, de chaves seccionadoras e dispositivos de proteção, onde os custos de alocação estão relacionados ao investimento para a aquisição das chaves seccionadoras e/ou dos dispositivos de proteção.

Em Chao (2003) os autores propõem o uso de uma rede fuzzy de causa e efeito para realizar a restauração de sistemas de distribuição. Segundo este trabalho, o serviço de restauração envolve um complicado problema de otimização combinatória, devido ao grande número de possibilidades e soluções a serem avaliadas pelos operadores. Como as necessidades de operações e as regras heurísticas frequentemente são expressas em

termos imprecisos, incomuns em linguagens de programação mais convencionais, a rede fuzzy de causa e efeito (FCE) construída pelos autores torna-se uma ferramenta útil para a resolução do problema, segundo os mesmos.

Em Venkatesh (2004) é apresentado um novo método para reconfiguração ótima de sistemas radiais de distribuição. Devido a característica discreta do espaço de soluções, uma adaptação *fuzzy* de um algoritmo evolucionário foi utilizada pelos autores para a reconfiguração ótima, com o intuito de aumentar a capacidade de carregamento do sistema. Como teste foi utilizado um sistema de 33 barras.

Em Gomes (2005) os autores propõem um algoritmo que se utiliza de uma estratégia heurística que inicia com o sistema em um estado malhado, com todas as chaves seccionadoras fechadas. A escolha de quais chaves serão abertas é baseada no cálculo das menores perdas totais do sistema (utilizando um fluxo de potência)..

Em Gomes (2006), os autores apresentam uma nova abordagem para a reconfiguração de sistemas de distribuição baseada em fluxo de potência, onde o estado das chaves é representado por funções contínuas. Todos os ramos são iniciados considerando as chaves fechadas, e após o fluxo de potência ótimo, uma técnica heurística é utilizada para determinar o próximo *loop* a ser desfeito pela abertura de uma nova chave. Após isto, a lista de chaves candidatas a serem abertas é então atualizada e o processo se repete até que todos os caminhos fechados sejam abertos, tornando o sistema radial.

De forma a buscar melhorar a confiabilidade de seu serviço a CFEMC (Coweta-Fayette Electric Membership Corporation, uma distribuidora responsável por servir os condados de Coweta e Fayette e partes de outros seis condados no EUA) começou a explorar a possibilidade de implementar um sistema automático de reconfiguração de rede em um projeto piloto. O primeiro passo foi a escolha da parte do sistema à qual deveria ser aplicado tal sistema, de forma a tornar maior possível o impacto positivo no ganho de confiabilidade da rede. Ao fim dos estudos foram escolhidos dois alimentadores de diferentes subestações separados por um ponto de chaveamento já existente, isso devido principalmente por serem alimentadores próximos a muitos estabelecimentos comerciais onde uma diminuição do tempo de realocação de rede seria mais vantajosa. Os resultados deste projeto estão mostrados em Hataway (2006), onde religadores foram adicionados ao sistema além de uma rede de comunicação em fibra ótica.

Em Javadian (2009) é proposta a utilização de um esquema de proteção baseado em um sistema IED e uma estrutura computacional instalada na subestação de subtransmissão. O relé determina o estado do sistema após receber a informação requerida do mesmo e no caso de uma falta ele realiza um diagnóstico e localiza a mesma através de uma rede neural MLP, e finalmente envia os comandos necessários para mitigar a falta. Os autores optaram por dividir o sistema em zonas, sendo que cada zona pode ser composta por uma ou mais gerações dispersas e uma carga (a qual a geração dispersa desta mesma área deve ser capaz de suprir sozinha). Para preparar o banco de dados para o treinamento da rede neural, todos os tipos de falta no sistema a cada 50 m de linha e com impedância de 0, 50, 100 e 150 ohms foram simuladas. Segundo os autores, os resultados enfatizam que, pelo método de reconfiguração sugerido, é possível utilizar de forma correta a capacidade de geração dos geradores dispersos.

O estudo realizado em Akduman. (2010) propõe uma solução eficiente e factível baseada em algoritmos evolucionários para o problema de restauração em sistemas de distribuição. Segundo os autores, uma vez que a região em falta é isolada, dentro de um sistema de distribuição, existe um grande número de cargas que podem ser restauradas pela correta tomada de decisão na operação de chaveamentos nesta rede, sem que as restrições de operação sejam violadas.

Em Luo (2011) os autores apresentam um algoritmo híbrido baseado em algoritmos bio-inspirados, mais precisamente no algoritmo de colônia de formigas (ACO) e no de enxame de partículas (PSO). O objetivo da reconfiguração da rede inclui a diminuição das perdas (objetivo principal), balanceamento da carga, aumento na qualidade de tensão e a confiabilidade no suprimento.

Em Yann (2011) é apresentada uma rede neural baseada em uma otimização radial básica (RBF) para a restauração de sistemas de distribuição sob diferentes níveis de carregamento. O esquema proposto é dividido em duas etapas, a primeira compreende a criação das informações para o treinamento da rede e a segunda etapa compreende a construção da rede. Na primeira etapa é utilizada uma rede heurística baseada em inferência (fuzzy) para a construção dos planos de restauração frente a cada um dos níveis de carregamento pré-definidos. Uma vez que a rede é construída de forma correta, a restauração desejada pode então ser realizada logo que as informações forem recebidas do sistema em falta.

Os autores de Cui (2012) se utilizam de uma rotina baseada no algoritmo bio-inspirado de enxame de partículas, onde uma partícula representa uma solução em potencial. Cada partícula se move numa direção específica e em uma velocidade de forma a encontrar uma solução melhor que a anterior. Esta solução é a reconfiguração ótima do sistema com menores perdas, para que o mesmo opere sempre em uma topologia radial e as partículas são formadas pelo número das chaves abertas selecionadas.

Em Cavalcante (2013) os autores buscam incluir características do sistema da CEMIG-D, tais como redes extensas e bastante ramificadas, grande extensão de alimentadores rurais e alimentadores com diversos tipos de consumidores, dentre eles residenciais, comerciais e industriais em um projeto referente à automação da distribuição. A proposta do projeto de P&D ANEEL abordado neste trabalho é desenvolver uma ferramenta de reconfiguração automática da rede elétrica que será aplicada e adaptada às necessidades da rede de distribuição de energia elétrica da CEMIG-D. Matematicamente o modelo utilizado pelos autores é um problema de programação linear de natureza inteira mista. Dois algoritmos foram utilizados, um baseado em Busca Tabu e outro sendo o Branch Exchange (Martin, 2008), sendo o primeiro com a finalidade de sair dos ótimos locais encontrados com o segundo.

Muitos dos trabalhos apresentados nesta revisão possuem os mesmos objetivos, porém utilizam estruturas computacionais diferentes, podendo utilizar programações heurísticas baseadas em algoritmos bio-inspirados e/ou algoritmos evolucionários ou ainda baseados em redes de aprendizado, como redes neurais, para determinar a melhor forma de alocar chaves e/ou reconfigurar um determinado sistema elétrico, dentre outras técnicas. É importante frisar que as técnicas bio-inspiradas não garantem a otimalidade do processo e, dependendo do tamanho do respectivo sistema, podem requerer altos tempos computacionais para chegar a um resultado satisfatório, o que na prática, pode tornar inviável sua utilização em tempo real frente a uma contingência, não sendo capaz de realizar a reconfiguração e reenergização, ou seja, o restabelecimento de cargas, antes dos limites de tempo estabelecidos pelos órgãos fiscalizadores dos índices de continuidade e interrupção de serviço ao consumidor.

1.4 Objetivos do Trabalho

Observando as necessidades das concessionárias e não encontrando uma solução desta natureza em trabalhos da literatura, tem-se como objetivo neste trabalho desenvolver uma metodologia, e implementá-la em um algoritmo computacional, que após a detecção e a localização de um defeito na rede, seja capaz de restaurar um sistema elétrico radial de forma rápida (em tempo hábil para que índices de desempenho da concessionária não sejam afetados de acordo com a normatização ANEEL). E ainda, reenergizando o máximo de cargas possível, podendo considerar cargas prioritárias, e obedecendo a restrições técnicas da rede. Para tanto, na restauração proposta neste trabalho serão consideradas apenas a operação de chaves telecomandadas, pois um dos objetivos é manter os índices de desempenho dos sistemas de distribuição dentro dos limites estipulados.

Considera-se que o diferencial deste trabalho está em que o algoritmo atuará utilizando apenas informações facilmente obtidas pelas concessionárias, quer sejam as condições de estados das chaves e dos religadores do sistema e dados de tensão e corrente pré-falta e pós-falta dos equipamentos de medição do sistema, não havendo a necessidade de conhecer outras características, por exemplo, os valores das impedâncias das redes do sistema ou dados detalhados das cargas. Para a aplicação da metodologia proposta também é necessário conhecer a topologia simplificada do sistema, que será explicada em detalhes na seção 2.2.1. Esta topologia simplificada consiste basicamente em ligações entre os dispositivos de manobra do sistema.

O algoritmo será implementado utilizando o software Matlab[®] e não serão utilizadas técnicas ou processos que consomem considerável tempo computacional, tais como técnicas evolutivas, pois o principal objetivo é desenvolver uma metodologia que apresente uma solução viável em tempo menor que um minuto de processamento computacional, considerando o ponto de funcionamento atual do sistema de distribuição. O motivo da consideração deste tempo reduzido para o processamento é conceber uma metodologia que possa auxiliar a distribuidora a atender as exigências da ANEEL em relação aos índices de FEC, FIC, DEC, DIC e DMIC. Para que estes índices não sejam impactados na ocorrência de um defeito, as cargas, passíveis de uma rápida restauração, só podem ficar desenergizadas por tempos inferiores a 3 minutos. Assim, considerou-se previamente para a metodologia proposta que o processamento computacional para a obtenção da indicação do procedimento de restauração levasse no

máximo um minuto. Pois, os outros dois minutos seriam reservados para obtenção dos dados, tratamento dos dados e posterior (após o emprego da metodologia) envio dos comandos para abertura/fechamento de religadores e chaves telecomandadas, informando ao usuário quais trechos poderão ser reenergizados respeitando os limites de carregamento dos alimentadores e ramais.

O algoritmo também é capaz de identificar as conexões com outros alimentadores no sistema de distribuição e determinar quais destes são viáveis para serem considerados para a restauração das cargas, e a partir do momento que encontre possíveis soluções, determina quais soluções dentre as existentes permitirá a restauração ótima do sistema de acordo com os critérios pré-determinados pelo usuário.

Ressalta-se novamente que apenas as chaves e religadores telecomandados serão consideradas neste trabalho, devido aos critérios de tempos necessários para a reconfiguração e restauração do sistema de distribuição, sem impactos negativos nos índices de desempenho. Porém, uma restauração do sistema utilizando também as chaves manuais pode e deve ser rodada em uma segunda etapa, mas não é o objetivo principal deste trabalho. Isto se deve ao fato que a operação de uma única chave manual usualmente demanda um tempo superior a três minutos, não atendendo as necessidades da proposição da metodologia.

Outro ponto importante a ser observado é que o objetivo deste trabalho não consiste em realizar uma enumeração exaustiva, onde, por exemplo, todas as possibilidades de chaveamento são analisadas e em cada uma delas é analisado se houve a criação de uma malha indesejada no sistema. Tal método, de enumeração exaustiva, tem a tendência de criar uma explosão combinatória à medida que o sistema em estudo aumenta, tanto em tamanho de trechos como também em número de dispositivos de seccionamento presentes, tornando inviável a rápida obtenção de uma rede restaurada e radial, influenciando diretamente e negativamente os índices de desempenho da concessionária e impedindo que uma ação rápida de restauração de parte da rede seja realizada quando possível, frente a uma falta em algum ponto da mesma.

Ao invés de analisar todas as possíveis soluções, o algoritmo definirá espaços limitados de busca, nas regiões próximas ao ponto onde a respectiva falta for detectada, e nesta região irá verificar as possibilidades de restauração da maior parte do sistema, caso a mesma seja possível, obviamente, caracterizando assim uma varredura direcionada.

1.5 Publicações Relacionadas ao Trabalho

RODRIGUES, J. M., PENIDO, D. R. R., ARAUJO, L. R., “Algoritmo para Reconfiguração de Sistemas Elétricos em Caso de Falhas Considerando Incertezas dos Parâmetros Elétricos”, *XII Congreso Interamericano de Computación Aplicada a la Industria de Procesos*, Cartagena, Bolívar, Colômbia, Setembro, 2015.

RODRIGUES, J. M., PENIDO, D. R. R., ARAUJO, L. R. , SANTOS, R. V. D., “Algoritmo para Restauração de Sistemas Elétricos em Caso de Defeitos Considerando Déficit de Informações dos Parâmetros Elétricos da Rede”, *The XI Latin-American Congress Electricity Generation and Transmission – CLAGTEE, "Bioenergy for Electricity Generation and Ecological Issues in Power Plants"*, São José dos Campos, São Paulo, Brasil, Novembro 2015.

1.6 Estrutura do Trabalho

Este trabalho é composto de quatro capítulos, incluindo este de introdução.

O segundo capítulo diz respeito à metodologia e modelos, apresentando a estrutura básica do algoritmo, detalhando cada etapa do mesmo e explicando cada uma das estruturas internas, com seus processos locais dentro do processo global. Por fim, serão apresentadas as conclusões do capítulo, finalizando a explicação do algoritmo.

No terceiro capítulo são apresentadas simulações realizadas com o intuito de comprovar a eficácia e a robustez do algoritmo frente a diferentes sistemas.

O quarto capítulo corresponde às conclusões do trabalho como um todo, apresentando quais características foram observadas nas simulações realizadas e qual foi o desempenho geral da metodologia. Por fim, são apresentados os planos de trabalhos futuros.

1.7 Convenções e Nomenclaturas Utilizadas

Apresenta-se nesta seção algumas convenções e nomenclaturas utilizadas neste trabalho, com o objetivo de facilitar a leitura e evitar possíveis interpretações errôneas.

Na Tabela 1.1 é apresentada a convenção utilizada para distinção dos tipos de variáveis:

Tabela 1.1-Convenções adotadas para escrita de variáveis

Tipo da variável	Tipo de escrita	Exemplo
Escalar Real	Minúscula em itálico	x
Escalar Complexo	Maiúscula em itálico	X

Na Tabela 1.2 apresenta-se os símbolos utilizados para designar funções ou operações, com seus respectivos significados.

Tabela 1.2-Convenções adotadas para funções e operações

Símbolo	Exemplo	Significado
* sobrescrito	X^*	Conjugado do complexo X

A seguir, na Tabela 1.3, são mostrados os símbolos mais frequentes utilizados para designar variáveis, grandezas ou entidades matemáticas.

Tabela 1.3-Convenções adotadas para designar grandezas e variáveis

Símbolo	Exemplo	Significado
j	j	Complexo unitário, igual a uma das raízes quadradas de -1 (a raiz positiva), ou seja, $j = +\sqrt{-1}$
θ	θ	Ângulo em radianos
φ	φ	Ângulo de defasagem em radianos (transformadores defasadores)
V_{km}	V_{km}	Tensão entre os nós k e m
I_{km}	I_{km}	Contribuição de injeção de corrente de elemento conectado entre os nós k e m , corrente no sentido saindo do nó k
P	P	Potência ativa
Q	Q	Potência reativa
S	S	Potência aparente ou complexa ($S=P+jQ$)

Neste trabalho serão utilizados os termos “trecho” ou “ramo” para denotar qualquer ponto do sistema elétrico onde se possa determinar a tensão elétrica e/ou a corrente. Já o termo “barra” será utilizado de uma maneira mais geral, para representar, por exemplo, um ou mais postes, no sistema de distribuição. Estas barras irão delimitar os “trechos” ou “ramos”. Na metodologia proposta, não há impacto na operação do algoritmo a equivalência de um único poste ou um conjunto destes como uma única “barra elétrica”, uma vez que o algoritmo é preparado para trabalhar com sistemas de qualquer número de barras. A única influência observada é com relação ao tempo computacional, uma vez que sistemas com um elevado número de barras separadas tendem a requerer um tempo computacional maior.

A Figura 1.1 e a Figura 1.2 ajudam a exemplificar como foi considerada a equivalência de um conjunto de vários postes como uma única “barra elétrica”. Entre postes próximos os níveis de tensão tendem a ser muito próximos uns aos outros, logo é possível realizar a equivalência destas estruturas em outra equivalente, chamada no trabalho de uma barra elétrica.

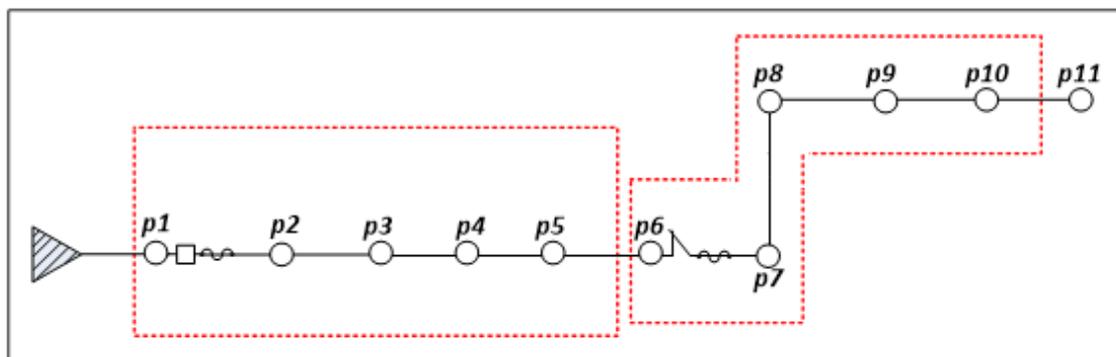


Figura 1.1 – Sistema de distribuição primária com os postes representados

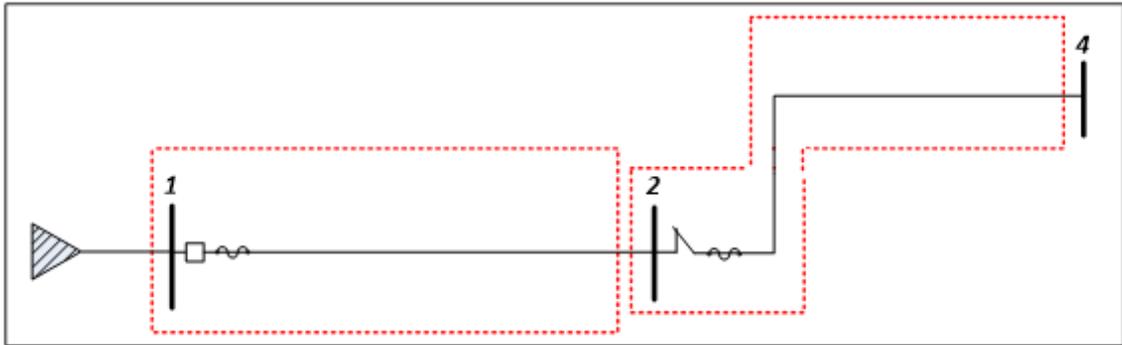


Figura 1.2 – Esquema reduzido do mesmo sistema de distribuição da Figura 1.1

A Figura 1.1 mostra um trecho de um alimentador de distribuição primário, onde os postes (p1, p2, p3,...) estão representados individualizadamente. A Figura 1.2 mostra o sistema reduzido equivalente ao sistema da Figura 1.1, com a representação das barras elétricas.

Capítulo 2 Metodologia e Modelos

2.1 Introdução

Os estudos de restauração de sistemas de distribuição vêm ganhando grande importância, pois existe uma grande pressão dos órgãos reguladores em aumentar a confiabilidade de sistemas e uma das políticas bastante utilizada é a redução contínua dos valores aceitáveis de tempo de interrupção. Para efeito de informação, atualmente o valor máximo do DIC para um consumidor urbano conectado à subestação Juiz de Fora 2 é de 17,91 horas anuais e 4,47 horas mensais. Já para a FIC os valores são 12,45 interrupções anuais e 3,11 interrupções mensais, e estes valores deverão ser reduzidos nos próximos anos. Indica-se ainda que estes índices são apurados apenas para as interrupções com durações maiores que 3 minutos. Deste modo é de grande interesse a definição de metodologias para auxílio na redução dos índices relativos à continuidade de serviço, entre eles o DEC, FEC, DIC e FIC, devido aos impactos de desenergizações proveniente de falhas.

Existem diversas alternativas que buscam adequar os sistemas de distribuição aos índices exigidos pelos reguladores. Atualmente os principais esforços das concessionárias estão na identificação e mitigação de pontos problemáticos na rede, geralmente com troca de equipamentos e/ou estratégias de chaveamento de equipamentos de manobra para restaurar partes do sistema que podem ser isoladas dos defeitos (não tendo assim suas parcelas de índices correspondentes afetados) em tempos reduzidos, preferencialmente em um tempo menor do que 3 minutos. Logo, neste trabalho é proposta uma metodologia para chaveamento de dispositivos de manobra de redes de distribuição considerando somente dados de fácil obtenção pelas concessionárias e tendo como objetivo a restauração do sistema de distribuição, em tempo hábil.

Neste capítulo será explicada, de forma detalhada, a metodologia proposta, e os algoritmos utilizados para respeitar as restrições técnicas (limites de tensões em barramentos e de potência/corrente em alimentadores e ramais) e manter o sistema em uma configuração radial. A entrada de dados é composta basicamente de informações

de estimativa de carregamento por áreas (provenientes de medições de transformadores de instrumentos) e da disposição física dos equipamentos de manobra do sistema.

2.2 Metodologia Proposta

A metodologia proposta foi implementada computacionalmente, e seu algoritmo correspondente será apresentado nesta seção. O fluxograma apresentado na Figura 2.1 mostra as principais etapas do algoritmo proposto. São ao todo seis etapas principais que serão apresentadas de forma mais sucinta nesta seção e de uma forma mais detalhada nas seções posteriores.

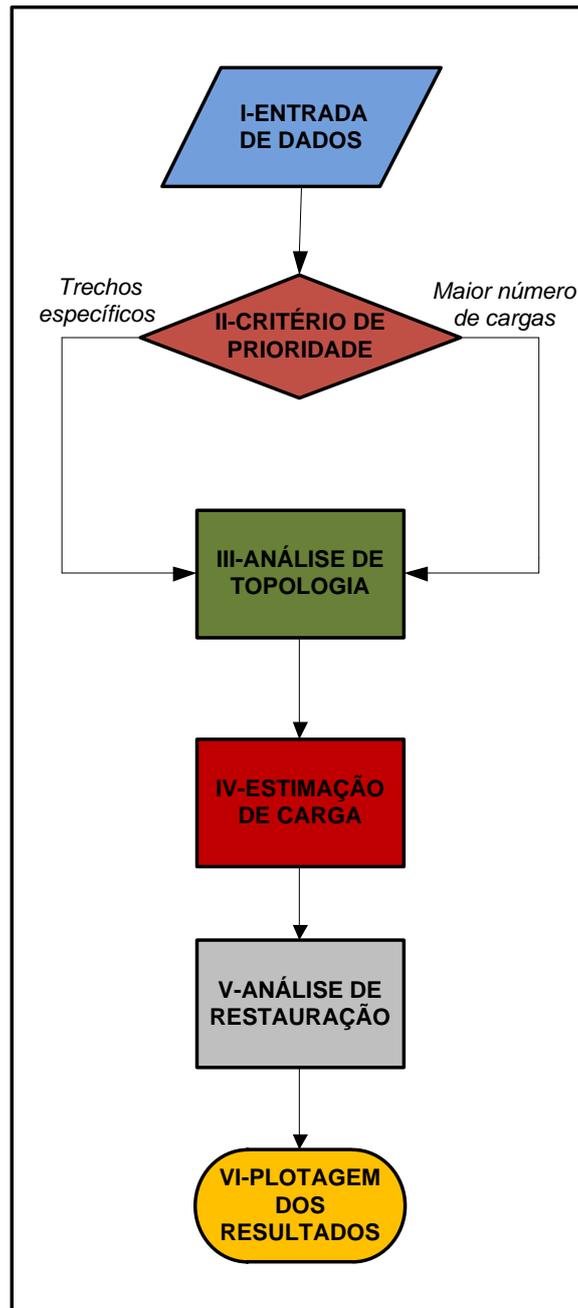


Figura 2.1 - Fluxograma das etapas gerais de operação do algoritmo

ETAPA I: A primeira etapa do algoritmo proposto corresponde à informação topológica dos alimentadores e da entrada dos dados de medições (tensões e correntes). Os dados topológicos do sistema elétrico são introduzidos com uma formatação específica através de arquivos em formato texto. Os dados elétricos provenientes dos equipamentos de medição são fornecidos também em formato de arquivo texto e são identificados para serem relacionados aos dados topológicos.

ETAPA II: Na segunda etapa é definido o critério de prioridade do algoritmo: considerar a reenergização de barras prioritárias ou o maior número de barras no sistema.

ETAPA III: A etapa três corresponde à análise de topologia. Nesta etapa são montadas as estruturas fundamentais do algoritmo, aqui nomeadas como Lista de Sequência de Rede e Matriz dos Trechos de Rede, as quais serão definidas com mais detalhes em próximas seções.

ETAPA IV: Nesta etapa é realizada uma estimativa de carregamento do sistema. Tal processo se dá pela utilização de medidas de corrente e tensão do sistema provenientes de dispositivos com capacidade de medição de grandezas elétricas e/ou transformadores de instrumentos. Ressalta-se que os valores obtidos serão aproximados, uma vez que alguns equipamentos não medem a diferença angular entre corrente e tensão, e outras vezes existem apenas a medição da corrente. Esta situação dos dados práticos será considerada na metodologia.

ETAPA V: Após todas as estimativas realizadas e as estruturas fundamentais construídas, o algoritmo proposto realiza diversas varreduras no sistema para definir quais ações devem ser tomadas de forma a reenergizar as cargas durante a restauração da rede.

ETAPA VI: Por fim, todas as ações tomadas são impressas e informadas ao usuário/controlador.

2.2.1 Entrada de Dados

A estrutura do arquivo de entrada de dados topológicos foi baseada nos dados de entrada padrão de programas de análise de fluxo de potência, identificando as barras “DE” e “PARA” de cada um dos trechos do sistema (um trecho é um conjunto de cabos, postes, cargas e equipamentos conforme explicado no capítulo 1). Porém, ao invés dos dados elétricos do sistema, os dados inseridos são relativos à topologia do mesmo. A Tabela 2.1 e a Tabela 2.2 mostram como os dados são organizados para o alimentador apresentado na Figura 2.2.

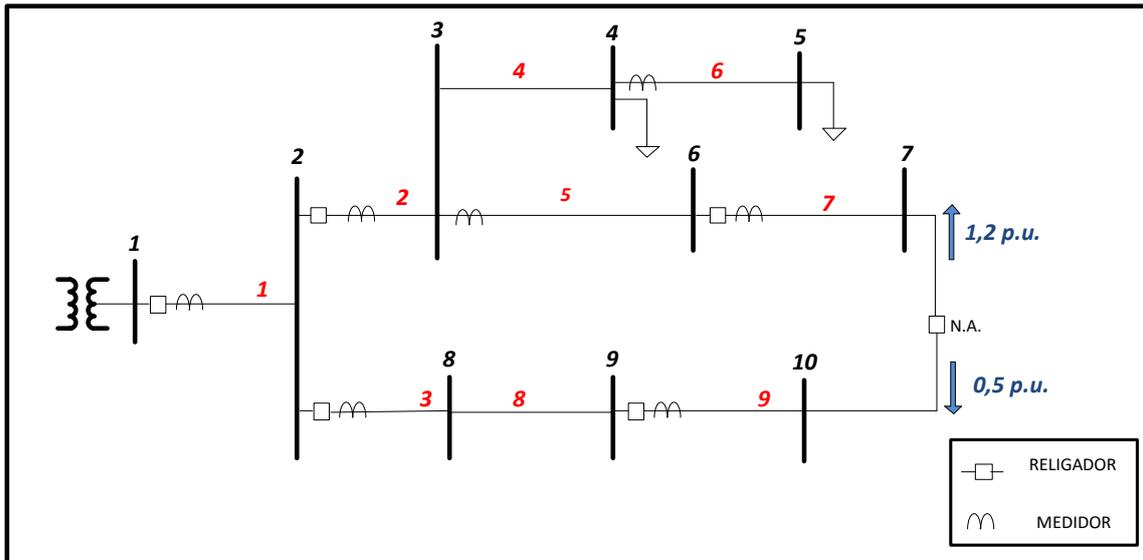


Figura 2.2 – Sistema teste 10 barras

As colunas “DE” e “PARA”, na Tabela 2.1, correspondem às barras do sistema de um determinado trecho.

As colunas “MEDIÇÃO”, “RELIGADOR” e “CHAVE” indicam se o trecho em questão possui os seguintes equipamentos:

- **MEDIÇÃO:** Equipamentos de medição de grandezas elétricas, tais como transformadores de corrente e/ou potencial e/ou equipamentos com características de medição, como alguns tipos de chaves telecomandadas.
- **RELIGADOR:** Equipamento de seccionamento sob carga e curto-circuito.
- **CHAVE:** Equipamento de seccionamento que não pode ser aberto sob curto-circuito, mas pode ser aberto sob carga em alguns casos.

As colunas CHAVE e RELIGADOR indicam apenas as chaves normalmente fechadas (NF), e apenas os equipamentos telecomandados são representados (conforme motivo explicado no capítulo de introdução deste trabalho). Os trechos com dispositivos de seccionamento normalmente abertos (NA) são representados na Tabela 2.2.

Ainda na Tabela 2.1, a coluna PRIORIDADE indica quais as barras do respectivo sistema possuem cargas prioritárias, ou seja, cargas que devem reenergizadas sempre que possível frente a uma contingência no sistema. Foi definido que a prioridade de barras em uma determinada linha será sempre atribuída à barra “PARA”. Como exemplo, tem-se que a barra 7 (barra “PARA” da linha 7 da Tabela 2.1) no sistema da Figura 2.2 é uma barra prioritária, e caso seja definido pelo usuário tal critério (de

energização de barras prioritárias) esta barra deverá ser reenergizada sempre que possível, ainda que isto custe a não reenergização de outras barras no sistema. Todo este processo será melhor explicado em seções posteriores.

Tabela 2.1 – Estrutura de entrada de dados para topologia, medição e disposição de dispositivos de seccionamento NF.

DE	PARA	PRIORIDADE	RELIGADOR	CHAVE	MEDIÇÃO
1	2	0	1	0	1
2	3	0	1	0	1
2	8	0	1	0	1
3	4	0	0	0	0
3	6	0	0	0	1
4	5	0	0	0	1
6	7	1	1	0	1
8	9	0	0	0	0
9	10	0	1	0	1

A Tabela 2.2 apresenta os dispositivos de seccionamento para interconexões, que são religadores ou chaves normalmente abertas (que serão chamadas de conexões), compondo outra estrutura de armazenamento de dados. A coluna INDICADOR CONEXÃO indica quantas conexões existem em determinada barra do sistema (considerando novamente as barras “PARA” da respectiva linha) com outros ramais. A coluna BARRA CONEXÃO 1 indica qual é a outra barra do sistema na qual a barra “PARA” da respectiva linha está ligada pela conexão.

No exemplo mostrado na Figura 2.2 observa-se que existe uma conexão entre as barras 7 e 10, podendo assim ser usada para uma possível realocação de cargas. Isso é representado nas linhas 7 e 9 da Tabela 2.2. Note que devem ser informadas as conexões nas duas extremidades. No caso de existir mais de uma conexão em uma mesma barra, outras colunas devem ser criadas e preenchidas com as respectivas barras para as quais há conexão, como por exemplo, BARRA CONEXÃO 2, BARRA CONEXÃO 3, e assim sucessivamente, de acordo com o número de conexões existentes na respectiva barra “PARA”.

Tabela 2.2 – Estrutura de dados para o exemplo de dispositivos de seccionamento NA.

DE	PARA	INDICADOR CONEXÃO	BARRA CONEXÃO1	MAX. CARGA1(p.u.)
1	2	0	0	0
2	3	0	0	0
2	8	0	0	0
3	4	0	0	0
3	6	0	0	0
4	5	0	0	0
6	7	1	10	1.2
8	9	0	0	0
9	10	1	7	0.5

Na coluna MAX. CARGA 1 (p.u.) é indicada a capacidade máxima de carregamento, em p.u., que pode ser estabelecida pela respectiva conexão existente. No caso exemplo, temos a informação entre as barras 7 e 10 do sistema da Figura 2.2. Novamente, salienta-se que no caso de mais de uma conexão, outras colunas (MAX. CARGA 2, MAX. CARGA 3, etc.) são inseridas, cada uma com o respectivo valor do máximo de carregamento suportado pela respectiva conexão. Ressalta-se que neste trabalho estes valores serão considerados fixos, uma variação destes valores durante o processo de restauração é uma indicação de trabalho futuro.

Na Tabela 2.2, o limite de transferência de potência da conexão entre as barras 7 e 10 é dividido em duas partes, cada uma representando a máxima potência extra que pode ser suprida pelo outro ramal. Este valor pode ser atualizado durante o processo como sendo a potência máxima do alimentador menos a potência calculada pela cargas. Indica-se que o cálculo da potência consumida pela carga é aproximado devido a problemas relacionados as medições, deste modo um fator de segurança de 10% em relação a potência calculada é utilizado.

Deste modo, na Tabela 2.2 observa-se que o limite de transferência de potência para o trecho entre as barras 6 e 7 está em 1,2 p.u., ou seja, 1,2 p.u. é a máxima carga que pode ser transferida no sentido da barra 10 para a barra 7 por limitação da potência máxima de alimentador, conforme indicado pelas setas em azul na Figura 2.2. O oposto também é válido, onde o valor 0,5 p.u. representa a máxima carga extra que pode ser

transferida no sentido da barra 7 para a barra 10, como novamente mostrado na Figura 2.2.

Todos os dados apresentados anteriormente são relativos à estrutura topológica da rede elétrica, porém ainda são necessários dados adicionais relativos às medições realizadas pelos transformadores de instrumentos e/ou outros dispositivos capazes de realizar medições instalados na rede. Tais dados correspondem às correntes e tensões medidas pelos equipamentos.

Na Tabela 2.3 é apresentada a estrutura de dados para informar se determinado equipamento detectou uma corrente de falta. A metodologia para identificação da falta por determinado equipamento de medição não será discutida neste trabalho, seu resultado será apenas utilizado. Na coluna CORRENTE FALTA indica-se quais medidores que detectaram uma corrente com níveis de falta, no exemplo para uma falta ocorrente no trecho 6 (entre as barras 4 e 5) da Figura 2.2 (indicado em vermelho). Este processo será melhor explicado em seções à frente.

Tabela 2.3 – Estrutura de informações de detecção de correntes de falta

DE	PARA	CORRENTE FALTA
1	2	1
2	3	1
2	8	0
3	4	0
3	6	0
4	5	1
6	7	0
8	9	0
9	10	0

2.2.2 Critérios de Prioridade

Nesta etapa é verificado qual critério de prioridade será utilizado na restauração. Neste trabalho dois critérios são modelados: o critério de prioridade de barras e o critério de maior número de barras reenergizadas.

Conforme o critério escolhido, o algoritmo irá operar de forma distinta na reenergização do sistema em uma situação pós falta, quando o trecho em falta estiver isolado do restante do sistema.

Caso o usuário adote o critério de maior número de barras reenergizadas, o algoritmo proposto irá agir de forma a garantir que o maior número de barras desenergizadas seja restaurado, de acordo com os limites do próprio sistema.

Por outro lado, caso o usuário decida por utilizar o critério de barras prioritárias no sistema, ele deverá informar quais barras devem ser priorizadas na reenergização conforme indicado na Tabela 2.2 e irá operar de forma a garantir que o maior número possível destas barras prioritárias sejam reenergizadas, sacrificando assim, caso seja necessário, outras possíveis reenergizações das barras restantes do sistema.

2.2.3 Análise de Topologia

A próxima etapa do algoritmo, chamada Análise de Topologia, consiste na análise das características físicas do sistema.

Neste submódulo estão localizadas duas estruturas essenciais, que podem ser consideradas como o núcleo de todo o algoritmo, as chamadas: Lista de Sequência de Rede e a Matriz dos Trechos de Rede. A Figura 2.3 mostra o fluxograma dos dois módulos que estão contidos dentro da etapa três do fluxograma principal mostrado na Figura 2.1.

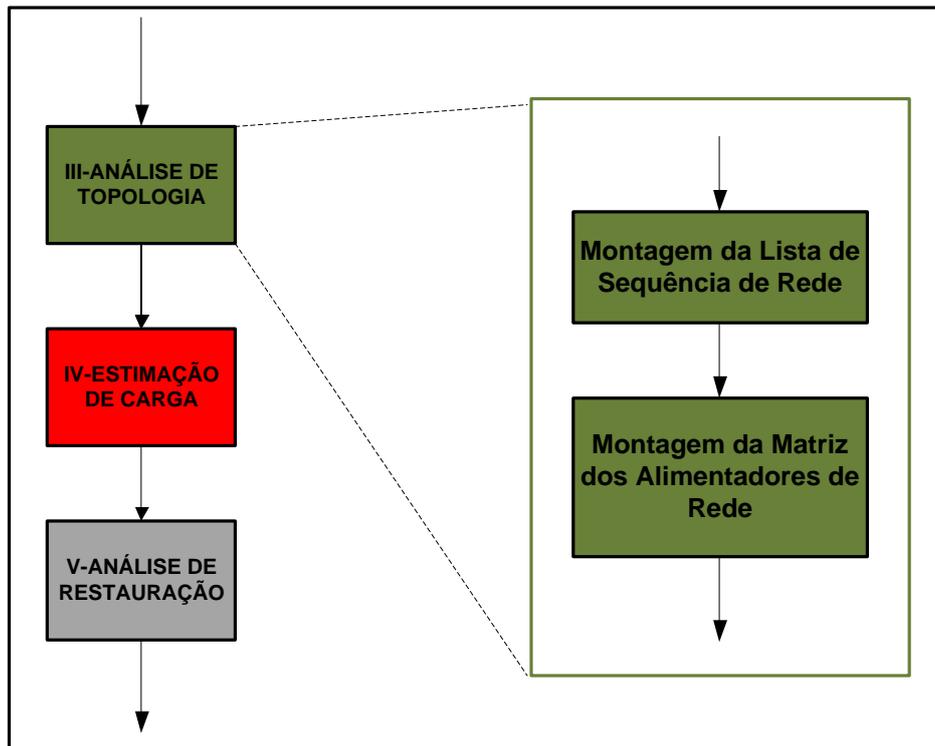


Figura 2.3 – Submódulos contidos na etapa de análise de topologia

A Lista de Sequência de Rede é a matriz onde são armazenadas todas as informações referentes à topologia do sistema e de como as barras estão dispostas, informando quais são os ramais existentes e quais as barras que se sucedem ou procedem umas as outras (com relação a ligações). A ideia por trás da criação desta estrutura fundamenta-se nos conceitos referentes ao assunto de esparsidade de matrizes no tocante ao que é usado para resolução de fluxos de potência.

Na prática, em um sistema de distribuição radial, a ideia de esparsidade está muito presente, pois a interconexão entre as barras não é plena, ou seja, a maioria das barras se interliga apenas com barras adjacentes, isso devido principalmente à topologia radial do sistema.

Sendo assim, a mesma ideia de *Lista Encadeada* é então utilizada para organizar os dados de topologia do sistema, ou seja, para criar uma estrutura onde: são numerados todos os trechos do sistema, são definidos quais trechos possuem dispositivos de seccionamento (chaves ou religadores) e quais os trechos que são os últimos de cada ramal.

A diferença entre a *Lista Encadeada* e a Lista de Sequência de Rede reside no fato de que a *Lista Encadeada* apresenta somente os números contidos nas posições de uma

matriz esparsa, enquanto que a Lista de Sequência de Rede apresenta os índices de cada um dos trechos do sistema, com as respectivas barras que delimitam tais trechos.

A Tabela 2.4 mostra a Lista de Sequência de Rede montada pelo algoritmo para o sistema da Figura 2.2.

Tabela 2.4 – Lista de Sequência de Rede

<i>TRECHO</i>	<i>DE</i>	<i>PARA</i>	<i>RELIGADOR</i>	<i>CHAVE</i>	<i>BACK</i>	<i>LAST</i>
1	1	2	1	0	0	0
2	2	3	1	0	1	0
3	2	8	1	0	1	0
4	3	4	0	0	2	0
5	3	6	0	0	2	0
6	4	5	0	0	4	1
7	6	7	1	0	5	1
8	8	9	0	0	3	0
9	9	10	1	0	8	1

As colunas DE, PARA, RELIGADOR e CHAVE são idênticas ao explanado na Tabela 2.1. A coluna TRECHO (que na Figura 2.2 corresponde aos índices em vermelho acima de cada ramo) indica a numeração de trechos que o próprio algoritmo adiciona ao sistema, tomando como base as barras DE para a numeração crescente (logo a entrada de dados deve seguir a ordem crescente tomando como base as barras “DE” de cada trecho).

Já a coluna BACK indica qual trecho está imediatamente antes do respectivo trecho indicado na linha. O trecho entre as barras 1 e 2 é o primeiro trecho deste sistema, logo recebe o índice “0” na coluna BACK (por não ter nenhum outro trecho a montante dele). Por fim, a coluna LAST apenas indica quais trechos são os últimos de cada ramal, recebendo índice 1.

Após criada a Lista de Sequência de Rede é realizada a montagem de outra estrutura, definida como a Matriz dos Trechos da Rede.

A Matriz dos Trechos da Rede que representa o sistema da Figura 2.2 é apresentada na Tabela 2.5 e cada linha é composta por um conjunto de trechos que interliga desde a subestação ao último trecho do alimentador. O número de linhas da Matriz dos Trechos da Rede é igual ao número de barras terminais. Os números de cada

trecho são indicados em vermelho na Figura 2.2 e a partir desta matriz todas as varreduras que serão realizadas no sistema, explicadas nas subseções à frente, serão possíveis. Esta é uma estrutura relativamente simples para este sistema, mas que torna viáveis todas as análises posteriores, e que pode se tornar bem grande e complexa caso o sistema possua muitas ramificações.

Tabela 2.5 – Estrutura da Matriz dos Trechos da Rede

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>4</i>	<i>6</i>
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>5</i>	<i>7</i>
<i>1</i>	<i>3</i>	<i>8</i>	<i>9</i>

A Matriz dos Trechos da Rede é criada seguindo a organização dos dados na Lista de Sequência de Rede. O algoritmo passa a percorrer as linhas desta lista de forma a encontrar os últimos trechos de cada ramal e após encontrá-los, percorre novamente a Lista de Sequência de Rede até encontrar o trecho inicial do respectivo alimentador, armazenando tais trechos na ordem correta. Desta forma, uma vez montada a Lista de Sequência de Rede, a montagem da Matriz de Trechos da Rede se torna uma tarefa que exige pouco tempo computacional.

Caso alguns dos alimentadores do sistema tiver números de ramais diferentes dos demais alimentadores, as posições que não identificam os ramais serão preenchidos por zero, no início de cada linha da Matriz dos Trechos de Rede.

O fluxograma mostrado na Figura 2.4 ajuda a explicar o funcionamento da parte do algoritmo responsável pela montagem da Matriz dos Trechos da Rede a partir da Lista de Sequência de Rede.

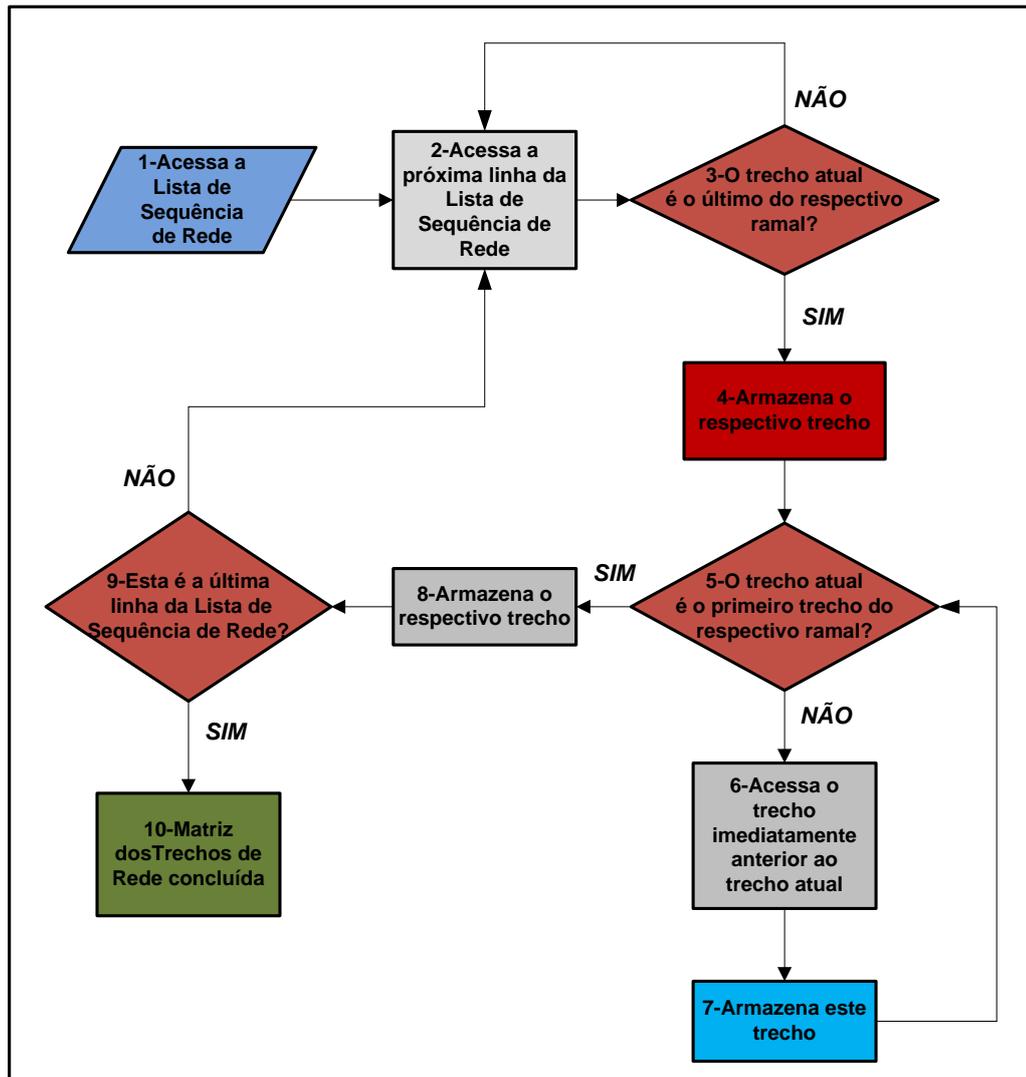


Figura 2.4 – Fluxograma da montagem da Matriz dos Trechos da Rede

Uma vez montadas a Lista de Sequência de Rede e a Matriz dos Trechos de Rede o algoritmo utilizará estas estruturas para definir, dentre outras coisas, a estimativa de carregamento do sistema na condição pré-falta.

2.2.4 Estimativa de Carregamento

A realização da estimativa de carga por parte do algoritmo é muito importante para que o mesmo possa definir quais são os níveis atuais de carregamento em um estado pré-falta, sendo esta informação necessária para definir os limites máximos de transferência de carga no processo de restauração do sistema.

São necessários diversos parâmetros e medidas elétricas para o cálculo preciso do carregamento nos diversos trechos dos alimentadores, tais como resistência, indutância e capacitância dos cabos elétricos, níveis de corrente e tensão, taps dos transformadores ligados à rede, etc. Todos estes parâmetros carregam em si uma incerteza e até mesmo certo grau de imprevisibilidade, especialmente na distribuição, e ainda alguns dependem do estado atual do sistema, e podem variar frente a uma mudança das condições de operação do mesmo. Além disto, diversas concessionárias não têm estes dados disponíveis facilmente. Desta forma, rotinas para estimação de carregamento baseadas apenas em medições são de interesse na restauração de sistemas de distribuição, pois evitam a dependência de muitos dados elétricos dos sistemas.

O alimentador de distribuição primária apresentado Figura 2.5 é o mesmo apresentado na Figura 2.2, porém com a representação esquemática dos medidores de tensão e corrente nos trechos 3 e 9 (destacados em vermelho).

Com os níveis de tensão e corrente (ou ainda apenas a corrente) é possível estimar a potência ativa e reativa no intervalo compreendido entre os dispositivos de seccionamento (neste caso religadores), a saber, o carregamento mais as perdas dos trechos 3 e 8.

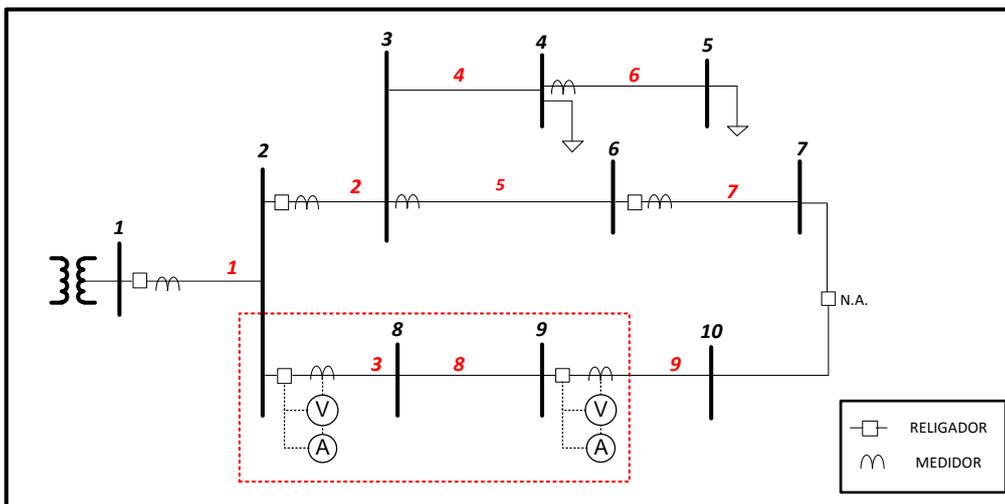


Figura 2.5 - Esquema de estimação de carga

Estimativa de potência com medições fasoriais de corrente e tensão ou um medidor de potência

Na Figura 2.6 é apresentado um esquema trifásico de parte de uma rede de distribuição com seus respectivos transformadores de instrumentos (transformadores de corrente e de potencial). Conforme dito, a estimativa de carga pode ser realizada utilizando-se as medições de tensão e corrente como também apenas utilizando as medições de corrente. Na Figura 2.6 tal medição é realizada com ambas as grandezas.

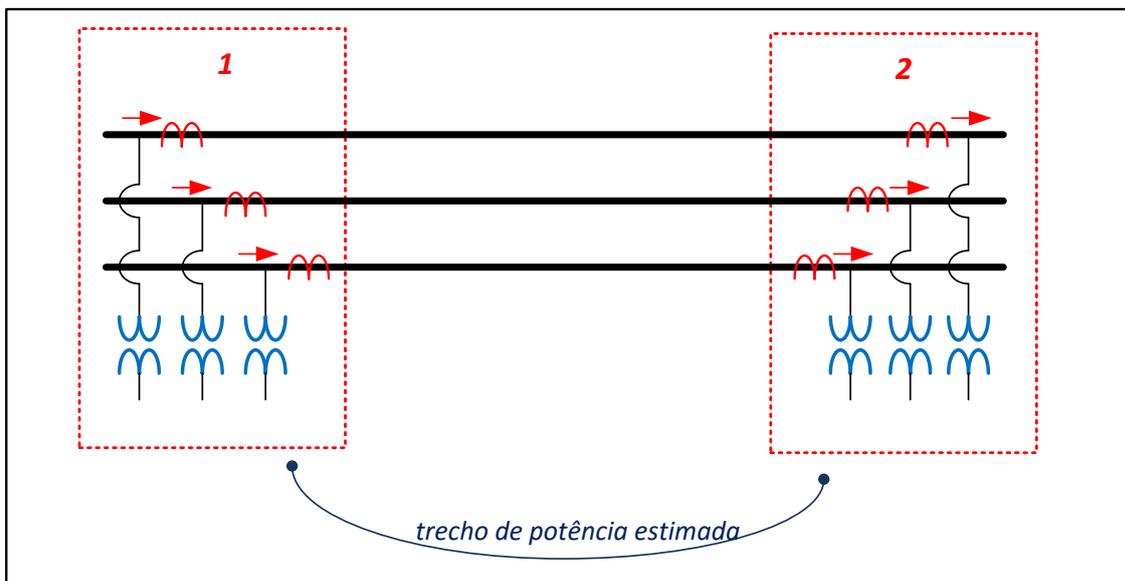


Figura 2.6 – Estimação de carga pelas medidas de tensão e corrente

As equações (2.1) e (2.2) mostram como a potência ativa e reativa são estimadas para cada fase.

$$S_1 = V_{ft1} * I_1^* \quad (2.1)$$

$$S_2 = V_{ft2} * I_2^* \quad (2.2)$$

Onde:

- S é a potência complexa de determinada fase estimada nos trechos 1 e 2 da rede;
- V_{ft} é a tensão fase-terra medida pelos transformadores de potencial instalados no respectivo trecho da rede (trechos 1 e 2);

- I^* é o conjugado da corrente medida pelos transformadores de corrente instalados nos respectivos trechos da rede (trechos 1 e 2).

Tendo a potência complexa definida, é possível obter os valores de potência ativa e reativa estimados.

Estimativa da potência com medições não-fasoriais de corrente

Em diversos pontos de medições em sistemas de distribuição é comum ter-se apenas medições de corrente RMS, mesmo assim é possível estimar o carregamento, mas com considerável erro associado a esta estimativa.

Deste modo é esquematizado na Figura 2.7 uma forma de estimar o carregamento no sistema. Na Figura 2.7 é mostrado um esquema monofásico de um sistema de distribuição com apenas transformadores de corrente instalados nos trechos 1 e 2.



Figura 2.7 - Estimação de carga pelas medidas de corrente apenas

As equações (2.3), (2.4), (2.5) e (2.6) mostram como a potência ativa e reativa são estimadas.

$$P_1 = V_{ft1} * I_1^* = |V_1| * |I_1| * \cos(\theta)_{sub} \quad (2.3)$$

$$Q_1 = V_{ft1} * I_1^* = |V_1| * |I_1| * \sin(\theta)_{sub} \quad (2.4)$$

$$P_2 = V_{ft2} * I_2^* = |V_2| * |I_2| * \cos(\theta)_{sub} \quad (2.5)$$

$$Q_2 = V_{ft2} * I_2^* = |V_2| * |I_2| * \text{sen}(\theta)_{sub} \quad (2.6)$$

Onde:

- P é a potência ativa estimada nos trechos 1 e 2 da rede;
- Q é a potência reativa estimada nos trechos 1 e 2 da rede;
- “ $|V_{ft}|$ ” é o valor em módulo da tensão fase-terra, considerando os valores como nominais tanto no trecho 1 como no trecho 2, ou seja, considerando ambos os valores em 1 p.u..
- $|I|$ é o valor em módulo do conjugado da corrente medida pelos transformadores de corrente instalados nos respectivos trechos da rede (trechos 1 e 2).
- $\cos(\theta)_{sub}$ corresponde ao fator de potência da subestação.
- $\text{sen}(\theta)_{sub}$ corresponde ao seno do ângulo do fator de potência da subestação.

Para ambos os casos, a carga estimada (potências ativa e reativa totais) para o trecho entre os transformadores de instrumentação é calculada pela subtração das potências estimadas nos trechos 1 e 2, como mostrado nas Equações (2.7) e (2.8)

$$P_T = P_1 - P_2 \quad (2.7)$$

$$Q_T = Q_1 - Q_2 \quad (2.8)$$

Cada vez que o algoritmo é executado, ele utiliza dados mais recentes da estimativa de carga (caso o usuário/controlador decida por atualizá-los a cada execução), e de posse destas medidas atuais, realiza as operações necessárias. Estas estimativas, em um caso aplicado, poderiam ser realizadas em intervalos regulares,

como por exemplo 15 minutos, a fim de que o algoritmo possa armazenar os valores mais atuais de carregamento do sistema.

Neste trabalho, para efeito de simulação do sistema de medição instalado em campo, é executado um fluxo de potência para criar a base de dados de valores de tensão e corrente para a metodologia proposta.

O fluxograma da Figura 2.8 mostra os submódulos do módulo de estimação de carga.

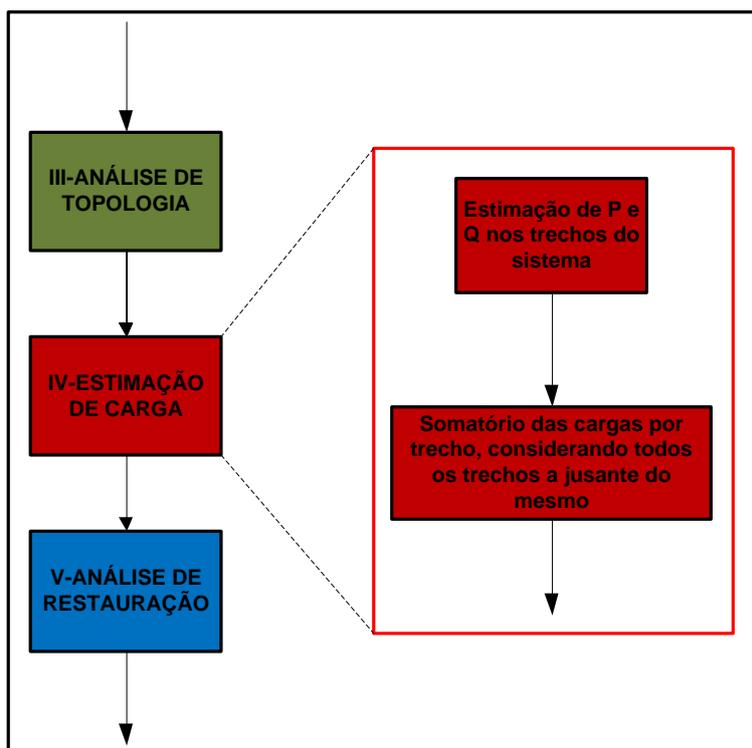


Figura 2.8 – Fluxograma da etapa de estimação de carga

Por último, para cada trecho do sistema, toda carga dos trechos a jusante é somada e adicionada à carga do próprio trecho. Esse valor total de carga (do próprio trecho e dos trechos a jusante) é armazenado em um vetor aqui denominado “LOAD”, que será útil para tornar as operações do algoritmo mais rápidas, pois o mesmo armazena toda a carga à jusante de cada um dos trechos do sistema.

A Figura 2.9 mostra o mesmo sistema de 10 barras mostrado na Figura 2.2, porém com os valores de carregamento de cada trecho de um dos ramais, onde cada valor corresponde à carga do próprio trecho mais a carga dos trechos à jusante do mesmo.

Estes valores não são reais ao sistema de 10 barras e foram colocados apenas para efeito de exemplificação.

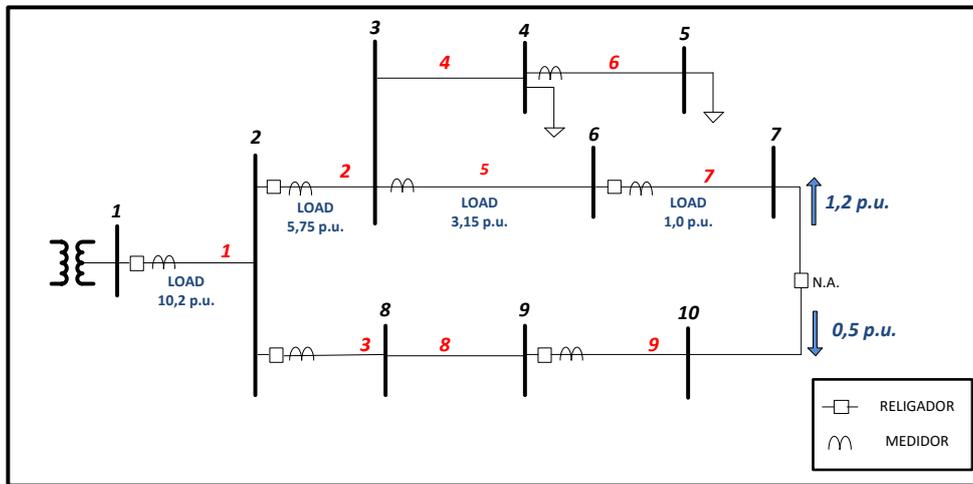


Figura 2.9 – Valores de carregamento de um dos ramais do sistema de 10 barras

Na Tabela 2.6 e na Tabela 2.7 são apresentados os dados de tensão, ângulo e corrente na condição pré-falta estimados para o sistema de 10 barras mostrado na Figura 2.9 (valores dados em p.u.). A barra 1 é a barra de referência no sistema.

Tabela 2.6 – Dados de tensão provenientes dos transformadores de instrumentação

BARRA	TENSÃO	ÂNGULO (graus)
1	1,0000	0,00
2	0,9883	-1,06
3	0,9748	-3,13
4	0,9693	-3,79
5	0,9675	-4,00
6	0,9741	-3,18
7	0,9738	-3,20
8	0,9733	-2,30
9	0,9662	-2,85
10	0,9570	-3,89

Tabela 2.7 – Corrente na condição pré falta (valores em p.u.)

BARRA DE	BARRA PARA	CORRENTE	ÂNGULO (graus)
1	2	0,3747	105,8565
2	3	0,2834	97,9478
2	8	0,1505	108,3639
3	4	0,1171	98,0729
3	6	0,0391	124,8566
4	5	0,0368	102,4119
6	7	0,0209	104,5039
8	9	0,1676	115,2510
9	10	0,1886	98,2103

A fim de realizar uma comparação entre os dois métodos de estimativa de carga apresentados nesta seção, os dados da Tabela 2.6 e da Tabela 2.7 serão utilizados para realizar a estimativa de cargas para o sistema da Figura 2.2.

Estimativa de potência com medições fasoriais de corrente e tensão ou um medidor de potência

Utilizando os dados da Tabela 2.6 da Tabela 2.7 e das equações (2.1) e (2.2), os seguintes valores de potência complexa são obtidos, conforme a Tabela 2.8.

Tabela 2.8 – Valores de potência obtidos com medições fasoriais de tensão e corrente

BARRA DE	BARRA PARA	Potência complexa estimada
1	2	$0,3605 + j0,1024$
2	3	$0,2782 + j0,0335$
2	8	$0,1418 + j0,0384$
3	4	$0,1135 + j0,0083$
3	6	$0,0326 + j0,0194$
4	5	$0,0354 + j0,0057$

6	7	$0,0200 + j0,0040$
8	9	$0,1504 + j0,0635$
9	10	$0,1817 + j0,0167$

Estimativa da potência com medições não-fasoriais de corrente

Considerando valores típicos de tensão (1,0 p.u.) e um fator de potência da subestação, aqui definido em 0,9, é possível realizar as estimativas de carregamento utilizando somente o valor RMS da corrente medida. A Tabela 2.9 mostra os valores de potência complexa estimados por este método.

Tabela 2.9 - Valores de potência obtidos com medições não-fasoriais de corrente

BARRA DE	BARRA PARA	Potência complexa estimada
1	2	$0.3373 + j0,1633$
2	3	$0.2551 + j0,1235$
2	8	$0.1354 + j0,0656$
3	4	$0.1054 + j0,0510$
3	6	$0.0352 + j0,0170$
4	5	$0.0331 + j0,0160$
6	7	$0.0188 + j0,0091$
8	9	$0.1508 + j0,0730$
9	10	$0.1698 + j0,0822$

Comparando a Tabela 2.8 e a Tabela 2.9 observa-se que os erros entre as medidas de potência estimada com medições fasoriais de tensão e corrente e com medições não-fasoriais de corrente foram baixos, com o trecho entre as barras 9 e 10 apresentando o maior do erros encontrados (aproximadamente 1,6 %), exatamente o último trecho da rede, onde já era esperado o maior dos erros, pela maior diferença entre os valores medidos e os valores padrão, como por exemplo, a tensão.

Sendo assim, nos sistemas onde somente são realizadas medidas não-fasoriais, ainda é possível estimar os valores de carga com níveis baixos de erros se comparados aos valores obtidos com medições fasoriais de tensão e corrente.

2.2.5 Análise da Restauração

Neste módulo são realizadas ações para isolar os trechos em falta e restaurar os demais trechos do sistema. Todas as ações aqui apresentadas são realizadas continuamente pelo algoritmo através de sucessivas leituras dos dados de entrada e das informações armazenadas na etapa anterior.

O fluxograma apresentado na Figura 2.10 mostra todas as etapas que são executadas dentro do módulo de Análise da Restauração.

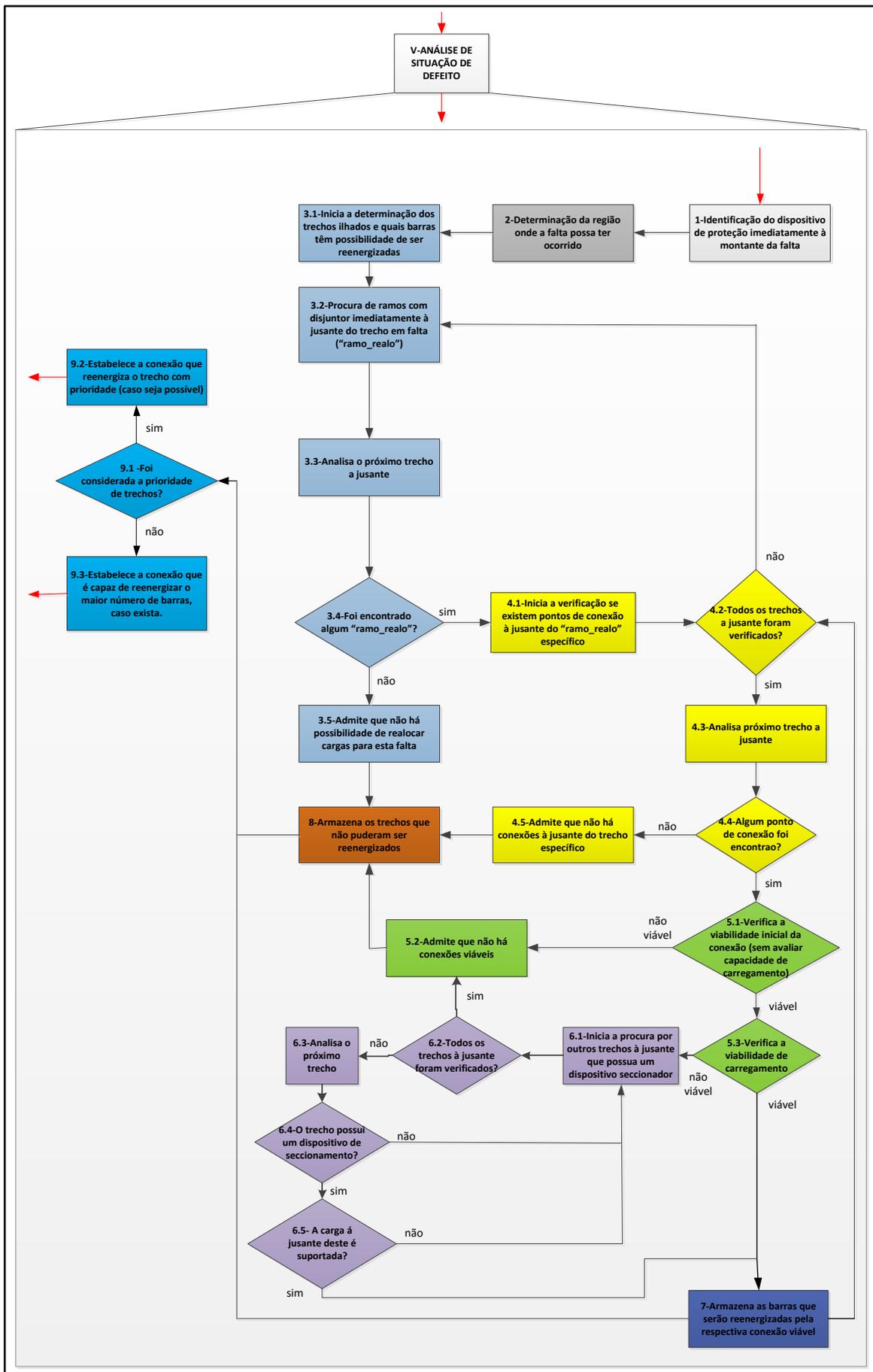


Figura 2.10 – Fluxograma da etapa de análise de restauração

ETAPA 1: Nesta etapa é realizada a detecção do dispositivo de proteção que atua a montante da falta. Depois de localizada a falta, este módulo identifica qual é o primeiro equipamento de seccionamento localizado a montante da mesma.

A metodologia desenvolvida para localizar o trecho em falta consiste em analisar todos os equipamentos que acusaram uma corrente com nível de falta e identificar quais destes trechos não possuem corrente de defeito a jusante. Ressalta-se que o método proposto para localização de faltas é bem simples, pois o foco principal desta dissertação é a restauração do sistema. Futuramente este módulo pode ser substituído por outro com mais recursos de detecção de falhas.

Considerando que ocorra um defeito no trecho 5 apresentado na Figura 2.11, este defeito seria identificado pelos transformadores de corrente dos trechos 1 e 2 do sistema, onde também há a presença de unidades de medição de corrente, logo todos estes dois trechos enviariam informações ao algoritmo acusando um alto valor de corrente. Os outros medidores não acusam correntes de falta.

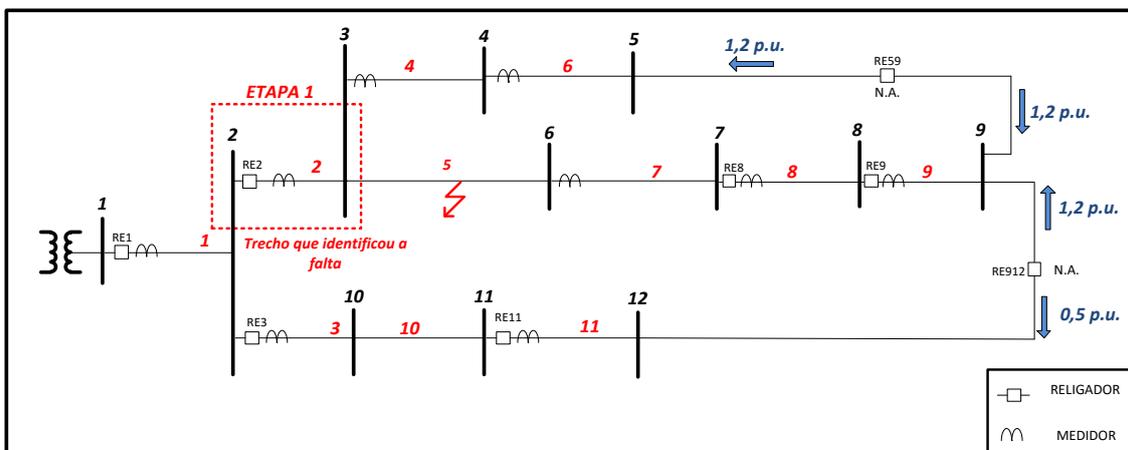


Figura 2.11 – Identificação da etapa 1 no sistema de 12 barras

A Figura 2.12 mostra em sua parte superior a Lista de Sequência de Rede para o sistema da Figura 2.11 e, em sua parte inferior, mostra uma tabela onde estão indicados os trechos que possuem medidores de corrente e a indicação ou não da detecção de corrente de curto-circuito, onde o índice “1” indica a detecção de corrente de defeito. Esta lista é considerada uma entrada cíclica do algoritmo para verificar o estado da rede, ou seja, os valores de correntes dos equipamentos reais são lidos constantemente.

Trecho		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
DE		1	2	2	3	3	4	6	7	8	10	11
PARA		2	3	10	4	6	5	7	8	9	11	12
RELIG.		1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1
CHAVE		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BACK		0	1	1	2	2	4	5	7	8	3	10
LAST		0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1

Trecho		Corrente de Falta
DE	PARA	
1	2	1
2	3	1
2	10	0
3	4	0
3	6	0
4	5	0
6	7	0
7	8	0
8	9	0
10	11	0
11	12	0

Figura 2.12 – Modelo de análise de ação da proteção em primeira instância

Partindo do medidor mais distante que detectou uma corrente de curto-circuito no vetor “Corrente de falta” (neste exemplo, entre as barras 2 e 3), chega-se ao trecho 2 do sistema na Lista de Sequência de Rede. Devido ao padrão escolhido para a entrada de dados (onde os dados devem ser inseridos em uma ordem crescente das barras “PARA”), o ponto mais distante do topo da lista também é o ponto mais distante da fonte no sistema.

A primeira operação da metodologia é verificar na linha “RELIG” (*religador*) se este trecho possui algum dispositivo de proteção, caso tenha, será indicado pelo valor 1.

No trecho de índice 2 (barras 2 e 3) o algoritmo identifica a presença de um religador, pois “RELIG” é 1. Desta forma, o algoritmo verificará se o religador entre as barras 2 e 3 foi atuado. Ressalta-se que o algoritmo não interfere com o sistema de proteção. A operação dos equipamentos de proteção é realizada devido a eventos do próprio sistema.

A Matriz dos Trechos de Rede para o sistema de 12 barras é mostrada na Tabela 2.10. Como explicado na seção 2.2.3, para os sistemas com números diferentes de ramais entre os alimentadores, as posições na Matriz dos Trechos de Rede que não indicam trechos são preenchidas por zero pelo algoritmo, logo no início de cada linha da matriz.

Tabela 2.10 – Matriz dos Trechos de Rede para o sistema de 12 barras

0	0	1	2	4	6
1	2	5	7	8	9
0	0	1	3	10	11

Esta análise é relativamente simples, porém é extremamente funcional para qualquer sistema, mesmo os maiores, mais ramificados e com inúmeros alimentadores.

ETAPA 2: Nesta etapa é identificado o(s) trecho(s) entre dois medidores na qual a falta pode ter ocorrido.

Depois de identificado o trecho em falta na **ETAPA 1**, o algoritmo identifica a área onde possivelmente a falta possa ter ocorrido. Considera-se neste trabalho, como a área onde a falta pode ter ocorrido, todos os trechos que não tenham equipamentos de seccionamento telecomandáveis e que sejam contínuos ao trecho em falha.

A Figura 2.13 mostra como a ETAPA 2 atua no sistema.

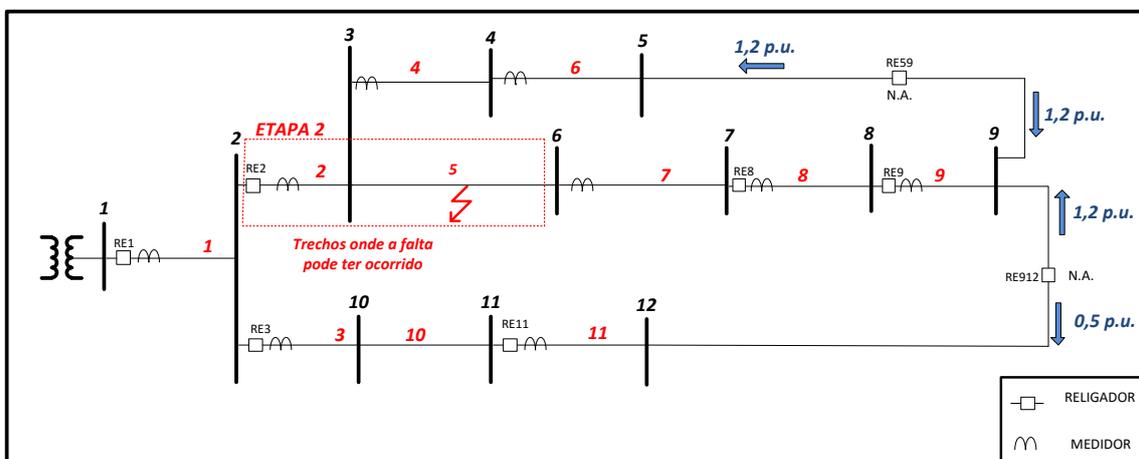


Figura 2.13 – Etapa 2 no sistema de 12 barras

É importante salientar que uma característica muito presente nas redes de distribuição é a alta ramificação, e devido a isto, é muito importante que o algoritmo seja capaz de identificar toda a abrangência possível, incluindo possíveis ramificações existentes a jusante e a montante do ponto mais distante de onde foi detectada a falha. No caso exemplo da Figura 2.13, há ramificações a jusante do trecho 2, logo a identificação

da região onde a falta possa ter ocorrido torna-se mais complexa, porém toda varredura é realizada pela mesma estrutura interna do algoritmo, independente do número de ramificações, ou seja, a rotina de busca de varredura é única e genérica e se apoia na Matriz dos Trechos de Rede construída, independente do sistema estudado.

O fluxograma da Figura 2.14 ajuda a explicar como esta etapa é realizada pelo algoritmo.

A varredura se inicia no trecho mais distante onde a falta foi detectada (trecho 2 da Figura 2.13), e o próximo trecho à jusante é então analisado se foi detectado nele algum outro dispositivo de medição (submódulo 2 na Figura 2.14). Caso afirmativo, a varredura termina (submódulo 6 na Figura 2.14) e o respectivo trecho a jusante do trecho 2 não é adicionado como integrante da região de abrangência da falta, uma vez que possui um dispositivo de medição que não indicou correntes de níveis de falta.

Após o submódulo 2 da Figura 2.14, caso o próximo trecho não possua um dispositivo de medição (como é o caso do trecho 5 no sistema de 12 barras da Figura 2.13), tal trecho é adicionado à região de abrangência da falta (etapa 4 da Figura 2.14), uma vez que a falta pode ter ocorrido neste trecho e só ter sido detectada pelo medidor à montante .

Caso este trecho seja o último trecho do respectivo ramal (etapa 5 da Figura 2.14) a varredura termina, caso contrário o próximo trecho à jusante é analisado e o algoritmo volta à etapa 2. Esta análise, ou varredura, é realizada para cada linha da Matriz dos Trechos de Rede onde o trecho mais distante em que falta a falta foi detectada está presente, neste caso o trecho 2, que está presente nas duas primeiras linhas da Matriz dos Trechos de Rede, ou seja, o trecho 2 faz parte dos ramos que formam dois ramais distintos na Figura 2.13. Esta análise é realizada nas duas primeiras linhas, iniciando tanto pelo trecho 5 (como explicado no parágrafo anterior), como também pelo trecho 4 (indo até o último trecho deste respectivo ramal, o trecho 6). Assim, todas as ramificações onde o trecho 2 está presente são verificadas, abrangendo toda a região à jusante e detectando todas as possíveis regiões de abrangência da falta.

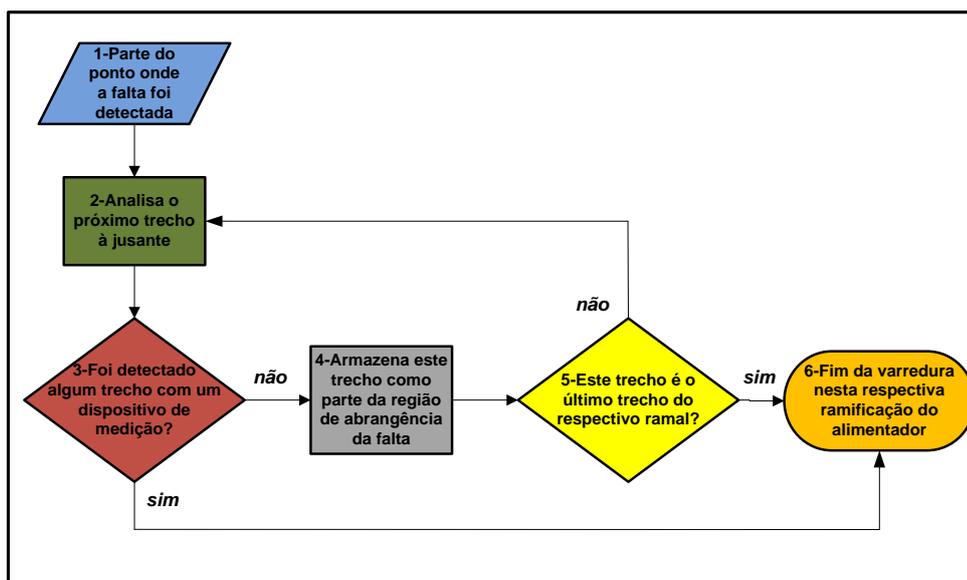


Figura 2.14 – Fluxograma referente à etapa 2

ETAPA 3: Esta etapa verifica quais trechos ficaram ilhados por causa da falta, sem a possibilidade de reenergização e, também quais trechos são passíveis de reenergização por chaveamentos.

O fluxograma da Figura 2.15 ajuda a explicar como esta verificação, que compreende também as **ETAPAS 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4**, é realizada pelo algoritmo.

O fluxograma desta etapa é semelhante com o mostrado na Figura 2.14, porém ele não parte do trecho mais distante onde a falta foi detectada, mas sim do trecho onde o dispositivo de proteção de primeira instância (reliador entre as barras 2-3 da Figura 2.13) atuou a fim de isolar a região em falta no sistema.

No conjunto de **ETAPAS 3**, são detectadas todas as barras que ficarão ilhadas para a respectiva falta, enquanto que a **ETAPA 2** analisa em quais trechos a falta possa ter ocorrido.

ETAPA 3.1: Partindo deste trecho onde o dispositivo de proteção de primeira instância atuou (reliador entre as barras 2-3 da Figura 2.13), o próximo passo é analisar o trecho à jusante (submódulo 2 da Figura 2.15), realizando a leitura da Matriz de Trechos da Rede do respectivo sistema.

Se neste trecho for detectado um dispositivo de seccionamento (reliador ou chave seccionadora) o algoritmo verifica se o medidor associado á este dispositivo indicou correntes de níveis de falta (submódulo 4 da Figura 2.15). Caso o medidor tenha detectado a falta, o algoritmo define que tal trecho ficará ilhado, uma vez que, se o

medidor acusou níveis de corrente de falta, supõe-se que a falta tenha ocorrido neste trecho ou à jusante dele, logo tal trecho também ficará ilhado sem a possibilidade de reenergização.

Caso o medidor associado ao dispositivo seccionador do trecho não tenha detectado correntes de níveis de falta, o algoritmo supõe que a região de abrangência da falta terminou e a parte à jusante do ramal possui a possibilidade de ser reenergizada (submódulo 5 da Figura 2.15).

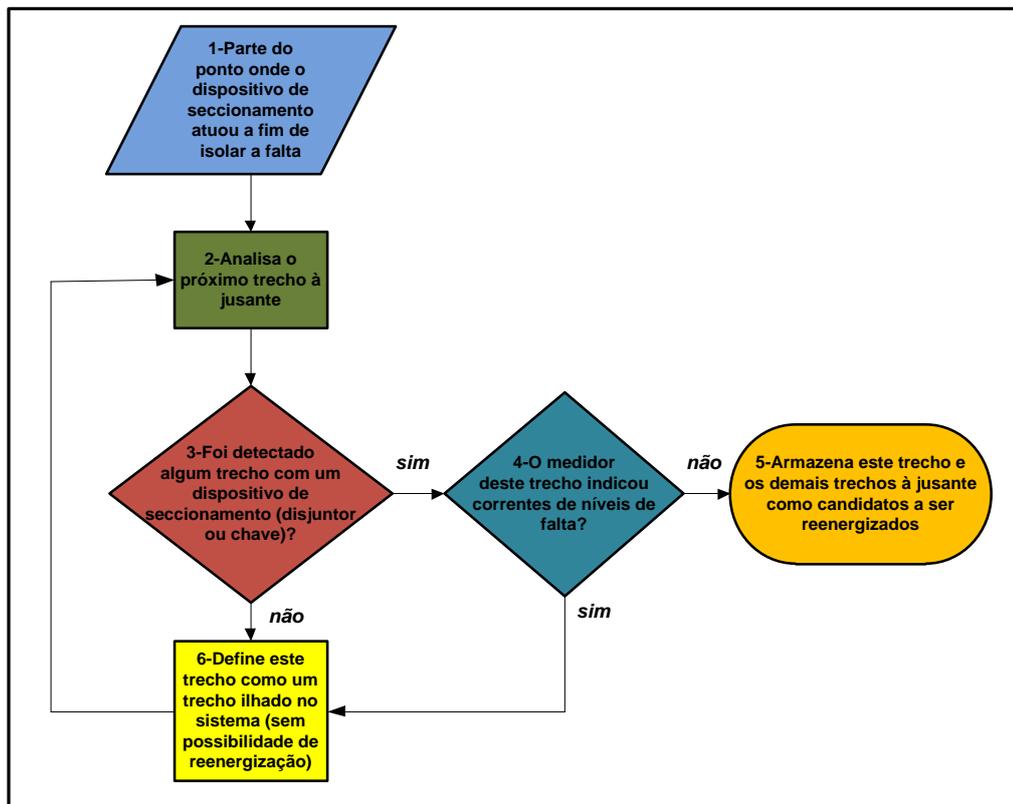


Figura 2.15 – Fluxograma referente ao conjunto de etapas 3

ETAPA 3.2: O algoritmo continua a varredura na parte do sistema a jusante do trecho que ocorreu a falta a fim de identificar todos os trechos com a presença de um religador ou chave seccionadora

Para que seja possível uma realocação de cargas, é necessário que haja algum trecho que possua um dispositivo de seccionamento a fim de isolar a região em falta. Tal trecho será aqui definido como *RAMO DE REALOCAÇÃO*, sendo o ramo a partir do qual será feita a realocação de cargas.

O trecho definido como *RAMO DE REALOCAÇÃO* é obtido no submódulo 5 da Figura 2.15, e corresponde ao primeiro trecho, fora da região de abrangência da falta, onde existe um dispositivo de seccionamento (chave seccionadora ou religador).

Outro ponto importante e que deve ser observado, é que pode haver mais de um *RAMO DE REALOCAÇÃO* em um mesmo sistema, dependendo do ponto de ocorrência da falta e das ramificações existentes no sistema.

Somente para uma questão de exemplificação, a Figura 2.16 mostra o mesmo sistema de 10 barras mostrado na Figura 2.2. Caso a falta ocorresse no trecho 1 deste sistema, existiriam dois *RAMOS DE REALOCAÇÃO*, a saber, os trechos 2 e 3 (destacados em vermelho), que estão à jusante da falta e possuem algum dispositivo de seccionamento assim como um medidor de corrente que não indicou níveis de corrente de falta (o único medidor que indicaria correntes de falta seria o instalado no próprio trecho 1), ou seja, como neste caso a falta ocorreu em um trecho imediatamente anterior a uma ramificação (trecho 1), cada um dos ramais terá seu *RAMO DE REALOCAÇÃO*.

Obviamente, neste caso, não haveria possibilidade alguma de realocação de cargas, uma vez que a falta ocorreu no trecho inicial da rede.

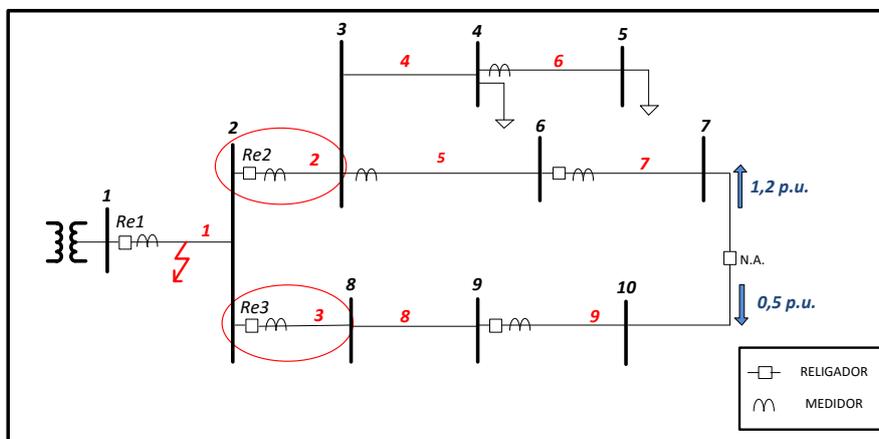


Figura 2.16 – Sistema 10 barras com destaque para os “ramos de realocação”

ETAPA 3.3: Caso ainda não tenham sido verificados todos os trechos à jusante do ponto de falta, o algoritmo continua verificando e armazenando informações referentes ao sistema.

ETAPA 3.4: Verifica se o respectivo trecho que está sendo analisado é um *RAMO DE REALOCAÇÃO*, ou seja, se o respectivo trecho possui algum dispositivo de seccionamento.

ETAPA 3.5: Se nenhum *RAMO DE REALOCAÇÃO* foi encontrado no conjunto de **ETAPAS 3**, o algoritmo admite que não é possível realizar a realocação de cargas e armazena os trechos a jusante do trecho em falta a fim de incluí-los entre os trechos sem possibilidade de reenergização.

A Figura 2.17 ajuda a entender como o conjunto de **ETAPAS 3** atua. A região onde as cargas permanecerão ilhadas compreende os trechos 2, 4, 5, 6 e 7, uma vez que mesmo o medidor do trecho 7 não ter indicado uma corrente de falta ele não possui um dispositivo de seccionamento associado, logo as cargas presentes nesta região não poderão ser realocadas.

O *RAMO DE REALOCAÇÃO* escolhido é o trecho 8, onde há a presença de um dispositivo de seccionamento (RE8) e um medidor associado ao mesmo que não indica correntes de falta.

Caso o trecho 7 possuísse um religador, por exemplo, as cargas deste trecho teriam a possibilidade de ser realocadas, uma vez que o medidor associado a este religador não acusou correntes de falta, e este trecho seria o *RAMO DE REALOCAÇÃO*.

Todas as barras à jusante do trecho 7 tem a possibilidade de ser realocadas.

Uma vez determinadas quais barras que não poderão ser reenergizadas e quais possuem a possibilidade de ser, a próxima ação consiste em o algoritmo analisar quais barras efetivamente poderão ser reenergizadas após realocar carga.

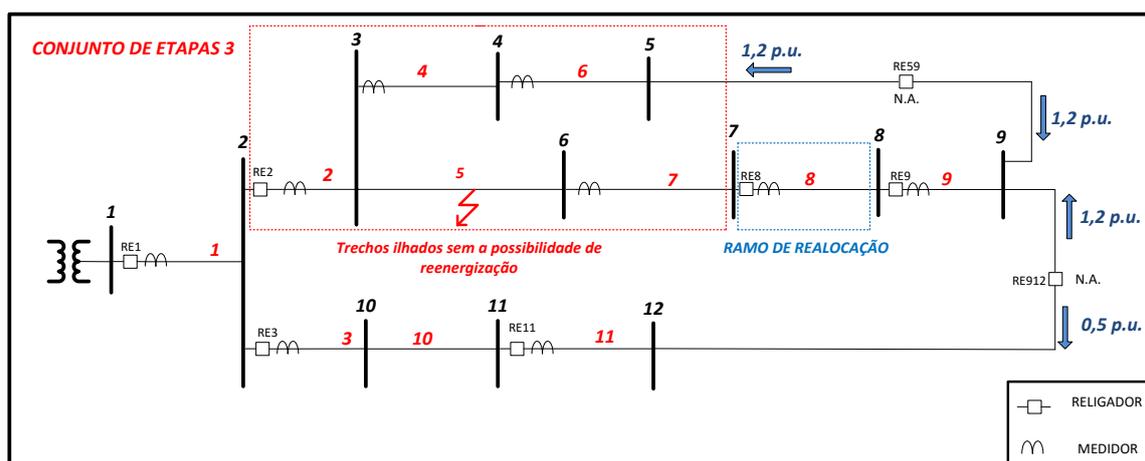


Figura 2.17 – Ação do conjunto de etapas 3 no sistema de 12 barras

ETAPA 4: Esta etapa descobre as interconexões N.A. à jusante do trecho desenergizado obtido no conjunto de **ETAPAS 3**.

Esta procura por conexões N.A. compreende as **ETAPAS 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5**.

Todas as varreduras no sistema realizadas pelo algoritmo ocorrem pela leitura da Matriz de Trechos da Rede, exemplificada na Tabela 2.10 (que é referente ao sistema da Figura 2.13).

ETAPA 4.1: Supondo que o *RAMO DE REALOCAÇÃO* tenha sido definido como o trecho 8 do sistema de 12 barras da Figura 2.13, o algoritmo passa a verificar cada um dos trechos à jusante do trecho 8, começando pela primeira linha da Matriz de Trechos da Rede. O primeiro trecho analisado é o trecho 9, onde o algoritmo irá verificar nesta **ETAPA 4.1** a existência de alguma conexão pela análise dos dados de entrada do respectivo sistema (coluna INDICADOR CONEXÃO).

Como este trecho 9 (entre as barras 8-9) possui um indicador de conexão, o algoritmo verifica se este trecho é o último do respectivo ramal, pela análise da coluna LAST da Lista de Sequência de Rede na posição respectiva do trecho 9, mostrada na Figura 2.12.

Como o trecho 9 é o último, o algoritmo termina a análise.

ETAPA 4.2: No momento em que todos os trechos à jusante do respectivo *RAMO DE REALOCAÇÃO* tenham sido verificados, o algoritmo volta à **ETAPA 3.2** a fim de verificar a existência de possíveis outros *RAMOS DE REALOCAÇÃO*.

ETAPA 4.3: Enquanto todos os trechos à jusante do respectivo *RAMO DE REALOCAÇÃO* não forem verificados, o algoritmo continua a procurar por conexões, seguindo a Matriz dos Trechos de Rede, a entrada de dados e a Lista de Sequência de Rede, mostradas na Figura 2.12 e na Tabela 2.10, respectivamente.

ETAPA 4.4: Analisa se foi encontrado algum ponto de conexão. Caso nenhum ponto de conexão seja encontrado, o algoritmo admite que não existe a possibilidade de realocar as cargas à jusante do *RAMO DE REALOCAÇÃO* específico.

ETAPA 4.5: O algoritmo armazena as barras que não puderam ser reenergizadas.

O conjunto de **ETAPAS 4** pode ser melhor entendido observando a Figura 2.18.

Duas conexões foram encontradas à jusante do *RAMO DE REALOCAÇÃO* (trecho 8), ambas na barra 9, ligando a mesma às barras 5 e 12, conforme mostrado na Figura 2.18.

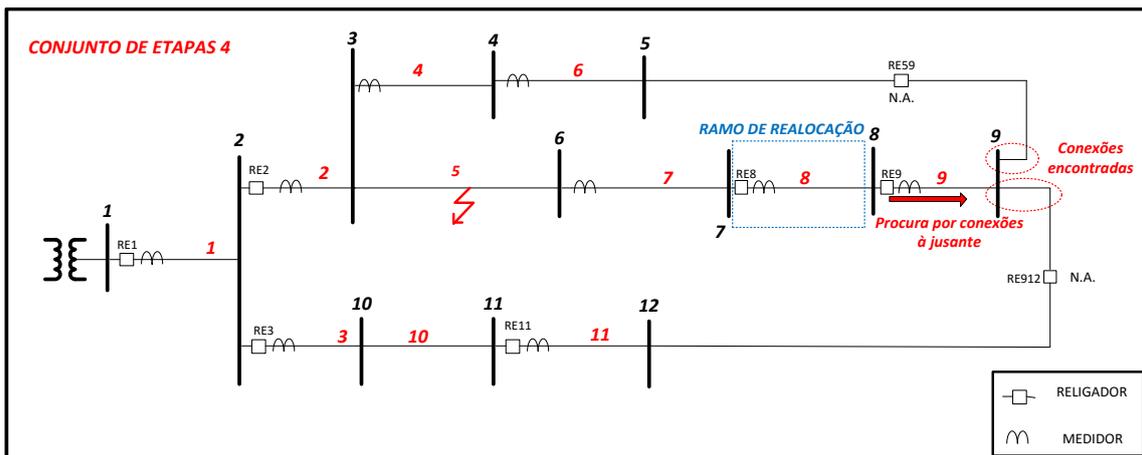


Figura 2.18 – Ação do conjunto de etapas 4 no sistema de 12 barras

ETAPA 5: Neste conjunto de etapas, que compreende as ETAPAS 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4, é analisada a viabilidade da utilização das interconexões N.A. levantadas no conjunto de ETAPAS 4 para a restauração do sistema.

ETAPA 5.1: Caso identificado algum trecho com alguma conexão, o algoritmo passa a analisar se tal conexão é viável, seguindo o critério que consiste na verificação se a outra ponta da conexão está fora da região até então desenergizada do sistema (dentro da região de abrangência da falta). Esta verificação é realizada por uma estrutura denominada “busca_conexao”.

Esta estrutura irá verificar se a outra barra a qual a conexão está ligada está dentre as barras incluídas no conjunto das barras ilhadas e das barras onde a reenergização é possível (determinado no conjunto de **ETAPAS 3**). Tomando como exemplo o caso do sistema de 12 barras da Figura 2.13, a estrutura “busca_conexao” irá verificar se a barra 5 e a barra 9 (que correspondem às barras da outra ponta das conexões existentes na barra 9) estão incluídas dentre as barras atualmente desenergizadas.

Caso as barras 5 e 12 pertençam a esse conjunto, a conexão não é viável, uma vez que a barra 10 deve estar energizada para que a alocação de carga seja realizada. O fluxograma da Figura 2.19 explica o funcionamento da estrutura “busca_conexao”.

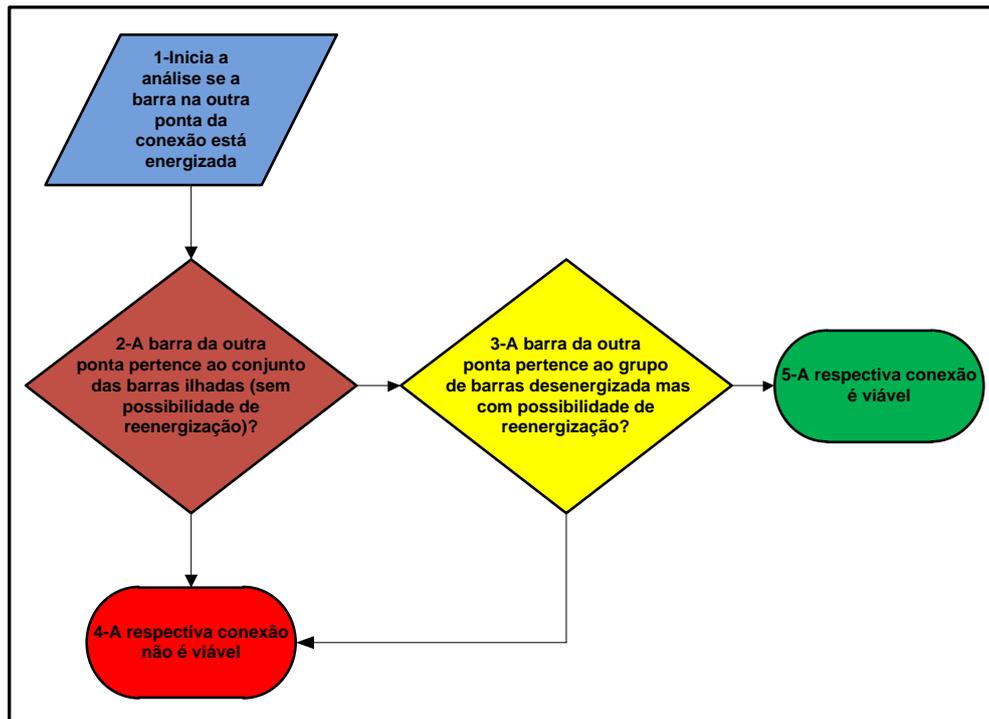


Figura 2.19 – Fluxograma da estrutura “busca_conexão”

ETAPA 5.2: Caso a(s) barra(s) da(s) outra(s) ponta(s) da(s) conexões(s) não estejam dentro das regiões “sãs” do sistema, o algoritmo admite que não há conexões viáveis.

ETAPA 5.3: Uma vez verificado que alguma barra da outra ponta da respectiva conexão está em uma parte “sã” do sistema, o algoritmo passa a avaliar os limites de carregamento.

Uma vez que já são conhecidos tanto os limites de carregamento quanto toda a carga a jusante de cada um dos trechos (vetor LOAD explicado na seção 2.2.4), o algoritmo deve identificar qual a máxima parte do sistema à jusante do *RAMO DE REALOCAÇÃO* específico pode ser reenergizada sem que a carga adicional supere o limite de carregamento do outro alimentador.

ETAPA 5.4: Caso os limites de carregamento sejam viáveis, o algoritmo admite que a realocação é possível por esta respectiva conexão e armazena quais barras serão realocadas por ela.

A Figura 2.20 utiliza o sistema de 12 barras para mostrar a ação do conjunto de **ETAPAS 5** na verificação da viabilidade das conexões encontradas no conjunto de **ETAPAS 4**.

região seja realocada, ou seja, o algoritmo passa a verificar a possibilidade de realocar uma parte menor do sistema, que seja suportada pela conexão existente.

Esta verificação será mais bem explicada na seção 2.2.6, onde será apresentado um exemplo de funcionamento do algoritmo aqui proposto.

ETAPA 6.2: Verifica se todos os trechos à jusante o *RAMO DE REALOCAÇÃO* específico foram verificados. Caso todos os trechos ainda não tenham sido verificados, o algoritmo analisa o próximo trecho.

Uma vez que todos os trechos a jusante tenham sido verificados e nenhum trecho com um religador ou chave seccionadora (que tenha uma carga suportável pela conexão) tenha sido encontrado, o algoritmo admite novamente que não existem conexões viáveis.

ETAPA 6.3: O algoritmo analisa o próximo trecho à jusante.

ETAPA 6.4: É verificado se o respectivo trecho analisado possui algum dispositivo de seccionamento. Se o trecho não possuir um dispositivo de seccionamento o algoritmo continua a busca, passando para o próximo trecho.

ETAPA 6.5: Caso o trecho possua um dispositivo de seccionamento, o algoritmo analisa se a carga à jusante deste trecho é suportada pela conexão, e caso afirmativo, o algoritmo armazena as barras que serão realocadas e define este respectivo trecho como o novo *RAMO DE REALOCAÇÃO*, pois o será o dispositivo de seccionamento deste trecho que será aberto para a realocação das cargas.

Caso o valor das cargas deste trecho ainda excedam o limite de carregamento o algoritmo irá continuar a verificar os próximos trechos (voltando à **ETAPA 6.1**) até que o último trecho deste ramal seja analisado.

Observando o exemplo mostrado na Figura 2.21, onde o valor da máxima carga suportada pelo outro ramal foi modificado a fim de exemplificar a ação do conjunto de **ETAPAS 6**, é possível mostrar de maneira simplificada como o algoritmo atua nesta etapa.

A carga suportada pelo outro ramal foi diminuída para 0,8 p.u., desta forma a carga dos trechos 8 e 9 não é mais suportada integralmente pelo outro ramal. Assim, o algoritmo passa a buscar regiões à jusante do *RAMO DE REALOCAÇÃO* atual (trecho 8) a fim de encontrar uma região onde a carga seja suportada.

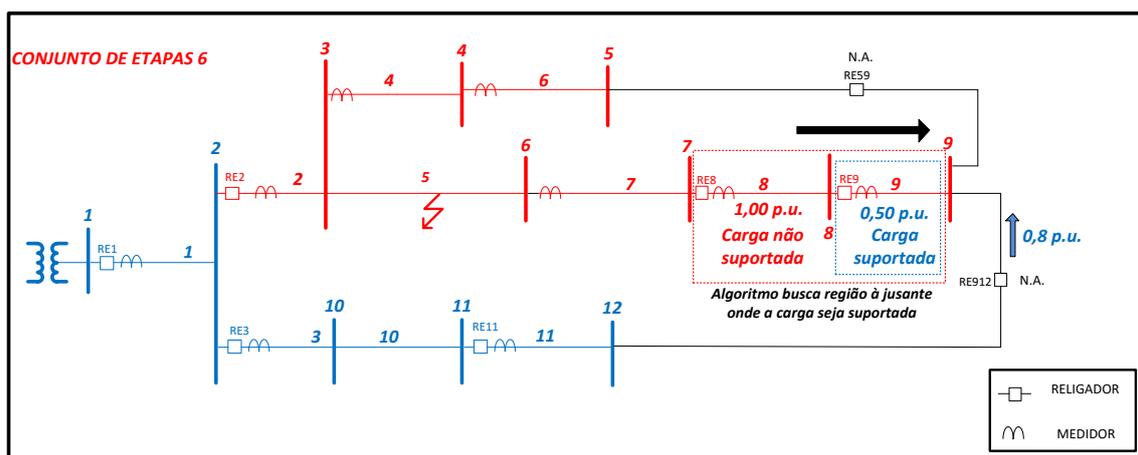


Figura 2.21 - Ação do conjunto de etapas 6 no sistema de 12 barras

Nesta verificação o algoritmo encontra o trecho 9, que possui um dispositivo de seccionamento (RE9) e cuja carga é inferior ao limite de carregamento extra do outro ramal. Desta forma, o algoritmo torna o trecho 9 como o novo *RAMO DE REALOCAÇÃO* e define que as cargas deste trecho podem ser realocadas pela abertura do religador RE9 e o fechamento do religador N.A. RE912.

ETAPA 7: Uma vez definido que a realocação é viável o algoritmo armazena as barras que serão efetivamente reenergizadas (barra 9 no caso do sistema de 12 barras da Figura 2.21).

ETAPA 8: O algoritmo também armazena as barras que não puderam ser reenergizadas (barras 3, 4, 5, 6, 7 e 8).

ETAPA 9: Neste conjunto de **ETAPAS 9** é verificado o critério de trechos prioritários.

ETAPA 9.1: Uma vez existam barras a ser energizadas, o algoritmo irá atuar conforme o critério de prioridade pré-estabelecido.

ETAPA 9.2: O algoritmo reenergiza, caso haja a possibilidade, uma ou mais barras definidas inicialmente como prioritárias, independente se a(s) respectiva(s) operação(ões) de realocação de cargas for(em) aquela(s) que reenergiza(m) o maior número possível de barras.

ETAPA9.3: O algoritmo irá reenergizar o maior número possível de barras, caso alguma realocação seja possível.

Seguindo o critério de reenergização do maior número de barras, a nova configuração do sistema de 12 barras é mostrada na Figura 2.22, onde a barra 9 foi realocada e as barras 3, 4, 5, 6, 7 e 8 permaneceram desenergizadas.

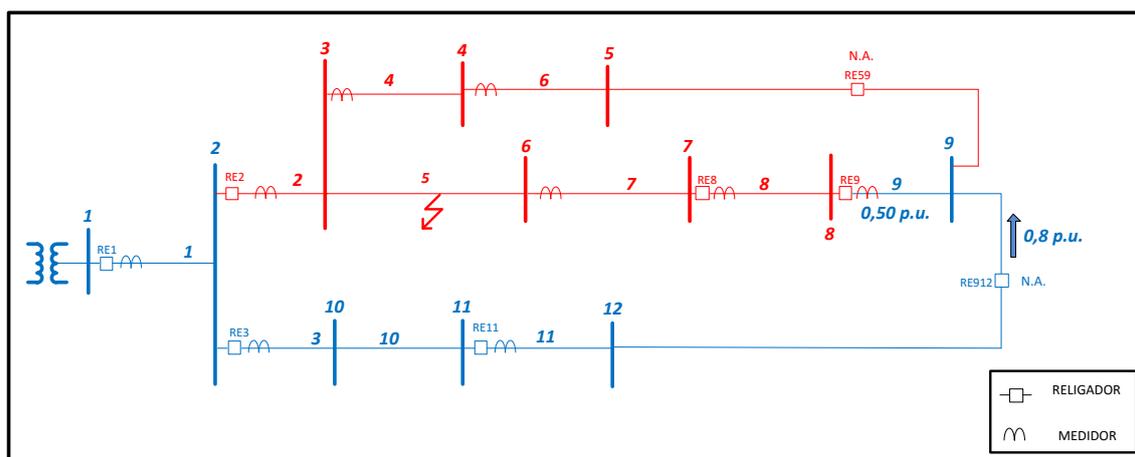


Figura 2.22 – Nova configuração do sistema de 12 barras

2.2.6 Exemplo de Funcionamento do Algoritmo Proposto

Com o objetivo de exemplificar como as operações são realizadas pelo algoritmo, um sistema de distribuição de 21 barras, formado por três alimentadores principais que se ramificam e operam em uma configuração radial foi sintetizado e apresentado na Figura 2.23. Verifica-se que este sistema possui três interconexões, representadas pelos trechos com religadores/chaves telecomandadas e normalmente abertas (NA), que permitem remanejamento de cargas em caso da ocorrência de uma contingência.

Todos os outros religadores sem legenda são considerados como normalmente fechados (N.F.) e todas as faltas são consideradas como faltas permanentes. Todas as chaves seccionadoras são normalmente fechadas, e não possuem capacidade de operação sob carga ou sob curto-circuito. Isto foi considerado em todos os sistema testados neste trabalho.

Cada uma das barras é numerada com índices em preto. A numeração automática dada pelo próprio algoritmo a cada um dos trechos está indicada em vermelho.

Uma parte do vetor “LOAD”, descrito anteriormente na seção 2.2.4, que calcula e armazena o carregamento do trecho e apresentado em azul na Figura 2.23, onde para cada trecho está indicada toda carga existente à jusante do mesmo. Desta mesma forma é mostrado o limite de carregamento da conexão, imposta pela máxima carga extra suportada pelo alimentador da outra ponta. O ramo do trecho entre as barras 4 e 5 possui

capacidade de suprir a carga extra de até 0,6 p.u. para o ramal do trecho entre as barras 8 e 9. Este, por sua vez, pode suprir até 1,6 p.u. de carga extra para o ramal do trecho entre as barras 4 e 5.

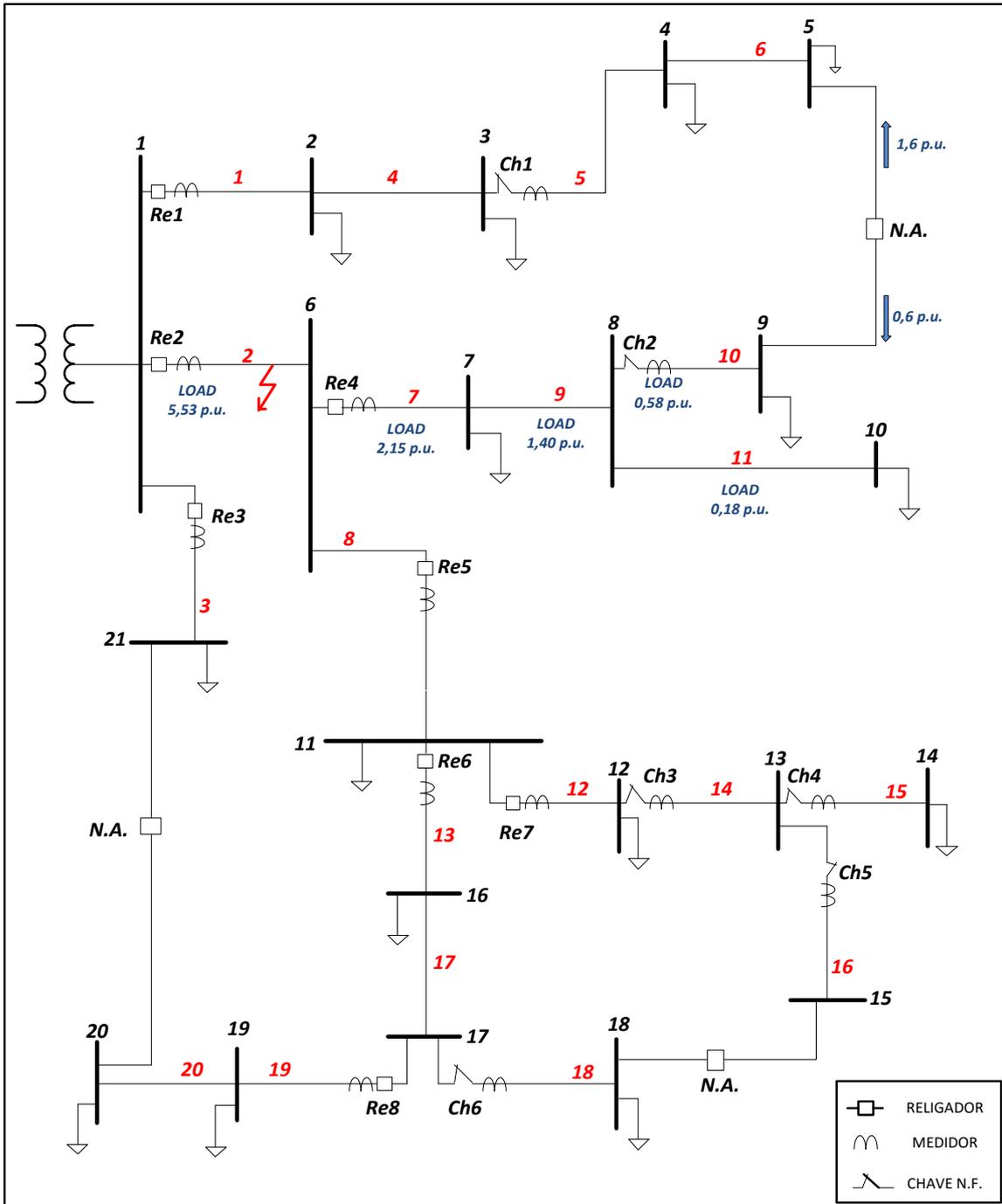


Figura 2.23 – Sistema típico de distribuição primária

Neste trabalho, considera-se apenas os limites máximos de carga dos alimentadores, uma vez que a interconexão entre alimentadores sempre terá um limite de carga maior

que os limites dos alimentadores em si. Sendo assim, o “gargalo” da interconexão será sempre o limite de carga dos alimentadores os quais ela interliga.

Caso Exemplo 1:

Uma falta foi simulada no trecho 2 do sistema, entre as barras 1 e 6 (conforme mostrado na Figura 2.23). Uma vez identificada a falta e ocorra a abertura do religador no trecho 2 (Re2), uma série de barras ficam desenergizadas, tanto a jusante do trecho 7 como a jusante do trecho 8 do sistema (barras 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14,15, 16,17, 18, 19 e 20).

Deste modo, o algoritmo identifica quais conexões, existentes a jusante destes trechos, são passíveis de chaveamento conforme apresentado na seção 2.2.5. Três possibilidades de conexão existem a jusante do trecho 2, a conexão entre as barras 9-5, a entre as barras 18-15 e a conexão entre as barras 21-20.

A conexão existente entre as barras 18-15 não é viável, uma vez que ambos os lados estão desenergizados com a abertura do religador do trecho 2 (Re2), sendo assim o algoritmo indica que a restauração por esta conexão não poderá ser realizada.

A conexão entre as barras 9-5 e a conexão entre as barras 20-21 são identificadas, a princípio, como conexões viáveis, porém é necessário ainda analisar se os limites de carregamento de ambas são compatíveis com as cargas existentes nos trechos desenergizados, de acordo ainda com a posição dos dispositivos seccionadores a serem abertos.

Será analisada apenas a reenergização do sistema a jusante do trecho 7. A análise da restauração do sistema a jusante do trecho 8 é similar ao trecho 7.

O sistema do trecho 7 pode ser reenergizado com a abertura do religador no trecho 7 (Re4) e fechamento da chave no trecho 5-9 (chave N.A.), porém existe a restrição quanto ao limite de carregamento do outro alimentador. O alimentador adjacente pode transportar 0,6 p.u. de potência, mas para reenergizar esta parte do sistema é necessário 2,15 p.u. de potência.

Sendo assim, existem dois possíveis pontos onde um dispositivo de seccionamento pode ser aberto e parte da carga desenergizada possa ser realocada pela conexão entre as barras 9-5, a saber: (i) o religador do trecho 7 (Re4) e (ii) a chave seccionadora do trecho 10 (Ch2).

Observe que toda a carga a jusante dos trechos 7 é 2,15 p.u. e do trecho 10 é 0,58 p.u., respectivamente, sendo o limite máximo de carregamento extra de 0,6 p.u. Desta forma, analisando tanto a posição dos religadores como o limite de carga, o algoritmo apresenta como solução a abertura do dispositivo do trecho 10 (opção *ii*), sendo que somente a barra 9 será reenergizada, sendo que a região ilhada abrange as barras 6, 7, 8 e 10.

Caso Exemplo 2

Utilizando o mesmo sistema da Figura 2.23, mantendo o ponto de falta, porém modificando o valor limite de carga que pode ser transportada pelo outro alimentador, tem-se a Figura 2.24. Neste caso, o limite de transferência de carga é maior que o caso anterior, podendo teoricamente assumir toda carga a jusante do trecho 9 (barra 8), porém não há um dispositivo seccionador no trecho 9. Logo, apesar de haver uma maior capacidade de transferência de carga do outro alimentador, a posição dos dispositivos de seccionamento não é favorável à realocação da máxima carga possível, obrigando o algoritmo por decidir pela abertura do seccionador do trecho 10 (Ch2) e a consequente reenergização apenas da barra 9, deixando ilhados os consumidores ligados às barras 6, 7, 8 e 10.

Assim, enquanto no primeiro caso da Figura 2.23, a restrição vista pelo algoritmo era devido ao limite máximo de carga extra do outro ramal, no caso da Figura 2.24 a restrição foi devido à posição dos dispositivos de seccionamento na rede. Ao final, ambas as restrições limitaram o número de barras reenergizadas e, consequentemente, o de consumidores.

é capaz de isolar o restante do sistema à jusante do ponto em falta (trecho 2), porém não foi identificado pelo algoritmo um dispositivo de medição vinculado ao religador Re4 do trecho 7, isto devido à algum defeito em tal dispositivo, neste caso, a única medição válida é do trecho 10 (medidor vinculado à Ch2).

Desta forma, mesmo que o outro alimentador seja capaz de suprir a carga do trecho 7 até o final do alimentador, o algoritmo não irá enviar um comando de energização desta parte do sistema (trechos 7, 9, 10 e 11), pois não existe a garantia que: (i) a região em falta esteja limitada ao trecho 2, já que qualquer falta ocorrente nos trechos 7, 9 e 11 também seria identificada pelo mesmo medidor do trecho 2 apenas, e (ii) sem um equipamento de medição não é possível estimar a carga no trecho.

Caso existisse um medidor juntamente ao religador no trecho 7 e este não acusasse uma corrente com nível de curto-circuito, tal religador poderia ser aberto e toda a carga localizada a jusante poderia ser restaurada, porém como o algoritmo não identificou este dispositivo, ele deverá realocar a carga somente dos trechos onde há a certeza que a zona faltosa já tenha sido isolada e seja possível restaurar a carga sem ultrapassar nenhum limite. Neste caso, a única região onde se tem certeza disto é o trecho 10 do sistema (abertura de Ch2), já que seu medidor não indicou altos níveis de corrente.

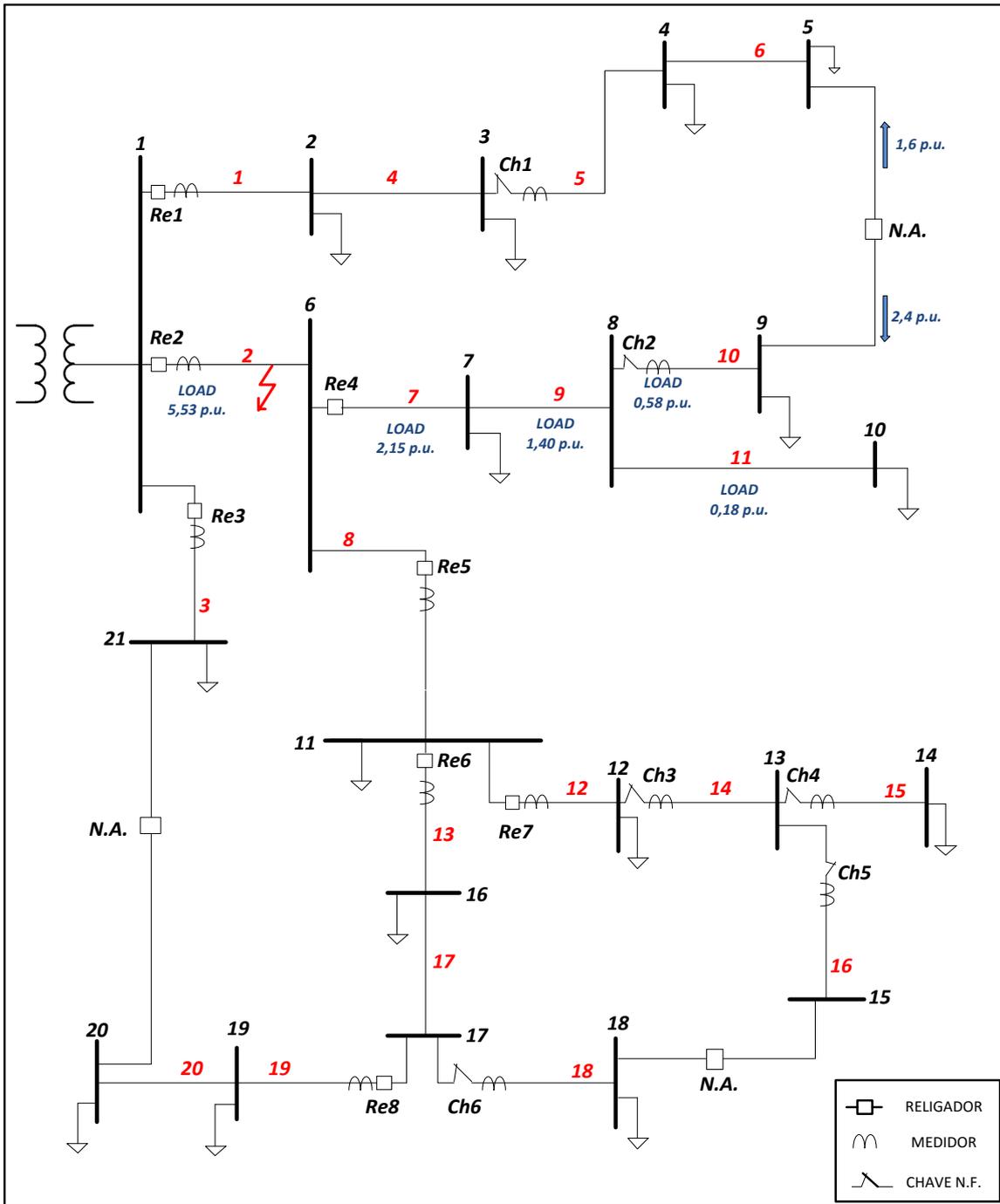


Figura 2.25 – Mesmo sistema típico com outras modificações

Caso Exemplo 4

Um fato importante é a diferenciação, ainda na leitura de dados feita pelo algoritmo, entre os dispositivos seccionadores capazes de atuar sob defeito e aqueles que só podem atuar com a respectiva parte do sistema desenergizada. Isto será explorado neste caso exemplo.

Essa representação do funcionamento real dos equipamentos, apesar de positiva, acarreta algumas dificuldades com relação à operação do sistema, pois na ocorrência de uma falta, não será qualquer dispositivo de seccionização que poderá atuar, mas somente religadores e religador. Ressalta-se que o algoritmo proposto é capaz de lidar com estas características.

O objetivo do sistema da Figura 2.26 não é a realocação e restauração da carga, mas apresentar a atuação dos dispositivos de proteção.

A falta ocorreu no trecho 10, sendo identificada pelo medidor de corrente deste mesmo trecho (medidor vinculado à Ch2). Caso existisse um disjuntor/religador neste ramo, ele poderia atuar, e toda a carga à montante deste poderia permanecer energizada (cargas dos trechos 7, 9 e 11), porém, no trecho 10 existe apenas uma chave seccionadora (Ch2), que como dito anteriormente, tal equipamento não é capaz de atuar sob tais circunstâncias, cabendo tal tarefa ao religador no trecho 7 (Re4), que deverá estar ajustado de forma a “enxergar” tais níveis de corrente de falta ocorrentes nestes trechos mais distantes. Assim, toda a carga a jusante do trecho 7 será desenergizada (pela abertura de Re4), e neste caso, como a falta ocorreu no mesmo ponto que existe a interconexão com outro ramal, estas cargas não poderão ser realocadas.

Caso Exemplo 5

Observando agora o caso em que a falta fosse localizada no trecho 7 (ou no trecho 9), como mostrado na Figura 2.27, o religador do trecho 7 (Re4) atuaria e toda carga a jusante do trecho 10 poderia ser realocada (supondo que o outro alimentador suporte a carga extra). Neste caso, a existência de um religador ou uma chave seccionadora no trecho 10 (que neste caso existe a chave Ch2) não faria diferença no tempo da realocação da carga, mas faria grande diferença no custo da instalação dos dispositivos no sistema.

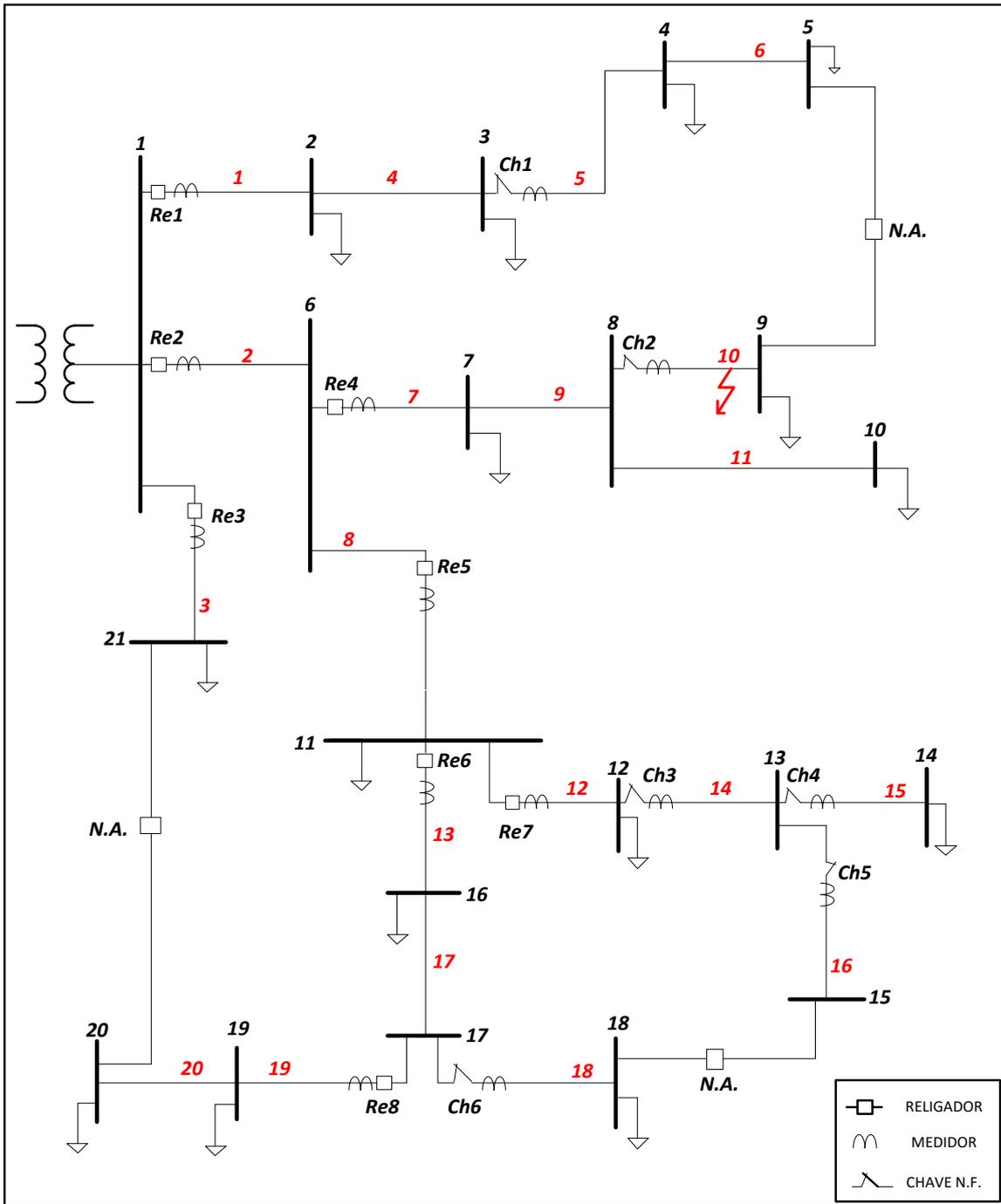


Figura 2.26 – Análise com a mudança da região em falta para trecho 10

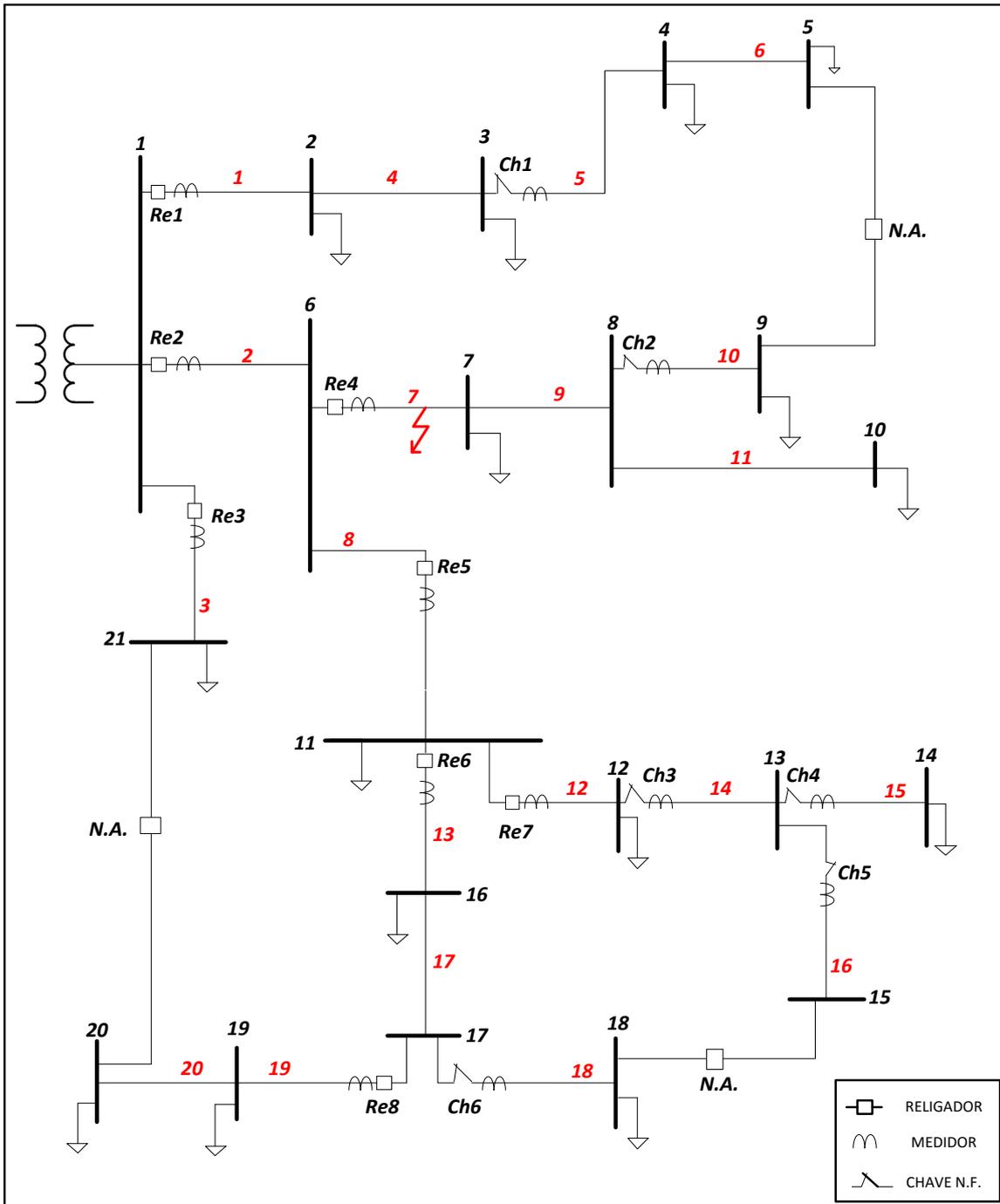


Figura 2.27 – Análise com a mudança da região em falta para trecho 7

Ressalta-se a importância do algoritmo ser o mais genérico possível, e estar apto a operar em qualquer sistema radial. Isso se deve ao fato de que cada sistema possui suas particularidades. O algoritmo também permite que uma parte do sistema seja dividida entre dois ou mais alimentadores para tentar maximizar a restauração da carga.

Ressalta-se que este algoritmo não busca exatamente a restauração ótima do sistema, e sim uma solução rápida e factível. Conforme apresentado na seção 2.2.5 e

2.2.6, o algoritmo cria uma árvore de possibilidades de modo direcionado, avalia a árvore e apresenta a melhor solução em um tempo reduzido. Um dos trabalhos futuros proposto é acoplar uma rotina de otimização do tipo *branch and bound*, por exemplo, visando conseguir melhores soluções.

2.2.7 Impressão dos Resultados

Por último, após serem realizadas todas as ações e tomadas as decisões, o algoritmo envia as informações ao usuário/controlador.

No caso de um sistema instalado em uma rede real, todas as informações de saída do algoritmo devem ser enviadas novamente ao centro de controle da rede, onde as ações serão realizadas sobre o sistema, seguindo as “ordens” enviadas, obedecendo inclusive à ordem de operação destas ações. Dentre as informações de saída, os seguintes dados, quando existentes, são enviados ao usuário:

- Lista de Sequência de Rede do respectivo sistema;
- Matriz dos Alimentadores de Rede, ou seja, a matriz que indica cada um dos ramos do sistema, de acordo com os índices que o próprio algoritmo atribuiu a cada trecho;
- Trecho onde a falta foi detectada;
- Abrangência da localização da mesma, ou seja, em quais trechos ou ramos ela pode ter ocorrido de acordo com a presença ou não de outros medidores ao redor do ponto de falta;
- Qual equipamento de proteção (disjuntor/religador) que atuou a fim de isolar o trecho em falta;
- Barras que ficarão ilhadas, ou seja, quais barras não poderão ser reenergizadas por uma ação de realocação de carga e, por conseguinte ficarão desenergizadas até que a parte em falta do sistema seja reparada;

- Quais disjuntores/religadores, na região a jusante e próxima ao ponto de falta, podem ser abertos para a realocação de carga em outros alimentadores, por meio de um fechamento de um dispositivo *tie* presente no sistema;
 - Para cada trecho encontrado, informa todas as conexões encontradas à jusante do mesmo, tanto as conexões viáveis como as conexões não viáveis;
 - Para cada conexão encontrada, informa se a mesma é viável ou não (considerando carregamento máximo do outro ramal) e o número de barras que esta conexão pode reenergizar caso seja estabelecida.
- Qual conexão a ser estabelecida de acordo com o critério de maior número de barras reenergizadas ou pelo critério de barras prioritárias reenergizadas;
- Quais religadores devem ser abertos e/ou fechados para realocar a carga;
- Quais barras poderão ser reenergizadas e as que não poderão ser (caso existam).

A Figura 2.28 mostra um exemplo de parte dos dados de saída que são disponibilizados ao usuário/controlador, no software Matlab®. Maiores informações e detalhes sobre os relatórios de saída serão apresentados em exemplos no capítulo de resultados.

```

.....
INFORMAÇÕES SOBRE A FALTA E AÇÕES PARA REESTABELECIMENTO DE BARRAS:
.....

LOCALIZAÇÃO DA FALTA NO SISTEMA:

A Falta foi detectada pelo medidor no ramo 1-2 do Sistema testado.

-----

ARRANJÊNCIA DA LOCALIZAÇÃO DA FALTA (RAMOS):

Barras:
  DE   PARA
  1     2
  2     3
  3    20

-----

EQUIPAMENTO DE PROTEÇÃO QUE DEVEM ATUAR A FIM DE ISOLAR A FALTA:

O Disjuntor entre as Barras 1-2 deve atuar.

-----

AS SEQUINTE BARRAS DO SISTEMA FICAM ILHADAS NA REGIÃO EM FALTA (SEM POSSIBILIDADE DE REEMERGIZAÇÃO):

  2   3   20

-----

AVALIANDO A POSSIBILIDADE DE REALOCAÇÃO DE CARGA A JUSANTE DO TRECHO ENTRE AS BARRAS 3 E 4:

-----

Foram encontradas 9 conexões a jusante do trecho específico:

```

Figura 2.28 – Parte dos dados de saída disponibilizados pelo algoritmo

2.3 Conclusões do Capítulo

Neste capítulo apresentou-se todas as etapas que são realizadas pelo algoritmo para a tomada das decisões, começando pela entrada de dados do sistema, passando pelas análises de topologia e montagem da Lista de Sequência de Rede e da Matriz dos Trechos de Rede, sendo tais estruturas fundamentais para a tomada correta de decisões, a partir da análise de falta.

Explicou-se como o algoritmo se comporta frente à ocorrência de um curto-circuito em um determinado ponto do sistema mostrando exemplos de algumas situações possíveis a fim de aprofundar o entendimento do processo realizado pelo algoritmo na realocação das cargas, quando possível, e terminando com a impressão dos resultados ao usuário/controlador para que o mesmo possa analisá-los (ou o envio das informações de saída aos dispositivos instalados no sistema elétrico, no caso de uma aplicação real).

Procurou-se descrever todas as etapas da forma mais detalhada possível, e listar todos os processos envolvidos, para facilitar o entendimento e dar embasamento aos resultados obtidos nos testes realizados, que serão apresentados no próximo capítulo, buscando validar a metodologia.

Capítulo 3 Testes e Resultados

3.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos com a metodologia de restauração de sistemas de distribuição proposta nesta dissertação. Ao todo foram testados quatro sistemas, com 10, 21, 50 e 150 barras, cada um com características topológicas diferentes.

Para cada sistema testado serão apresentados uma representação gráfica do mesmo, suas características básicas, a Lista de Sequência de Rede e a Matriz de Trechos de Rede, assim como o vetor LOAD (somatório das cargas estimadas por trecho considerando todos os trechos à jusante do mesmo).

Serão simuladas faltas em diversos trechos, e para cada falta serão apresentadas as ações tomadas pelo algoritmo para restaurar o fornecimento de energia aos usuários da rede. Os valores serão apresentados em p.u., com potência base de 1 MW.

3.2 Testes com o Sistema de 10 Barras

O primeiro sistema estudado possui 10 barras, 5 religadores NF e 1 religador N.A., é apresentado na Figura 3.1. Os valores em vermelho são os carregamentos estimados pelos equipamentos de medição do sistema no respectivo trecho.

Os valores em azul correspondem aos valores de carga estimada do próprio trecho somado às cargas estimadas de todos os trechos à jusante do mesmo (vetor LOAD explicado na seção 2.2.4), ou seja, são os valores que serão utilizados pelo algoritmo para as tomadas de decisões.

Os religadores sem legenda são considerados normalmente fechados, e o religador da conexão é normalmente aberto (N.A.).

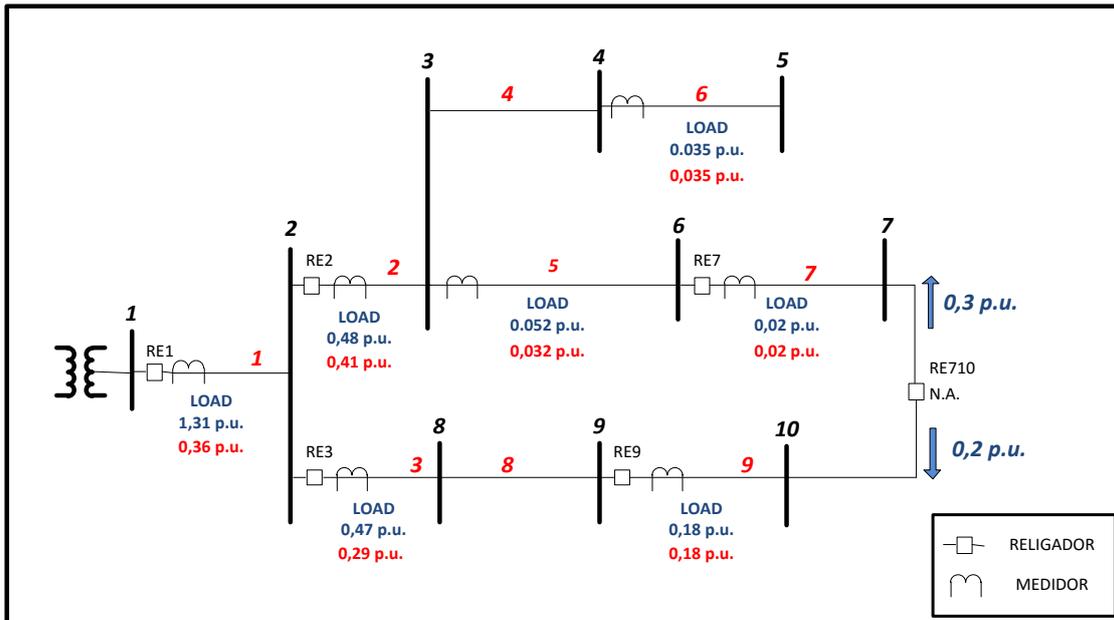


Figura 3.1 – Representação do sistema de 10 barras

A Lista de Sequência de Rede e a Matriz de Trechos de Rede para o sistema da Figura 3.1 estão mostradas na Tabela 3.1 e na Tabela 3.2, respectivamente.

Tabela 3.1 – Lista de Sequência de Rede do sistema de 10 barras

TRECHO	DE	PARA	RELIGADOR	CHAVE	BACK	LAST
1	1	2	1	0	0	0
2	2	3	1	0	1	0
3	2	8	1	0	1	0
4	3	4	0	0	2	0
5	3	6	0	0	2	0
6	4	5	0	0	4	1
7	6	7	1	0	5	1
8	8	9	0	0	3	0
9	9	10	1	0	8	1

Tabela 3.2 – Matriz dos Trechos de Rede do sistema de 10 barras

1	2	4	6
1	2	5	7
1	3	8	9

Para este sistema foram simuladas faltas nos trechos mostrados na Figura 3.2, identificadas pelas letras em vermelho, de “a” até “c”.

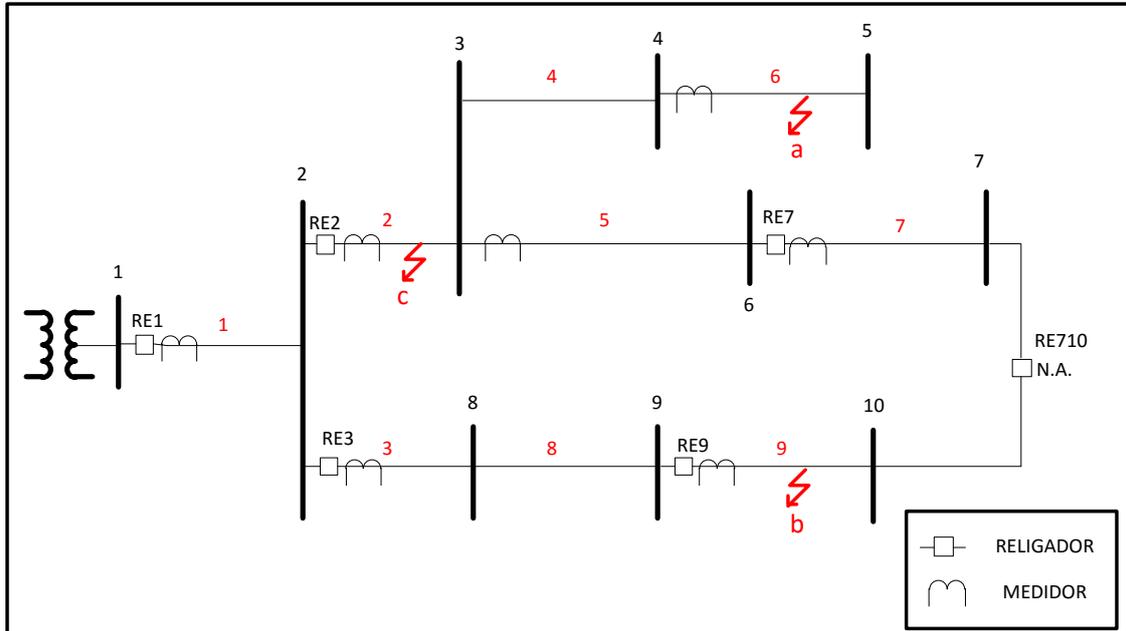


Figura 3.2 – Faltas simuladas no sistema de 10 barras

3.2.1 Resultados no Sistema de 10 Barras

Falta “a”:

A falta “a” foi simulada no trecho 6 entre as barras 4 e 5 do sistema, e o modelo de ação do algoritmo é o mesmo explicado e mostrado na Figura 2.12, com o critério de prioridade definido pela reenergização do maior número de barras.

Após realizadas todas as análises por parte do algoritmo, explicadas no Capítulo 2, as seguintes informações de saída foram obtidas, conforme a Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Dados de saída para a falta no trecho 6 do sistema de 10 barras

SISTEMA 10 BARRAS					
FALTA TRECHO 6 (BARRAS 4-5)					
Localização da Falta	Trecho	Barra “DE”		Barra “PARA”	
	6	4		5	
Abrangência da Localização da Falta (nenhuma possibilidade de chaveamentos)	Trecho	Barra “DE”		Barra “PARA”	
	6	4		5	
Equipamento que Atuou para Isolar a Falta	Trecho - Religador	Barra “DE”		Barra “PARA”	
	2 - RE2	2		3	
Barras Ilhadas (sem possibilidade de reenergização)	3, 4, 5, e 6				
“RAMO DE REALOCAÇÃO”					
AVALIANDO A POSSIBILIDADE DE REALOCAÇÃO DE CARGA A JUSANTE DO TRECHO 7 (ENTRE AS BARRAS 6 E 7):					
Lista de Possibilidades	Conexão entre as Barras			Conexão é Viável?	N° de Barras Reenergizadas por esta Conexão
1	7	10		SIM	1
Configuração Escolhida	Religador a ser Aberto para Realocar Cargas			Barras Reenergizadas pela Conexão	
	Trecho-Religador	Barra “DE”	Barra “PARA”		
1	7-RE7	6	7	7	
Barras não Reenergizadas à Jusante deste RAMO DE REALOCAÇÃO				--	

Observando as informações da Tabela 3.3, verifica-se que o algoritmo atuou de forma correta, uma vez que a falta foi detectada pelo medidor do próprio trecho 6, sendo esta a única região de abrangência da falta (região na qual a falta pode ter ocorrido). Uma vez que o primeiro equipamento de seccionamento à montante da falta é o religador no trecho 2, as barras 3, 4, 5 e 6 permanecerão ilhadas sem a possibilidade de reenergização até que o defeito seja corrigido no sistema.

O único **RAMO DE REALOCAÇÃO** encontrado à jusante do trecho onde o dispositivo de proteção isolou a falta (trecho 2), encontra-se no trecho 7 do sistema.

Após a execução algoritmo proposto, as seguintes informações de saída foram obtidas, conforme apresentada na Tabela 3.4. Não há mudanças na Lista de Sequência de Rede e na Matriz de Trechos de Rede do respectivo sistema.

Tabela 3.4 – Dados de saída para a falta no trecho 9 do sistema de 10 barras

SISTEMA 10 BARRAS			
FALTA TRECHO 9 (BARRAS 9-10)			
Localização da Falta	Trecho	Barra “DE”	Barra “PARA”
	9	9	10
Abrangência da Localização da Falta (nenhuma possibilidade de chaveamentos)	Trecho	Barra “DE”	Barra “PARA”
	9	9	10
Equipamento que Atuou para Isolar a Falta	Trecho - Religador	Barra “DE”	Barra “PARA”
	9 – RE9	9	10
Barras Ilhadas (sem possibilidade de reenergização)	10		
“RAMO DE REALOCAÇÃO”			
NÃO FOI ENCONTRADO NENHUM TRECHO À JUSANTE DA REGIÃO DE ABRANGÊNCIA DA FALTA E COM UM DISPOSITIVO DE SECCIONAMENTO CAPAZ DE ISOLAR ESTA REGIÃO.			

Novamente, observando a Tabela 3.4, verifica-se que as informações dadas pelo algoritmo conferem com o esperado, pois uma falta no trecho 9 do sistema da Figura 3.1 será identificada e mitigada pelo medidor e pelo religador do próprio trecho 9 (RE9).

Como a única conexão existente à jusante do trecho em falta encontra-se no próprio trecho, é impossível realizar uma realocação de cargas, uma vez que a barra 10 encontra-se dentro da região de abrangência desta falta.

Logo, o algoritmo informa que a barra 10 permanecerá desenergizada e que não há possibilidades de realocação para esta falta. O tempo de simulação para este teste foi ainda menor que no caso anterior, em torno de 0,6 s.

Falta “c”:

A falta “c” foi simulada entre as barras 2-3 do sistema da Figura 3.1 (trecho 2). Para esta falta foi definida que a prioridade seria a reenergização de uma barra prioritária, que neste caso foi definida como a barra 7 da Figura 3.1.

Após realizadas todas as análises por parte do algoritmo, as seguintes informações de saída foram obtidas, conforme a Tabela 3.5. Novamente, não há mudanças na Lista de Sequência de Rede e na Matriz de Trechos de Rede do sistema.

Tabela 3.5 – Dados de saída para a falta no trecho 2 do sistema de 10 barras

SISTEMA 10 BARRAS				
FALTA TRECHO 2 (BARRAS 2-3)				
Localização da Falta	Trecho		Barra “DE”	Barra “PARA”
	2		2	3
Abrangência da Localização da Falta (nenhuma possibilidade de chaveamentos)	Trecho		Barra “DE”	Barra “PARA”
	2		2	3
	4		3	4
Equipamento que Atuou para Isolar a Falta	Trecho-Religador		Barra “DE”	Barra “PARA”
	2 – RE2		2	3
Barras Ilhadas (sem possibilidade de reenergização)	3, 4, 5, e 6			
“RAMO DE REALOCAÇÃO”				
AVALIANDO A POSSIBILIDADE DE REALOCAÇÃO DE CARGA A JUSANTE DO TRECHO 7 (ENTRE AS BARRAS 6 E 7):				
Lista de Possibilidades	Conexão entre as Barras		Conexão é Viável?	Nº de Barras Reenergizadas por esta Conexão
1	7	10	SIM	1
Configuração Escolhida	Religador a ser Aberto para Realocar Cargas			Barras Prioritárias Reenergizadas pela Conexão
	Trecho-Religador	Barra “DE”	Barra “PARA”	
1	7-RE7	6	7	7
Barras não Reenergizadas à Jusante deste RAMO DE REALOCAÇÃO			--	

As informações de saída do algoritmo para a falta no trecho 2 do sistema são muito próximas às informações para a falta no trecho 6, uma vez que o mesmo religador, presente no trecho 2, atua para isolar a falta.

As diferenças existem na região onde a falta foi detectada (trecho 2) e na abrangência da localização da mesma, pois quando o medidor do trecho 2 é o medidor mais distante que identifica correntes de falta, que pode ter ocorrido neste próprio trecho como também no trecho 4 (entre as barras 3-4), uma vez que o trecho 4 não possui nenhum medidor. O mesmo não ocorre com o trecho 5 (entre as barras 3-6), pois neste trecho existe um dispositivo de medição de corrente que não indicou correntes de falta, garantindo assim que a mesma não ocorreu neste local do sistema.

O tempo de simulação observado foi de aproximadamente 1s. Assim, para todas as simulações descritas para o sistema de 10 barras, o algoritmo demonstrou eficácia nas informações dadas e foi capaz de realizar, quando possível, a realocação de cargas em pouco tempo.

3.3 Testes com o Sistema de 21 Barras

Na Figura 3.4 é apresentado um sistema com 21 barras, 3 alimentadores (sendo dois alimentadores radiais sem ramificação e um alimentador ramificado). Este sistema possui 8 religadores N.F., 3 religadores N.A. e 6 chaves seccionadoras, sendo 2 religadores de interconexão entre alimentadores e 1 religador de conexão entre ramais do mesmo alimentador.

Ao todo, três faltas foram simuladas, nomeadas de “a”, “b” e “c”, mostradas na Figura 3.4. Para as faltas simuladas neste sistema, e nos sistemas de 50 e 150 barras, apresentados nas próximas seções, o critério de prioridade escolhido foi a reenergização do maior número possível de barras.

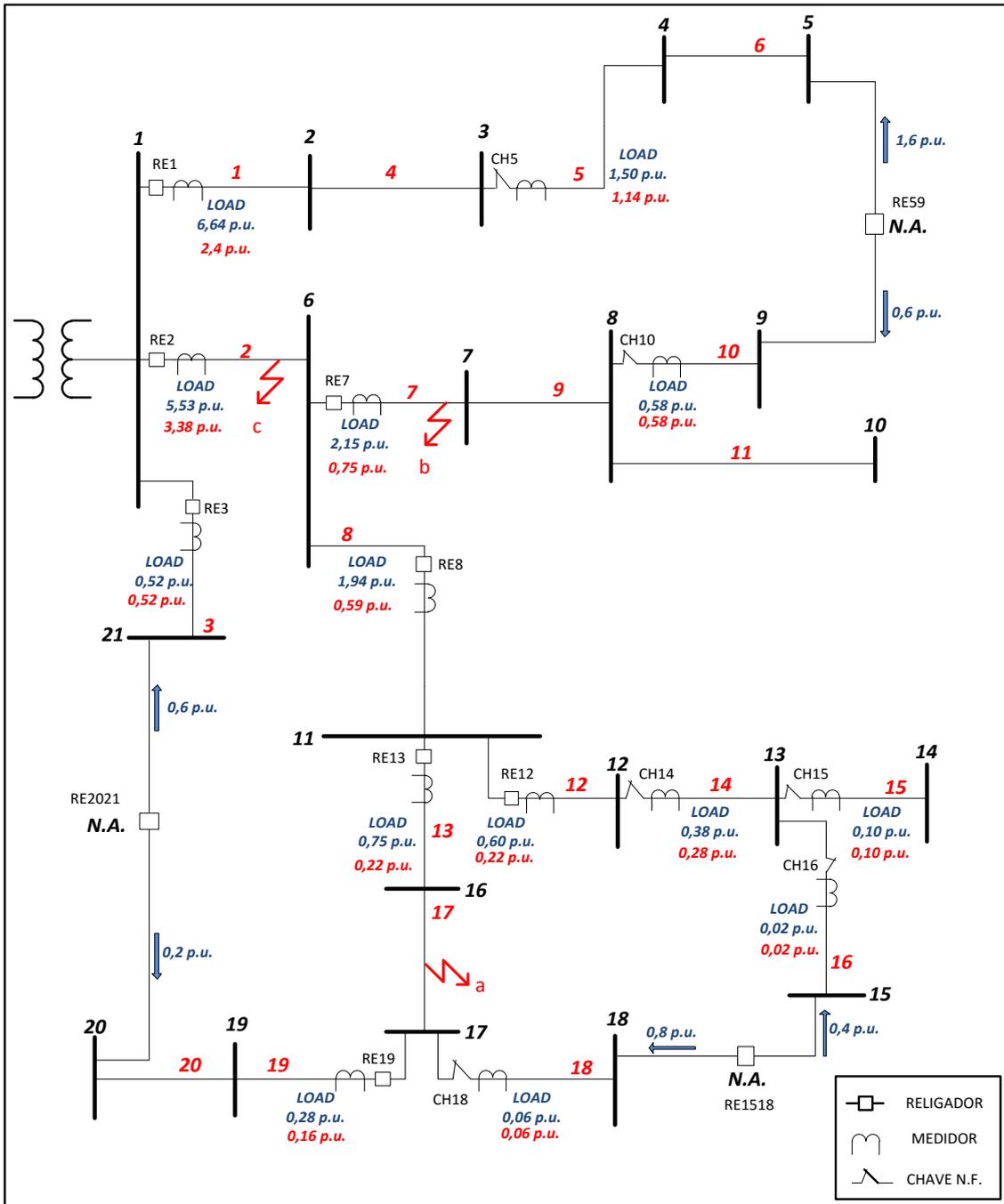


Figura 3.4 – Representação do sistema de 21 barras, com indicação das faltas simuladas

A Lista de Sequência de Rede e a Matriz de Trechos da Rede deste sistema estão mostradas na Tabela 3.6 e na Tabela 3.7, respectivamente.

Tabela 3.6 – Lista de Sequência de Rede para o sistema de 21 barras

<i>TRECHO</i>	<i>DE</i>	<i>PARA</i>	<i>RELIGADOR</i>	<i>CHAVE</i>	<i>BACK</i>	<i>LAST</i>
1	1	2	1	0	0	0
2	1	6	1	0	0	0
3	1	21	1	0	0	1
4	2	3	0	0	1	0
5	3	4	0	1	4	0
6	4	5	0	0	5	1
7	6	7	1	0	2	0
8	6	11	1	0	2	0
9	7	8	0	0	7	0
10	8	9	0	1	9	1
11	8	10	0	0	9	1
12	11	12	1	0	8	0
13	11	16	1	0	8	0
14	12	13	0	1	12	0
15	13	14	0	1	14	1
16	13	15	0	1	14	1
17	16	17	0	0	13	0
18	17	18	0	1	17	1
19	17	18	1	0	17	0
20	19	20	0	0	19	1

Tabela 3.7 – Matriz dos Trechos de Rede para o sistema de 21 barras

<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>3</i>
<i>0</i>	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
<i>0</i>	<i>0</i>	<i>2</i>	<i>7</i>	<i>9</i>	<i>10</i>
<i>0</i>	<i>0</i>	<i>2</i>	<i>7</i>	<i>9</i>	<i>11</i>
<i>0</i>	<i>2</i>	<i>8</i>	<i>12</i>	<i>14</i>	<i>15</i>
<i>0</i>	<i>2</i>	<i>8</i>	<i>12</i>	<i>14</i>	<i>16</i>
<i>0</i>	<i>2</i>	<i>8</i>	<i>13</i>	<i>17</i>	<i>18</i>
<i>2</i>	<i>8</i>	<i>13</i>	<i>17</i>	<i>19</i>	<i>20</i>

3.3.1 Resultados no Sistema de 21 Barras

Falta “a”:

A falta “a” foi simulada no trecho entre as barras 16 e 17 (trecho 17) do sistema da Figura 3.4.

Depois da execução do algoritmo proposto, as seguintes informações de saída foram obtidas (Tabela 3.8).

Tabela 3.8 - Dados de saída para a falta no trecho 17 do sistema de 21 barras

SISTEMA 21 BARRAS					
FALTA TRECHO 17 (BARRAS 16-17)					
Localização da Falta	Trecho		Barra “DE”	Barra “PARA”	
	13		11	16	
Abrangência da Localização da Falta (nenhuma possibilidade de chaveamentos)	Trecho		Barra “DE”	Barra “PARA”	
	13		11	16	
	17		16	17	
Equipamento que Atuou para Isolar a Falta	Trecho-Religador		Barra “DE”	Barra “PARA”	
	13-RE13		11	16	
Barras Ilhadas (sem possibilidade de reenergização)	16 e 17				
“RAMO_DE_REALOCAÇÃO” I					
AVALIANDO A POSSIBILIDADE DE REALOCAÇÃO DE CARGA A JUSANTE DO TRECHO 18 (ENTRE AS BARRAS 17 E 18):					
Lista de Possibilidades	Conexão entre as Barras			Conexão é Viável?	N° de Barras Reenergizadas por esta Conexão
1	18	15		SIM	1
Configuração Escolhida	Chave Seccionadora a ser Aberta para Realocar Cargas			Barras Reenergizadas pela Conexão	
	Trecho-Chave	Barra “DE”	Barra “PARA”		
1	18-CH18	17	18	18	
Barras não Reenergizadas à Jusante deste “ramo realo”			--		

“RAMO_REALOCAÇÃO” 2				
AVALIANDO A POSSIBILIDADE DE REALOCAÇÃO DE CARGA A JUSANTE DO TRECHO 19				
(ENTRE AS BARRAS 17 E 19):				
<i>Lista de Possibilidades</i>	<i>Conexão entre as Barras</i>		<i>Conexão é Viável?</i>	<i>N° de Barras Reenergizadas por esta Conexão</i>
<i>1</i>	<i>20</i>	<i>21</i>	<i>NÃO</i> <i>A carga extra não é suportada pelo outro ramal</i>	<i>0</i>
<i>Barras não Reenergizadas à Jusante deste RAMO DE REALOCAÇÃO</i>			<i>19 e 20</i>	

Observando a Tabela 3.8, verifica-se que o algoritmo apresentou resultados corretos, uma vez que o medidor mais perto da falta que detectou a falha foi o medidor instalado no trecho 13 (entre as barras 11-16), e a região de abrangência da falta obtida pelo algoritmo, engloba os trechos 13 e 17. Indica-se que a falta ocorreu no trecho 17, mas existem dispositivos de medições apenas no trecho 13, logo este medidor indicou a falta. Nota-se também que não existe possibilidade de restauração das barras 16 e 17.

Dois *RAMOS DE REALOCAÇÃO* foram encontrados. O primeiro corresponde ao trecho 18 (entre as barras 17-18) e o segundo corresponde ao trecho 19 (entre as barras 17-19). Em ambos os trechos existe a presença de algum dispositivo de seccionamento (CH18 e RE19, respectivamente) e ambos estão fora da região de abrangência da falta.

O algoritmo então passa a verificar ambos os *RAMOS DE REALOCAÇÃO*, iniciando pelo primeiro (trecho 18). À jusante deste foi encontrada uma conexão, entre as barras 18-15. Como a capacidade de carregamento do outro ramal (0,8 p.u.) é superior à carga estimada à jusante do *RAMO DE REALOCAÇÃO* específico, a conexão é viável e pode reenergizar uma barra, a 18. Sendo assim, esta conexão será escolhida para este *RAMO DE REALOCAÇÃO*.

Com relação ao segundo *RAMO DE REALOCAÇÃO*, presente no trecho 19, o algoritmo novamente encontra uma conexão à jusante do mesmo, porém a capacidade de carregamento do outro ramal é menor que a carga do próprio trecho 19 e à jusante dele (0,2 p.u. contra 0,28 p.u.). Desta forma o algoritmo informa que tal conexão não é viável, pois a carga não é suportada pelo outro ramal, e informa que as barras 19 e 20 também ficarão desenergizadas até que o defeito no sistema seja corrigido.

Toda a simulação foi realizada em 0,9 segundos.

Falta “b”:

A falta “b” foi simulada no trecho entre as barras 6 e 7 do sistema (trecho 7).

Após a mudança no ponto onde a falta ocorreu e realizadas todas as simulações por parte do algoritmo, os resultados obtidos estão dispostos na Tabela 3.9, e definem todas as medidas para que a maior parte do sistema seja reenergizada.

Tabela 3.9 - Dados de saída para a falta no trecho 7 do sistema de 21 barras

SISTEMA 21 BARRAS			
FALTA TRECHO 7 (BARRAS 6-7)			
Localização da Falta	Trecho	Barra “DE”	Barra “PARA”
	7	6	7
Abrangência da Localização da Falta (nenhuma possibilidade de chaveamentos)	Trecho	Barra “DE”	Barra “PARA”
	7	6	7
	9	7	8
	11	8	10
Equipamento que Atuou para Isolar a Falta	Trecho-Religador	Barra “DE”	Barra “PARA”
	7-RE7	6	7
Barras Ilhadas (sem possibilidade de reenergização)	7, 8 e 10		
“RAMO DE REALOCAÇÃO” 1			
AVALIANDO A POSSIBILIDADE DE REALOCAÇÃO DE CARGA A JUSANTE DO TRECHO 10 (ENTRE AS BARRAS 8 E 9):			
Lista de Possibilidades	Conexão entre as Barras		Conexão é Viável?
1	9	5	SIM
Configuração Escolhida	Chave Seccionadora a ser Aberta para Realocar Cargas		
	Trecho-Chave	Barra “DE”	Barra “PARA”
1	10-CH10	8	9
Barras não Reenergizadas à Jusante deste RAMO DE REALOCAÇÃO		--	

Novamente, verifica-se que os dados de saída correspondem ao esperado, uma vez que o ponto mais distante que localizou a falta é o medidor do trecho 7, e que a região de abrangência da falta corresponde aos trechos 7, 9 e 11.

Como o religador no trecho 7 atuou para isolar a falta, as barras 7, 8 e 10 ficaram ilhadas, sem possibilidade de realocar cargas. A simulação foi realizada em um tempo de 0,8 s.

Falta “c”:

A falta “c” foi simulada no trecho entre as barras 1 e 6 do sistema (trecho 2).

Para a simulação desta falta, foi realizada uma modificação na capacidade de carregamento extra da conexão entre as barras 20-21, conforme mostrado em destaque na Figura 3.5. Esta modificação foi realizada para que esta conexão pudesse assumir a carga extra e assim verificar se o algoritmo continua a responder de forma correta.

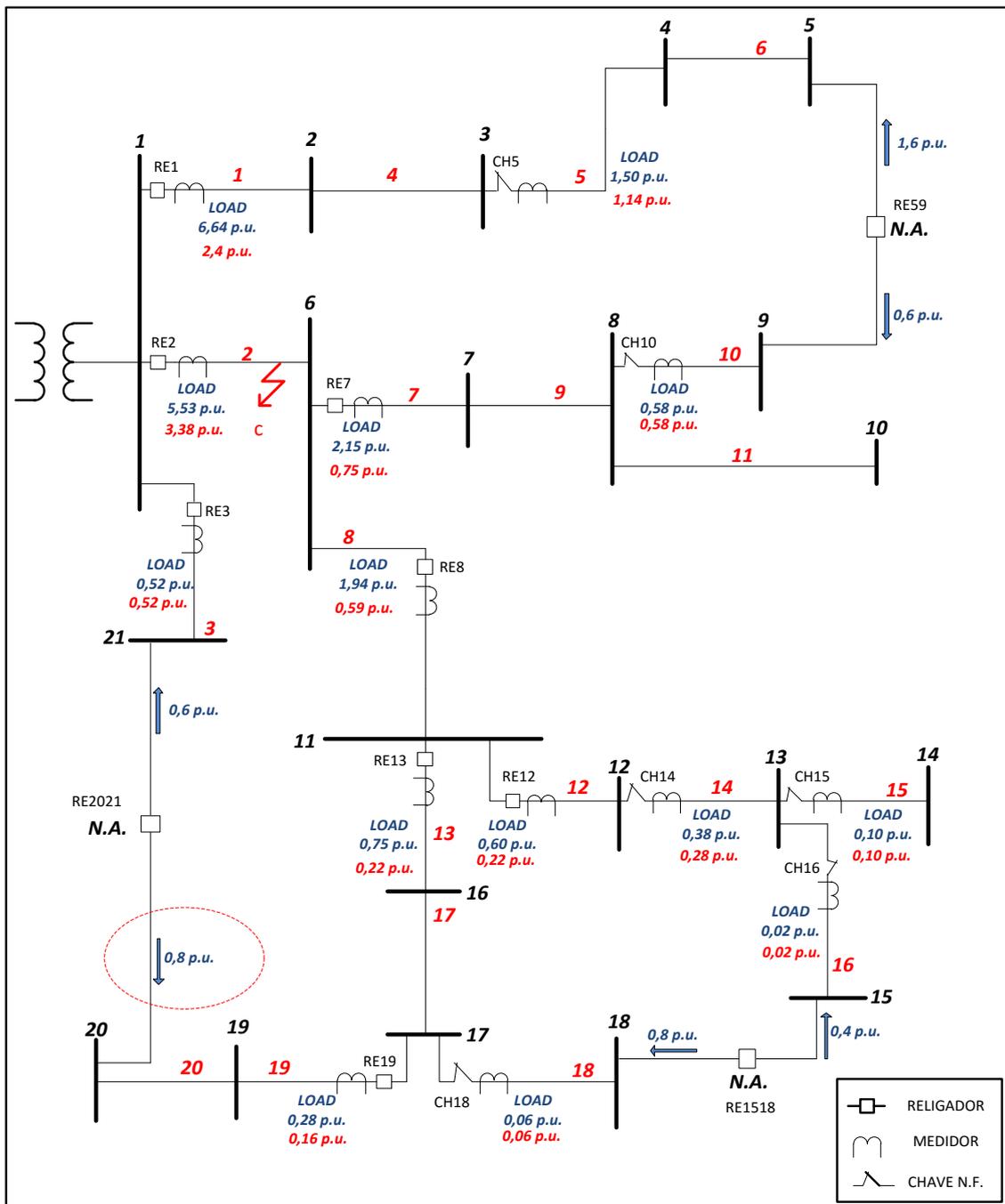


Figura 3.5 – Sistema de 21 barras com modificação para simulação da falta “c”

Sendo realizadas tais modificações no sistema de 21 barras e simulada a falta no trecho 2, os dados de saída desta nova simulação serão diferentes dos dados apresentados até o momento nas simulações das faltas “a” e “b”.

Todas as informações relativas à simulação na nova configuração da rede são mostradas na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 - Dados de saída para a falta no trecho 2 do sistema de 21 barras modificado

SISTEMA 21 BARRAS			
FALTA TRECHO 2 (BARRAS 1-6)			
<i>Localização da Falta</i>	<i>Trecho</i>	<i>Barra “DE”</i>	<i>Barra “PARA”</i>
	2	1	6
<i>Abrangência da Localização da Falta (nenhuma possibilidade de chaveamentos)</i>	<i>Trecho</i>	<i>Barra “DE”</i>	<i>Barra “PARA”</i>
	2	1	6
<i>Equipamento que Atuou para Isolar a Falta</i>	<i>Trecho-Religador</i>	<i>Barra “DE”</i>	<i>Barra “PARA”</i>
	2-RE2	1	6
<i>Barras Ilhadas (sem possibilidade de reenergização)</i>	6		
“RAMO DE REALOCAÇÃO” 1			
AVALIANDO A POSSIBILIDADE DE REALOCAÇÃO DE CARGA A JUSANTE DO TRECHO 7 (ENTRE AS BARRAS 6 E 7):			
<i>Lista de Possibilidades</i>	<i>Conexão entre as Barras</i>		<i>Conexão é Viável?</i>
1	9	5	SIM
<u>Configuração Escolhida</u>	<i>Chave Seccionadora a ser Aberta para Realocar Cargas</i>		
	<i>Trecho-Chave</i>	<i>Barra “DE”</i>	<i>Barra “PARA”</i>
1	10-CH10	8	9
<i>Barras não Reenergizadas à Jusante deste RAMO DE REALOCAÇÃO</i>		7, 8 e 10	
“RAMO DE REALOCAÇÃO” 2			
AVALIANDO A POSSIBILIDADE DE REALOCAÇÃO DE CARGA A JUSANTE DO TRECHO 8 (ENTRE AS BARRAS 6 E 11):			
<i>Lista de Possibilidades</i>	<i>Conexão entre as Barras</i>		<i>Conexão é Viável?</i>
	<i>DE</i>	<i>PARA</i>	
1	15	18	NÃO Outra barra encontra-se desenergizada
2	20	21	SIM

<u>Configuração</u> <u>Escolhida</u>	Religador a ser Aberto para Realocar Cargas			Barras Reenergizadas pela Conexão
	Trecho	Barra “DE”	Barra “PARA”	
2	13-RE13	11	16	16, 17, 18, 19 e 20
Barras não Reenergizadas à Jusante deste RAMO DE REALOCAÇÃO			11, 12, 13, 14 e 15	

A falta foi identificada pelo medidor no próprio trecho 2, e como existem religadores em todos os trechos imediatamente à jusante a barra 6, a região de abrangência da falta engloba somente o trecho 2, onde o religador atuou de forma a isolar a mesma, ficando assim somente a barra 6 sem nenhuma possibilidade de reenergização até que o defeito seja corrigido.

À jusante do trecho 2 existem dois *RAMOS DE REALOCAÇÃO*, que são trechos com algum dispositivo de seccionamento e também fora da região de abrangência da falta.

O primeiro *RAMO DE REALOCAÇÃO* analisado pelo algoritmo corresponde ao trecho 7 (entre as barras 6-7). À jusante deste trecho foi encontrada uma única conexão, que interliga as barras 9-5. Porém, analisando os dados de saída, observa-se que o trecho no qual a chave seccionadora foi escolhida para ser aberta corresponde o trecho 10 (entre as barras 8-9). Isso ocorreu devido ao limite de carga do outro alimentador estipulado na conexão entre as barras 9-5.

Toda a carga estimada à jusante deste *RAMO DE REALOCAÇÃO* corresponde a 2,15 p.u., sendo que a conexão só suporta 0,6 p.u.. Desta forma, o algoritmo passou a verificar os trechos à jusante deste *RAMO DE REALOCAÇÃO* a fim de encontrar outro trecho, com algum dispositivo seccionador, no qual a carga compreendida à jusante deste fosse suportada pelo outro alimentador, de forma a garantir que pelo menos alguma parte desta região do sistema pudesse ser realocada. Assim o trecho 10 foi encontrado, onde há a presença de uma chave seccionadora e a carga deste trecho é suportada pelo outro alimentador (0,58 p.u.). A barra 9 pôde ser reenergizada, porém as barras 7,8 e 10 não puderam ser (o que não ocorreria caso o outro ramal suportasse toda a carga estimada no trecho 7 e à jusante deste).

O segundo “*RAMO DE REALOCAÇÃO*” analisado é o trecho 8 (entre as barras 6-11). À jusante deste foram encontradas 3 conexões com chaves NA, pois o algoritmo

analisa as conexões 18-15 e 15-18 de forma separada, mesmo que seja fisicamente a mesma conexão. A terceira conexão ligando as barras 20-21.

Analisando a conexão 15-18 (e 18-15) o algoritmo verifica que ambos os lados desta conexão estão desenergizados, logo a transferência de carga não é possível. Já para a terceira conexão, entre as barras 20-21, o algoritmo verifica que a barra 21 está energizada, desta forma esta conexão é passível de ser estabelecida.

O algoritmo verifica que a carga estimada para o trecho 8 e os trechos à jusante do mesmo é 1,94 p.u., não sendo suportada de forma integral pelo outro alimentador da conexão que possui capacidade máxima de 0,8 p.u.. Logo, o algoritmo passa a percorrer os trechos à jusante do trecho 8 e criar uma árvore de alternativas a fim de encontrar um trecho que possua um dispositivo de seccionamento e cuja carga seja suportada pelo outro ramal da conexão 20-21.

Assim, o trecho 13 (entre as barras 11-16) é encontrado, o qual possui um religador que pode ser aberto e sua carga é suportada pelo outro ramal (0,75 p.u.). Desta forma as barras 16, 17, 18, 19 e 20 são reenergizadas, porém as barras 11, 12, 13, 14 e 15 não poderão ser, até que o defeito seja corrigido no sistema.

A Figura 3.6 mostra como ficou a nova configuração do sistema após a falta “c” ser isolada e o sistema ser restaurado pelo algoritmo, onde os trechos e barras em azul correspondem aos trechos e barras energizadas, e os trechos e barras em vermelho aos desenergizados, assim como os religadores em azul correspondem ao religadores e chaves seccionadoras fechadas e os em vermelho, aos religadores e chaves seccionadoras abertas. Novamente, pela Figura 3.6, após toda a reconfiguração (que foi realizada pelo algoritmo em 0,9s), o sistema permanece em uma topologia radial, como desejado.

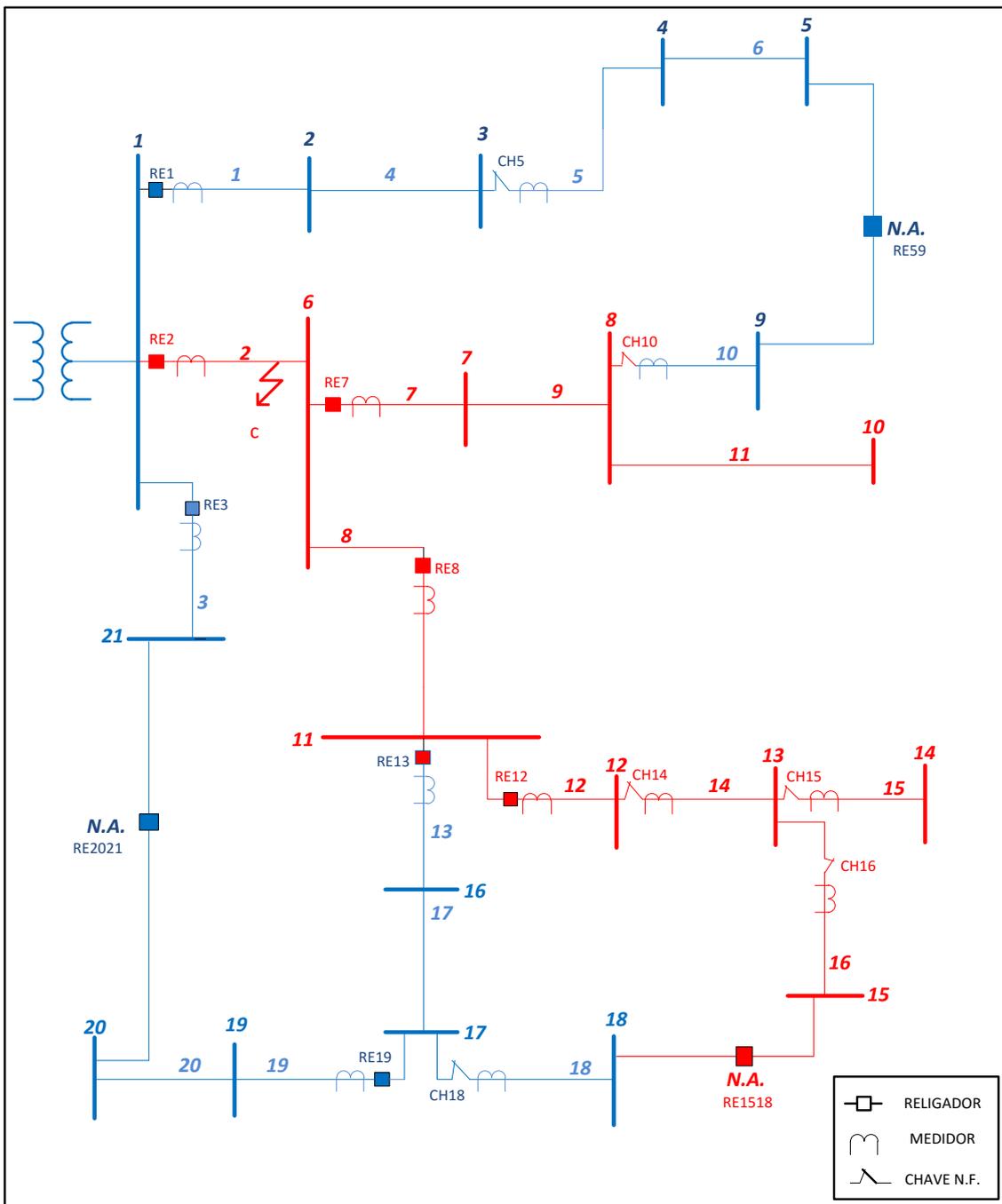


Figura 3.6 - Nova topologia do sistema de 21 barras após realocação de cargas

3.4 Testes com o Sistema de 50 Barras

O sistema de 50 barras é um típico sistema de distribuição radial, com grande área, 20 religadores N.F., 7 religadores N.A, 10 chaves seccionadoras e apenas um alimentador com várias ramificações. Este sistema possui 6 conexões, que interligam diferentes pontos do mesmo alimentador. Um esquema do sistema de 50 barras está

mostrado na Figura 3.7. Ainda na Figura 3.7 são mostradas algumas das faltas simuladas neste sistema, nos trechos 3 (barras 3-4), 27 (barras 16-17) e 40 (barras 36-37), e nomeadas de “a”, “b” e “c” respectivamente. Também são mostradas algumas cargas estimadas em alguns trechos do sistema.

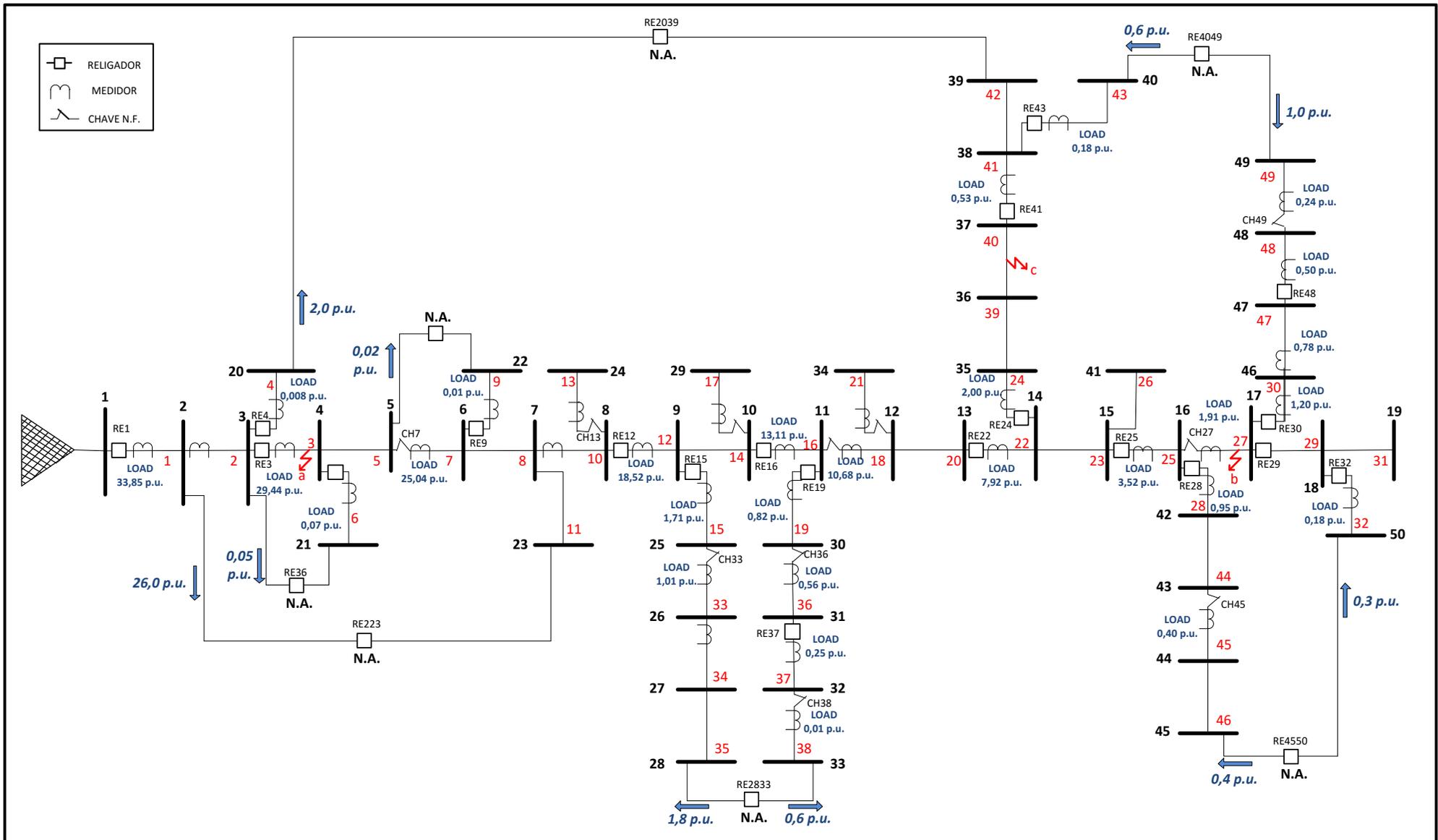


Figura 3.7 – Representação do sistema teste de 50 barras, com indicação de faltas simuladas

A Lista de Sequência de Rede e a Matriz de Trechos de Rede são apresentadas na Figura 3.8 e na Figura 3.9, respectivamente.

N. LINHA	DE	PARA	DISJ	CHAVE	back	Last
1	1	2	1	0	0	0
2	2	3	0	0	1	0
3	3	4	1	0	2	0
4	3	20	1	0	2	1
5	4	5	0	0	3	0
6	4	21	1	0	3	1
7	5	6	0	1	5	0
8	6	7	0	0	7	0
9	6	22	1	0	7	1
10	7	8	0	0	8	0
11	7	23	0	0	8	1
12	8	9	1	0	10	0
13	8	24	0	1	10	1
14	9	10	0	0	12	0
15	9	25	1	0	12	0
16	10	11	1	0	14	0
17	10	29	0	1	14	1
18	11	12	0	1	16	0
19	11	30	1	0	16	0
20	12	13	0	0	18	0
21	12	34	0	1	18	1
22	13	14	1	0	20	0
23	14	15	0	0	22	0
24	14	35	1	0	22	0
25	15	16	1	0	23	0
26	15	41	0	0	23	1
27	16	17	0	1	25	0
28	16	42	1	0	25	0

Figura 3.8 – Parte da Lista de Sequência de Rede do sistema de 50 barras

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	4		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	6	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	5	7	9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	5	7	8	11
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	5	7	8	10	13	17
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	5	7	8	10	12	14	17	17
0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	5	7	8	10	12	14	16	16	21	21	21
0	0	0	0	0	1	2	3	5	7	8	10	12	14	16	18	20	22	23	23	26	26
0	0	1	2	3	5	7	8	10	12	14	16	18	20	22	23	25	25	27	29	31	31
0	0	1	2	3	5	7	8	10	12	14	16	18	20	22	23	25	27	29	32	32	32
0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	5	7	8	10	12	14	16	19	33	34	35
0	0	0	0	0	0	1	2	3	5	7	8	10	12	14	16	19	36	37	38	38	38
0	0	1	2	3	5	7	8	10	12	14	16	18	20	22	24	24	39	40	41	42	42
0	0	1	2	3	5	7	8	10	12	14	16	18	20	22	24	39	40	41	43	43	43
0	1	2	3	5	7	8	10	12	14	16	18	20	22	23	25	28	44	45	46	46	46
1	2	3	5	7	8	10	12	14	16	18	20	22	23	25	27	30	47	48	49	49	49

Figura 3.9 – Matriz dos Trechos de Rede do sistema de 50 barras

3.4.1 Resultados no Sistema de 50 Barras

Falta “a”:

A falta “a” foi simulada no trecho entre as barras 3 e 4 (trecho 3) do sistema da Figura 3.7, e a simulação ocorreu em cerca de 1,3 segundos.

Após as análises realizadas pelo algoritmo, a partir da localização da falta e da disposição dos dispositivos de seccionamento existentes, os resultados obtidos são mostrados na Tabela 3.11, revelando a nova configuração do sistema no estado pós-falta.

Tabela 3.11 - Dados de saída para a falta no trecho 3 do sistema de 50 barras

SISTEMA 50 BARRAS			
FALTA TRECHO 3 (BARRAS 3-4)			
Localização da Falta	Trecho	Barra “DE”	Barra “PARA”
	3	3	4
Abrangência da Localização da Falta (nenhuma possibilidade de chaveamentos)	Trecho	Barra “DE”	Barra “PARA”
	3	3	4
	5	4	5
Equipamento que Atuou para Isolar a Falta	Trecho-Religador	Barra “DE”	Barra “PARA”
	3-RE3	3	4
Barras Ilhadas (sem possibilidade de reenergização)	4 e 5		
“RAMO DE REALOCAÇÃO” 1			
AVALIANDO A POSSIBILIDADE DE REALOCAÇÃO DE CARGA A JUSANTE DO TRECHO 6 (ENTRE AS BARRAS 4 E 21):			
Lista de Possibilidades	Conexão entre as Barras		Conexão é Viável?
1	21	3	NÃO A carga extra não é suportada pelo outro ramal
Barras não Reenergizadas à Jusante deste RAMO DE REALOCAÇÃO		21	

“RAMO DE REALOCAÇÃO” 2				
AVALIANDO A POSSIBILIDADE DE REALOCAÇÃO DE CARGA A JUSANTE DO TRECHO 7 (ENTRE AS BARRAS 5 E 6):				
Lista de Possibilidades	Conexão entre as Barras		Conexão é Viável?	N° de Barras Reenergizadas por esta Conexão
	DE	PARA		
2	23	2	SIM	43
6	39	20	SIM	6
Configuração Escolhida	Chave Seccionadora a ser Aberta para Realocar Cargas			Barras Reenergizadas pela Conexão
	Trecho-Chave	Barra “DE”	Barra “PARA”	
2	7-CH7	5	6	6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49 e 50
Barras não Reenergizadas à Jusante deste RAMO DE REALOCAÇÃO			--	

Novamente os dados de saída do algoritmo são coerentes com o esperado. O trecho mais distante que detectou a falta foi o trecho 3, e a abrangência da falta compreende os trechos 3 e 5, já que entre as barras 4-5 não existe algum medidor dos níveis de corrente. Como o próprio religador do trecho 3 (RE3) atuou a fim de isolar a falta, as barras 4 e 5 não possuem a possibilidade de serem reenergizadas até que o respectivo defeito seja corrigido.

Dois *RAMOS DE REALOCAÇÃO* foram encontrados. O primeiro é o trecho 6, compreendido entre as barras 4-21. À jusante deste *RAMO DE REALOCAÇÃO* apenas uma conexão foi encontrada, e como a carga do trecho 6 (0,07 p.u.) é maior que o suportado pela conexão (0,05 p.u.), a conexão não foi estabelecida pelo algoritmo. Assim, a barra 21 não pôde ser realocada.

O segundo *RAMO DE REALOCAÇÃO* é o trecho 7 (barras 5-6). À jusante deste trecho foram encontrados 9 pontos de conexões, que não foram mostradas na Tabela 3.11 para não torná-la muito extensa, mas estão mostradas na Tabela 3.12.

Tabela 3.12 – Conexões encontradas pelo algoritmo no sistema de 50 barras

<i>Conexão</i>	<i>Conexão entre as Barras</i>		<i>Conexão é Viável?</i>	<i>N° de Barras Reenergizadas por esta Conexão</i>
1	21	3	NÃO Outra barra encontra-se desenergizada	0
2	23	2	SIM	43
3	50	45	NÃO Outra barra encontra-se desenergizada	0
4	28	33	NÃO Outra barra encontra-se desenergizada	0
5	33	28	NÃO Outra barra encontra-se desenergizada	0
6	39	20	SIM	6
7	40	49	NÃO Outra barra encontra-se desenergizada	0
8	45	50	NÃO Outra barra encontra-se desenergizada	0
9	49	40	NÃO Outra barra encontra-se desenergizada	0

Conforme a Tabela 3.12, as únicas conexões viáveis encontradas são as conexões 2 (barras 23-2) e 6 (barras 39-20). A conexão 2 pode reenergizar 43 barras (toda a parte à jusante do trecho 7) e a conexão 6 pode reenergizar 6 barras, compreendidas à jusante do trecho 24 (barras 35, 36, 37, 38, 39 e 40).

Desta forma, a conexão 2 foi a escolhida, e como a carga suportada (26,0 p.u.) é maior que a carga à jusante do trecho 7 (25,04 p.u.), a chave seccionadora do trecho 7 pode ser aberta, seguida pelo fechamento do religador N.A. da conexão 23-2. Ao todo 43 barras foram reenergizadas, não permanecendo nenhuma barra à jusante do trecho 7 desenergizada, conforme mostrado na Tabela 3.11.

A Figura 3.10 mostra como ficou a configuração topológica do sistema após as reconfigurações propostas pelo algoritmo após a falta “a”, onde a topologia do sistema

se manteve radial como desejado. Os termos em azul indicam os dispositivos energizados, e os termos em vermelho, os desenergizados.

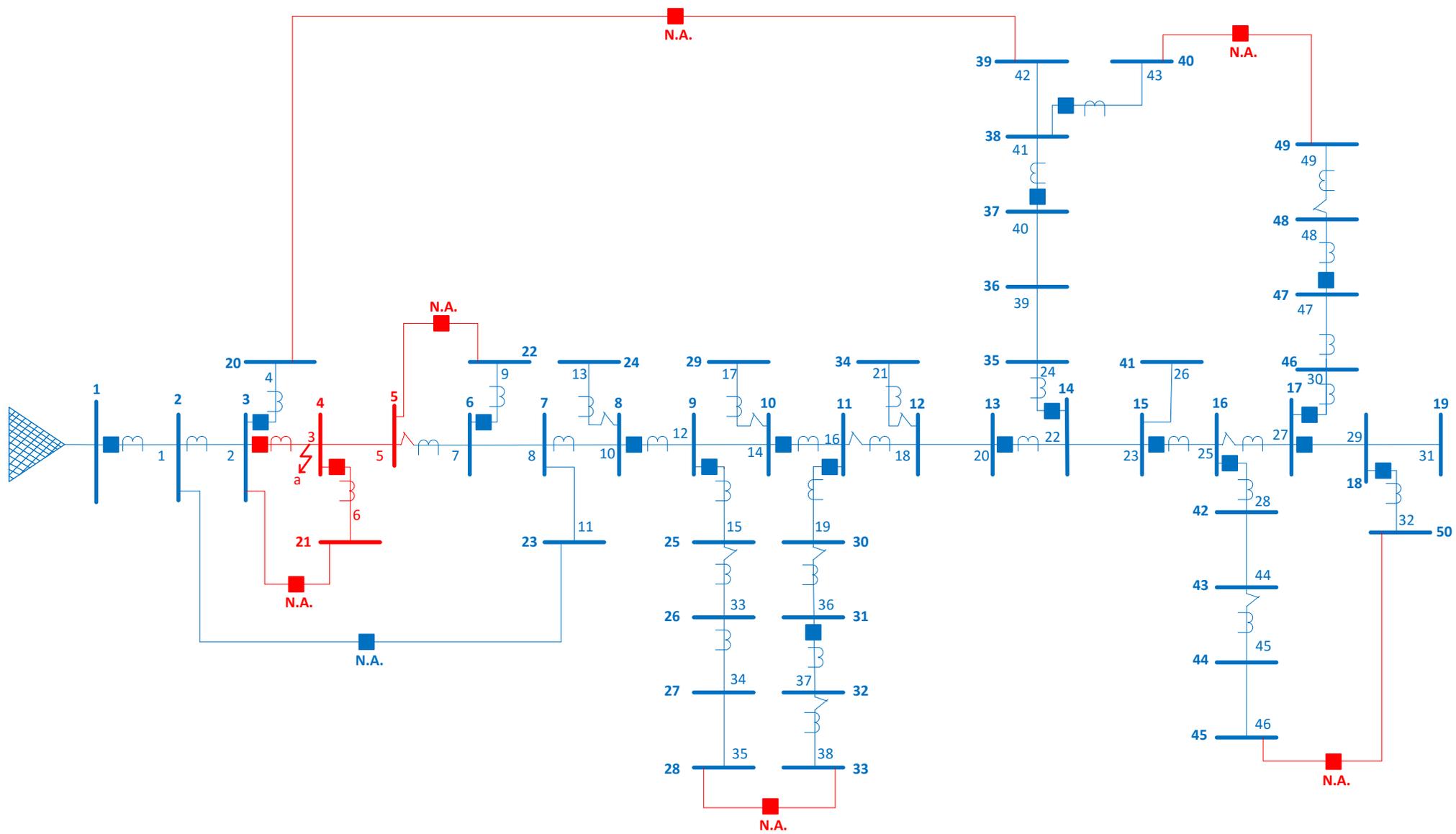


Figura 3.10 – Nova configuração do sistema de 50 barras após reconfiguração realizada pelo algoritmo

Falta “b”:

A falta “b” foi simulada no trecho entre as barras 16 e 17 (trecho 27) do sistema da Figura 3.7.

Após cerca de 1,06 segundos de simulação, a nova configuração do sistema esta mostrada na Tabela 3.13.

Tabela 3.13 - Dados de saída para a falta no trecho 27 do sistema de 50 barras

SISTEMA 50 BARRAS			
FALTA TRECHO 27 (BARRAS 16-17)			
Localização da Falta	Trecho	Barra “DE”	Barra “PARA”
	27	16	17
Abrangência da Localização da Falta (nenhuma possibilidade de chaveamentos)	Trecho	Barra “DE”	Barra “PARA”
	27	16	17
Equipamento que Atuou para Isolar a Falta	Trecho-Religador	Barra “DE”	Barra “PARA”
	25-RE25	16	17
Barras Ilhadas (sem possibilidade de reenergização)	16 e 17		
“RAMO DE REALOCAÇÃO” 1			
AVALIANDO A POSSIBILIDADE DE REALOCAÇÃO DE CARGA A JUSANTE DO TRECHO 28 (ENTRE AS BARRAS 16 E 42):			
Lista de Possibilidades	Conexão entre as Barras		Conexão é Viável?
1	45	50	NÃO Outra barra encontra-se desenergizada
Barras não Reenergizadas à Jusante deste RAMO DE REALOCAÇÃO		42, 43, 44 e 45	

“RAMO DE REALOCAÇÃO” 2				
AVALIANDO A POSSIBILIDADE DE REALOCAÇÃO DE CARGA A JUSANTE DO TRECHO 29				
(ENTRE AS BARRAS 17 E 18):				
Lista de Possibilidades	Conexão entre as Barras		Conexão é Viável?	N° de Barras Reenergizadas por esta Conexão
	DE	PARA		
<i>1</i>	50	45	<i>NÃO</i> <i>Outra barra encontra-se desenergizada</i>	0
Barras não Reenergizadas à Jusante deste RAMO DE REALOCAÇÃO			18, 19 e 50	
“RAMO DE REALOCAÇÃO” 3				
AVALIANDO A POSSIBILIDADE DE REALOCAÇÃO DE CARGA A JUSANTE DO TRECHO 30				
(ENTRE AS BARRAS 17 E 46):				
Lista de Possibilidades	Conexão entre as Barras		Conexão é Viável?	N° de Barras Reenergizadas por esta Conexão
	DE	PARA		
<i>1</i>	49	40	<i>SIM</i>	2
Configuração Escolhida	Religador a ser Aberto para Realocar Cargas			Barras Reenergizadas pela Conexão
	Trecho-Religador	Barra “DE”	Barra “PARA”	
<i>1</i>	48-RE48	47	48	48 e 49
Barras não Reenergizadas à Jusante deste RAMO DE REALOCAÇÃO				46 e 47

O trecho 27 corresponde ao trecho mais distante onde a falta foi identificada e ao trecho de abrangência da falta. E o religador RE25 do trecho 25 isolou a falta. As barras 16 e 17 ficaram desenergizadas sem possibilidade de reenergização.

Três RAMOS DE REALOCAÇÃO foram encontrados. O primeiro é o trecho 28 (barras 16-42). À jusante deste trecho foi encontrada uma conexão, entre as barras 45-50, porém como a barra 50 encontra-se desenergizada, a conexão não é viável, permanecendo as barras 42, 43, 44 e 45 desenergizadas.

O segundo RAMO DE REALOCAÇÃO corresponde ao trecho 29 (barras 17-18). Novamente uma única conexão foi encontrada à jusante do mesmo (50-45) e como a barra 45 encontra-se desenergizada, a conexão também não é viável, e as barras 18, 19 e 50 não serão realocadas.

O terceiro e último *RAMO DE REALOCAÇÃO* encontra-se no trecho 30 (barras 17-46). Desta vez, o algoritmo encontrou uma conexão viável à jusante do mesmo, a conexão 49-40. Porém o algoritmo observou que o limite de carregamento desta conexão (1,0 p.u.) é inferior à carga à jusante do trecho 30 (1,2 p.u.), sendo assim nem todas as barras à jusante deste *RAMO DE REALOCAÇÃO* poderão ser realocadas.

Assim, o algoritmo passa a realizar uma varredura nesta região a fim de encontrar um trecho que possua um dispositivo de seccionamento e que a carga do mesmo seja suportada pela conexão. A carga à jusante do trecho 47 já seria suportada pela conexão, porém neste trecho não há um dispositivo de seccionamento que possa transferir apenas a carga à jusante para a conexão. Assim, o trecho 48 é encontrado, onde há um religador (RE48) e a carga é suportada pela conexão (0,48 p.u.), logo o algoritmo decide por abrir este religador e transferir a carga presente nas barras 48 e 49. As barras 46 e 47 não puderam ser realocadas, devido ao limite de carga, conforme mostrado na Tabela 3.13.

Falta “c”:

A falta “c” foi simulada no trecho entre as barras 36 e 37 (trecho 40) do sistema da Figura 3.7.

Para esta simulação, o tempo decorrido foi de 1 segundo, e os seguintes dados de saída foram disponibilizados pelo algoritmo, conforme a Tabela 3.14, onde é mostrada a nova configuração do sistema para que a maior parte das barras desenergizadas sejam reenergizadas.

Tabela 3.14 - Dados de saída para a falta no trecho 40 do sistema de 50 barras

SISTEMA 50 BARRAS			
FALTA TRECHO 40 (BARRAS 36-37)			
Localização da Falta	Trecho	Barra “DE”	Barra “PARA”
	40	36	37
Abrangência da Localização da Falta (nenhuma possibilidade de chaveamentos)	Trecho	Barra “DE”	Barra “PARA”
	40	36	37

Equipamento que Atuou para Isolar a Falta	Trecho-Religador		Barra “DE”	Barra “PARA”
	24-RE24		14	35
Barras Ilhadas (sem possibilidade de reenergização)	35, 36 e 37			
“RAMO DE REALOCAÇÃO” I AVALIANDO A POSSIBILIDADE DE REALOCAÇÃO DE CARGA A JUSANTE DO TRECHO 41 (ENTRE AS BARRAS 37 E 38):				
Lista de Possibilidades	Conexão entre as Barras		Conexão é Viável?	N° de Barras Reenergizadas por esta Conexão
1	39	20	SIM	3
2	40	49	SIM	3
Configuração Escolhida	Religador a ser Aberto para Realocar Cargas			Barras Reenergizadas pela Conexão
	Trecho-Religador	Barra “DE”	Barra “PARA”	
1	41-RE41	37	38	38, 39 e 40
Barras não Reenergizadas à Jusante deste RAMO DE REALOCAÇÃO				--

Pela Tabela 3.14 observa-se que o algoritmo fez uma análise correta, uma vez que uma falta no trecho 40 seria identificada pelo medidor no próprio trecho, mas só seria isolada pelo religador presente no trecho 24 (RE24 entre as barras 14-35). A região de abrangência da falta seria somente o trecho 40 e as barras 35, 36 e 37 não poderão ser reenergizadas por nenhuma realocação possível.

O único *RAMO DE REALOCAÇÃO* à jusante é o trecho 41 (barras 37-38), onde à jusante do mesmo foram encontradas duas conexões, ambas viáveis e que reenergizam o mesmo número de barras, as conexões entre as barras 39-20 e entre 40-49.

Como o número de barras reenergizadas é o mesmo, o algoritmo dá prioridade à primeira conexão encontrada, neste caso aquela entre as barras 39-20. Estabelecida esta conexão, as barras 38, 39 e 40 podem ser realocadas através da abertura do religador do trecho 41 e do fechamento do religador N.A. da conexão 39-20. Não há barras desenergizadas à jusante deste *RAMO DE REALOCAÇÃO* específico (trecho 41).

Mesmo para um sistema com mais barras e mais ramificações, o algoritmo se mostrou confiável, obtendo resultados corretos e informando as operações corretas para a realocação de cargas, quando possível.

3.5 Testes com o Sistema de 150 Barras

O último sistema analisado consiste em uma rede de distribuição de 150 barras, composta por três alimentadores principais que partem da mesma subestação, 15 religadores normalmente fechados (N.F.), 16 religadores normalmente abertos (N.A.) e 22 chaves seccionadoras. Possui ainda conexões que interligam os ramais a fim de realocar cargas em caso de defeitos em certos pontos do mesmo. O sistema está mostrado na Figura 3.11.

Para este sistema, quatro simulações de faltas são analisadas neste trabalho, são as faltas nos trechos 7 (barras 4-5), 29 (barras 16-17), 77 (barras 65-66) e no trecho 118 (barras 110-111), conforme mostradas na Figura 3.11, nomeadas de “a” até “d”.

Novamente, como a Lista de Sequência de Rede é muito extensa, apenas parte dela é apresentada na Figura 3.12, dividida em duas partes, indo do trecho 1 até o trecho 62. A Matriz dos Trechos de Rede é apresentada de forma integral na Figura 3.13, onde cada linha da matriz corresponde a todos os trechos que formam cada um dos ramais diferentes do sistema.

N. LINHA	DE	PARA	DISJ	CHAVE	back	Last	N. LINHA	DE	PARA	DISJ	CHAVE	back	Last
1	1	2	1	0	0	0	32	17	46	0	0	29	0
2	1	51	1	0	0	0	33	18	19	0	0	31	1
3	1	100	1	0	0	0	34	18	50	0	0	31	1
4	2	3	0	0	1	0	35	25	26	0	0	17	0
5	3	4	1	0	4	0	36	26	27	0	0	35	0
6	3	20	0	0	4	1	37	27	28	0	0	36	1
7	4	5	0	0	5	0	38	30	31	0	0	21	0
8	4	21	0	0	5	1	39	31	32	0	0	38	0
9	5	6	0	1	7	0	40	32	33	0	0	39	1
10	6	7	0	0	9	0	41	35	36	0	1	26	0
11	6	22	0	0	9	1	42	36	37	0	0	41	0
12	7	8	0	0	10	0	43	37	38	0	1	42	0
13	7	23	0	0	10	1	44	38	39	0	0	43	1
14	8	9	1	0	12	0	45	38	40	0	0	43	1
15	8	24	0	0	12	1	46	42	43	0	0	30	0
16	9	10	0	0	14	0	47	43	44	0	0	46	0
17	9	25	0	0	14	0	48	44	45	0	0	47	1
18	10	11	0	1	16	0	49	46	47	0	1	32	0
19	10	29	0	0	16	1	50	47	48	0	0	49	0
20	11	12	0	0	18	0	51	48	49	0	0	50	1
21	11	30	0	0	18	0	52	51	52	0	0	2	0
22	12	13	1	0	20	0	53	52	53	1	0	52	0
23	12	34	0	0	20	1	54	52	69	0	0	52	1
24	13	14	0	0	22	0	55	53	54	0	0	53	0
25	14	15	0	1	24	0	56	53	70	0	0	53	1
26	14	35	0	0	24	0	57	54	55	0	1	55	0
27	15	16	0	0	25	0	58	55	56	0	0	57	0
28	15	41	0	0	25	1	59	55	71	0	0	57	1
29	16	17	1	0	27	0	60	56	57	0	0	58	0
30	16	42	0	0	27	0	61	56	72	0	0	58	1
31	17	18	0	1	29	0	62	57	58	1	0	60	0

Figura 3.12 – Parte da Lista de Sequência de Rede do sistema de 150 barras

Tabela 3.15 - Dados de saída para a falta no trecho 7 do sistema de 150 barras

SISTEMA 150 BARRAS				
FALTA TRECHO 7 (BARRAS 4-5)				
Localização da Falta	Trecho		Barra “DE”	Barra “PARA”
	5		3	4
Abrangência da Localização da Falta (nenhuma possibilidade de chaveamentos)	Trecho		Barra “DE”	Barra “PARA”
	5		3	4
	7		4	5
	8		4	21
Equipamento que Atuou para Isolar a Falta	Trecho-Religador		Barra “DE”	Barra “PARA”
	5-RE5		3	4
Barras Ilhadas (sem possibilidade de reenergização)	4, 5 e 21			
“RAMO DE REALOCAÇÃO” 1				
AVALIANDO A POSSIBILIDADE DE REALOCAÇÃO DE CARGA A JUSANTE DO TRECHO 9 (ENTRE AS BARRAS 5 E 6):				
Lista de Possibilidades	Conexão entre as Barras		Conexão é Viável?	N° de Barras Reenergizadas por esta Conexão
1	9	58	SIM	37
3	13	62	SIM	30
4	19	99	SIM	3
Conexão Escolhida	Religador a ser Aberto para Realocar Cargas			Barras Reenergizadas pela Conexão
	Trecho-Religador	Barra “DE”	Barra “PARA”	
1	14-RE14	8	9	9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49 e 50
Barras não Reenergizadas à Jusante deste RAMO DE REALOCAÇÃO				6, 7, 8, 22, 23 e 24

Observando a Tabela 3.15 e o sistema de 150 barras da Figura 3.11, nota-se que as informações dadas pelo algoritmo são coerentes com o esperado para uma falta ocorrida no trecho 7, onde o medidor mais distante que detectou esta falta é o existente no trecho 5, sendo a região de abrangência desta falta compreendendo os trechos 5, 7 e 8. O único *RAMO DE REALOCAÇÃO* à jusante é o trecho 9, onde existe uma chave seccionadora. À jusante deste trecho foram encontradas 7 conexões no total, porém somente 3 delas foram viáveis e estão dispostas na Tabela 3.15. A Tabela 3.16 mostra todas as conexões encontradas pelo algoritmo.

Tabela 3.16 – Conexões encontradas no sistema 150 barras (falta trecho 7)

<i>Conexão</i>	<i>Conexão entre as Barras</i>		<i>Conexão é Viável?</i>	<i>N° de Barras Reenergizadas por esta Conexão</i>
1	9	58	<i>SIM</i>	37
2	29	49	<i>NÃO</i> <i>Outra barra encontra-se desenergizada</i>	0
3	13	62	<i>SIM</i>	30
4	19	99	<i>SIM</i>	3
5	40	21	<i>NÃO</i> <i>Outra barra encontra-se desenergizada</i>	0
6	49	29	<i>NÃO</i> <i>Outra barra encontra-se desenergizada</i>	0
7	49	94	<i>NÃO</i> <i>A carga extra não é suportada pelo outro ramal</i>	0

Somente as conexões de número 1, 3 e 4 são viáveis, uma vez que as conexões 2, 5 e 6 interligam partes desenergizadas do ramal e a conexão 7 não é viável pois a carga extra não é suportada pelo outro ramal, pois a carga estimada do trecho mais próximo a esta conexão (trecho 49) já contabiliza 0,78 p.u., contra 0,5 p.u. de carga suportada.

Dentre as conexões viáveis, a escolhida foi aquela que reenergiza o maior número de barras, logo a conexão 1. Porém nem toda a carga estimada à jusante do *RAMO DE REALOCAÇÃO* (trecho 9) é suportada, sendo escolhido então o próximo trecho com

carga estimada suportável à jusante, o trecho 14 (barras 8-9). Logo, o religador do trecho 14 (RE14) é aberto e o religador N.A. da conexão 9-58 (RE958) é fechado, reenergizando 37 barras. Como nem toda a carga estimada à jusante do *RAMO DE REALOCAÇÃO* é suportada, as barras 6, 7, 8, 22, 23 e 24 ficarão também desenergizadas até que o defeito seja corrigido.

A Figura 3.14 ajuda a entender a nova configuração do sistema após o restabelecimento, com os equipamentos energizados em azul e os desenergizados em vermelho.

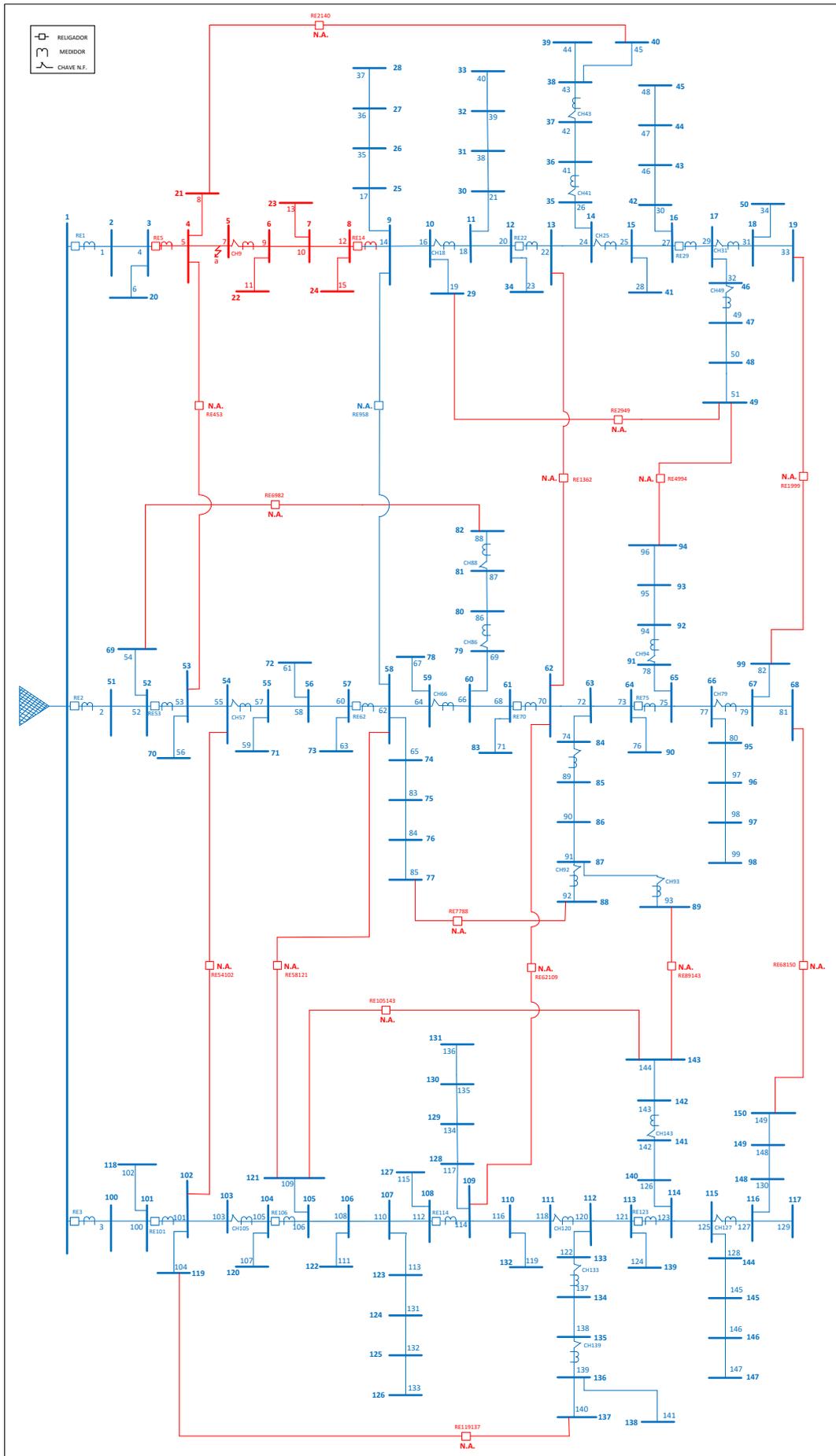


Figura 3.14 - Nova configuração do sistema de 150 barras

Falta “b”:

A falta “b” foi simulada em 1,05s, no trecho entre as barras 16 e 17 do sistema e os seguintes resultados foram obtidos, conforme a Tabela 3.17.

Tabela 3.17 - Dados de saída para a falta no trecho 29 do sistema de 150 barras

SISTEMA 150 BARRAS				
FALTA TRECHO 29 (BARRAS 16-17)				
Localização da Falta	Trecho		Barra “DE”	Barra “PARA”
	29		16	17
Abrangência da Localização da Falta (nenhuma possibilidade de chaveamentos)	Trecho		Barra “DE”	Barra “PARA”
	29		16	17
	32		17	46
Equipamento que Atuou para Isolar a Falta	Trecho-religador		Barra “DE”	Barra “PARA”
	29-RE29		16	17
Barras Ilhadas (sem possibilidade de reenergização)	17 e 46			
“RAMO DE REALOCAÇÃO” 1				
AVALIANDO A POSSIBILIDADE DE REALOCAÇÃO DE CARGA A JUSANTE DO TRECHO 31 (ENTRE AS BARRAS 17 E 18):				
Lista de Possibilidades	Conexão entre as Barras		Conexão é Viável?	N° de Barras Reenergizadas por esta Conexão
1	19	99	SIM	3
Configuração Escolhida	Chave Seccionadora a ser Aberta para Realocar Cargas			Barras Reenergizadas pela Conexão
	Trecho-Chave	Barra “DE”	Barra “PARA”	
1	31-CH31	17	18	18, 19 e 50
Barras não Reenergizadas à Jusante deste RAMO DE REALOCAÇÃO				--

“RAMO DE REALOCAÇÃO” 2				
AVALIANDO A POSSIBILIDADE DE REALOCAÇÃO DE CARGA A JUSANTE DO TRECHO 49 (ENTRE AS BARRAS 46 E 47):				
Lista de Possibilidades	Conexão entre as Barras		Conexão é Viável?	Nº de Barras Reenergizadas por esta Conexão
1	49	29	SIM	3
2	49	94	NÃO A carga extra não é suportada pelo outro ramal	0
Configuração Escolhida	Chave Seccionadora a ser Aberta para Realocar Cargas			Barras Reenergizadas pela Conexão
	Trecho-Chave	Barra “DE”	Barra “PARA”	
1	49-CH49	46	47	47, 48 e 49
Barras não Reenergizadas à Jusante deste RAMO DE REALOCAÇÃO				--

O trecho 29 corresponde à região de abrangência da falta (juntamente com o trecho 32) e é no próprio trecho 29 onde o religador (RE29) atuou a fim de isolar a falta, ficando as barras 17 e 46 desenergizadas e sem possibilidade de realocação.

Dois *RAMOS DE REALOCAÇÃO* foram encontrados, conforme a Tabela 3.17. O primeiro é o trecho 31 (barras 17-18), onde à jusante do mesmo foi encontrada uma conexão que é capaz de reenergizar 3 barras, 18, 19 e 50 (com a abertura da chave seccionadora do próprio trecho 31 - CH31).

O segundo *RAMO DE REALOCAÇÃO* corresponde ao trecho 49 (barras 46-47), onde à jusante foram encontradas duas conexões, uma com ligação com o próprio ramal (viável) e outra ligando este ramal com o adjacente (não viável pois a carga extra não é suportada pelo mesmo motivo explicado na simulação da falta “a”).

Sendo a conexão entre as barras 49-29 viável, ela foi a escolhida, reenergizando as barras 47, 48 e 49 com a abertura da chave seccionadora do trecho 49 (CH49) e o fechamento do religador N.A. da respectiva conexão (RE2949).

Falta “c”:

A falta “c” foi simulada no trecho entre as barras 65 e 66 (trecho 77) do sistema da Figura 3.11, em 1,1s.

A Tabela 3.18 indica as mudanças topológicas indicadas pelo algoritmo para o estado pós-falta a fim de reenergizar barras desenergizadas.

Tabela 3.18 - Dados de saída para a falta no trecho 77 do sistema de 150 barras

SISTEMA 150 BARRAS				
FALTA TRECHO 77 (BARRAS 65-66)				
Localização da Falta	Trecho	Barra “DE”	Barra “PARA”	
	75	64	65	
Abrangência da Localização da Falta (nenhuma possibilidade de chaveamentos)	Trecho	Barra “DE”	Barra “PARA”	
	75	64	65	
	77	65	66	
	78	65	91	
	80	66	95	
	97	95	96	
	98	96	97	
	99	97	98	
Equipamento que Atuou para Isolar a Falta	Trecho-Religador	Barra “DE”	Barra “PARA”	
	75-RE75	64	65	
Barras Ilhadas (sem possibilidade de reenergização)	65, 66, 91, 95, 96, 97 e 98			
“RAMO DE REALOCAÇÃO” 1				
AVALIANDO A POSSIBILIDADE DE REALOCAÇÃO DE CARGA A JUSANTE DO TRECHO 79 (ENTRE AS BARRAS 66 E 67):				
Lista de Possibilidades	Conexão entre as Barras		Conexão é Viável?	N° de Barras Reenergizadas por esta Conexão
1	68	150	SIM	3
2	99	19	SIM	3

<u>Configuração</u> <u>Escolhida</u>	<i>Chave Seccionadora a ser Aberta para Realocar Cargas</i>			<i>Barras Reenergizadas pela Conexão</i>
	<i>Trecho-Chave</i>	<i>Barra “DE”</i>	<i>Barra “PARA”</i>	
<i>1</i>	<i>79-CH79</i>	<i>66</i>	<i>67</i>	<i>67, 68 e 99</i>
<i>Barras não Reenergizadas à Jusante deste RAMO DE REALOCAÇÃO</i>				<i>--</i>
“RAMO DE REALOCAÇÃO” 2 AVALIANDO A POSSIBILIDADE DE REALOCAÇÃO DE CARGA A JUSANTE DO TRECHO 94 (ENTRE AS BARRAS 91 E 92):				
<i>Lista de Possibilidades</i>	<i>Conexão entre as Barras</i>		<i>Conexão é Viável?</i>	<i>N° de Barras Reenergizadas por esta Conexão</i>
<i>1</i>	<i>94</i>	<i>49</i>	<i>SIM</i>	<i>3</i>
<u>Configuração</u> <u>Escolhida</u>	<i>Chave Seccionadora e ser Aberta para Realocar Cargas</i>			<i>Barras Reenergizadas pela Conexão</i>
	<i>Trecho-Chave</i>	<i>Barra “DE”</i>	<i>Barra “PARA”</i>	
<i>1</i>	<i>94-CH94</i>	<i>91</i>	<i>92</i>	<i>92, 93 e 94</i>
<i>Barras não Reenergizadas à Jusante deste RAMO DE REALOCAÇÃO</i>				<i>--</i>

O ponto mais importante nesta simulação é a grande região de abrangência da falta, que engloba sete trechos do sistema, assim, caso esta falta ocorresse o operador remoto não poderia saber facilmente com certeza o trecho no qual a falta ocorreu, pois a área de abrangência é relativamente grande.

O algoritmo pôde realizar a realocação de cargas de uma forma eficaz e em um tempo curto, onde o mínimo de barras possível permaneceu desenergizado e todas as barras passíveis de realocação foram realocadas, tanto para o alimentador superior (conexão 94-49), quanto para o alimentador inferior (conexão 68-150).

Falta “d”:

A falta “d” foi simulada no trecho entre as barras 110 e 111 (trecho 118) do sistema da Figura 3.11.

A Tabela 3.19 mostra a nova configuração escolhida pelo algoritmo a fim de realocar o maior número possível de cargas.

Tabela 3.19 - Dados de saída para a falta no trecho 118 do sistema de 150 barras

SISTEMA 150 BARRAS				
FALTA TRECHO 118 (BARRAS 110-111)				
Localização da Falta	Trecho	Barra “DE”	Barra “PARA”	
	114	108	109	
Abrangência da Localização da Falta (nenhuma possibilidade de chaveamentos)	Trecho	Barra “DE”	Barra “PARA”	
	114	108	109	
	116	109	110	
	117	109	128	
	118	110	111	
	119	110	132	
	134	128	129	
	135	129	130	
	136	130	131	
Equipamento que Atuou para Isolar a Falta	Trecho-Religador	Barra “DE”	Barra “PARA”	
	114-RE114	108	109	
Barras Ilhadas (sem possibilidade de reenergização)	109, 110, 111, 128, 129, 130, 131 e 132			
“RAMO_DE_REALO” 1				
AVALIANDO A POSSIBILIDADE DE REALOCAÇÃO DE CARGA A JUSANTE DO TRECHO 120 (ENTRE AS BARRAS 111 E 112):				
Lista de Possibilidades	Conexão entre as Barras		Conexão é Viável?	N° de Barras Reenergizadas por esta Conexão
1	137	119	NÃO A carga extra não é suportada	0
2	143	89	SIM	15
3	143	121	SIM	2
4	150	68	SIM	5

<u>Configuração</u> <u>Escolhida</u>	<i>Religador a ser Aberto para Realocar Cargas</i>			<i>Barras Reenergizadas pela Conexão</i>
	<i>Trecho-Religador</i>	<i>Barra “DE”</i>	<i>Barra “PARA”</i>	
2	123- RE123	113	114	114, 115, 116, 117, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149 e 150
<i>Barras não Reenergizadas à Jusante deste RAMO DE REALOCAÇÃO</i>				112, 113, 133, 134, 135, 136, 137, 138 e 139

A falta foi detectada pelo medidor no trecho 114 (entre as barras 108-109), uma vez que este é o primeiro trecho à montante com um dispositivo de seccionamento capaz de abrir correntes de níveis de falta, logo também responsável por isolar a região em defeito na rede (RE114). A abrangência da falta novamente foi muito extensa e, conseqüentemente, oito barras ficarão desenergizadas até que o defeito na rede seja corrigido (109, 110, 111, 128, 129, 130, 131 e 132).

Apenas um *RAMO DE REALOCAÇÃO* foi encontrado (trecho 120) e quatro conexões estão à jusante do mesmo. Na conexão 1 (Tabela 3.19) não há suporte para a carga extra, enquanto que nas outras o suporte existe.

A conexão escolhida foi a conexão de número 2, que interliga alimentadores diferentes pelas barras 143-89. Esta conexão é aquela que mais pode reenergizar barras, 15 no total, já considerando o fato que nem toda carga à jusante do *RAMO DE REALOCAÇÃO* específico pode ser realocada, pois não há suporte na conexão 143-89 para 9,45 p.u. Assim, o algoritmo busca outro trecho à jusante a partir do qual toda a carga possa ser suportada, encontrando o trecho 123 (barras 113-114), com carga à jusante estimada em 4,7 p.u., dentro dos limites do outro ramal pela conexão 143-89 (5,0 p.u.).

Desta forma, o algoritmo decide por abrir o religador do trecho 123 (RE123) e fechar o religador N.A. da conexão 143-89 (RE89143), fazendo com que todas as barras à jusante da barra 114 sejam realocadas para o alimentador ao centro da rede.

Como nem todas as barras à jusante do respectivo *RAMO DE REALOCAÇÃO* foram realocadas, algumas barras além das barras ilhadas inicialmente também permanecerão desenergizadas. Ao todo, nesta nova configuração, 17 barras ficarão isoladas até que o defeito seja corrigido na rede em questão, conforme a Tabela 3.19.

O tempo de simulação para esta falta foi de 1,2s. Desta forma, mesmo para sistemas com muitas barras, ramificações e conexões, o algoritmo se mostra robusto e capaz de realizar as análises corretas em um pequeno intervalo de tempo, na ordem de poucos segundos.

Para este sistema de 150 barras fica particularmente claro o quão problemático seria a adoção de uma técnica de enumeração exaustiva. Com 53 dispositivos de seccionamento, entre chaves seccionadoras e religadores N.A e N. F., caso a técnica consistisse em analisar cada uma das combinações possíveis e após cada uma delas verificar se o sistema se mantém radial o tempo de processamento das informações seriam muito superior aos 1,2s que o algoritmo proposto levou para encontrar a solução mostrada na Tabela 3.19.

Supondo que para cada um dos 53 dispositivos de seccionamento presentes existem duas possíveis posições (aberto ou fechado) e que todas as possibilidades de combinação entre eles seria testada, ocorreria claramente uma explosão do número de soluções possíveis, onde a verificação de radialidade ainda deveria ser realizada para cada uma delas e sua grande maioria se mostraria não viável.

3.6 Conclusões do Capítulo

Neste capítulo foram apresentados resultados de simulações feitas com o algoritmo proposto.

Todas as simulações foram realizadas utilizando o software Matlab® em um computador com a seguinte configuração: Processador Intel Core i5 e 8Gb de memória Ram.

Foram realizados outros testes em sistemas não mostrados neste trabalho, que poderiam ser considerados como variações dos sistemas mostrados neste capítulo, sendo que todos os testes indicaram resultados satisfatórios. Mais exatamente foram realizadas aproximadamente 85 simulações de forma exaustiva, e em todas as simulações os resultados obtidos com o algoritmo proposto se mostraram corretos pela análise dos sistemas em questão.

Capítulo 4 Conclussões

4.1 *Conclussões Gerais*

Neste trabalho foi desenvolvida uma metodologia a qual foi implementada em um algoritmo computacional.

O objetivo deste algoritmo é ser capaz de restaurar um sistema elétrico radial de forma rápida (em tempo hábil para que índices de desempenho da concessionária não sejam afetados de acordo com a normatização ANEEL). E ainda, reenergizando o máximo de cargas possível, ou trechos prioritários, obedecendo a restrições técnicas da rede, sendo consideradas apenas a operação de chaves telecomandadas, buscando manter os índices de desempenho dos sistemas de distribuição dentro dos limites estipulados.

Destaca-se que o algoritmo atua utilizando apenas informações facilmente obtidas pelas concessionárias, as condições de estados das chaves e dos religadores do sistema e dados de tensão e corrente pré-falta e pós-falta dos equipamentos de medição do sistema, não havendo a necessidade de conhecer outras características (comuns de serem necessárias em outras metodologias), como por exemplo, os valores das impedâncias do sistema ou dados detalhados das cargas. Considera-se bastante interessante esta característica do algoritmo proposto, uma vez que as concessionárias têm buscado métodos simples, adequados a questões práticas, inclusive com relação aos dados utilizados e tempo de processamento.

Em todas as simulações realizadas, o algoritmo proposto atuou de forma correta e eficaz, realocando, sempre que possível, as barras desenergizadas devido á defeitos no sistema. O tempo computacional para todas as simulações não foi maior que poucos segundos, incluindo a montagem da Lista de Sequência de Rede e da Matriz de Trechos de Rede nas simulações.

Sendo assim, depois de realizadas muitas simulações, de forma exaustiva e em diferentes sistemas de distribuição, o algoritmo provou ser uma ferramenta robusta e capaz de atuar frente a sistemas complexos de distribuição.

4.2 *Trabalhos Futuros*

Existem melhorias que podem ser feitas no algoritmo proposto, tais como:

- ✓ Criar uma interface gráfica que auxilie o operador na utilização do algoritmo;
- ✓ Realizar testes em campo, utilizando uma ferramenta mais complexa de simulações de redes elétricas, tal como um *RTDS* (Real Time Digital Power System);
- ✓ Realizar simulações em redes com geração dispersa a fim de avaliar os impactos de múltiplas fontes na metodologia proposta;
- ✓ Acoplar uma rotina de otimização do tipo *branch and bound* visando conseguir melhores soluções por parte do algoritmo;
- ✓ Incluir à análise do algoritmo os novos ajustes necessários ao sistema de proteção uma vez realizada a restauração e reconfiguração.

Bibliografia

- [1] Araujo, D. R. R. P. A., “Material de aula da disciplina de Tópicos Especiais em Análises de Redes Elétricas, Sistemas Elétricos Industriais”, Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Sistemas de Energia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF, 2014.
- [2] Hsu, Y., Jwo-Hwu, Y., “Planning of Distribution Feeder Reconfiguration with Protective Device Coordination”, IEEE Transactions on Power Delivery, July 1993, Vol. 8, No. 3.
- [3] Silva, L. G. W., Pereira, R. A. F., Mantovani, J. R. S., “Optimized Allocation of Sectionalizing Switches and Control and Protection Devices for Reliability Indices Improvement in Distribution Systems”, IEEE/PES Transactions & Distribution Conference & Exposition, Latin America, 2004.
- [4] Cui, D., Li, L., “Fault Isolation and Reconfiguration of Multi-voltage Level Distribution Network Based on PSO Algorithm”, Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Asia-Pacific, 2012.
- [5] Celli, G., “Optimal Sectionalizing Switches Allocation in Distribution Networks”, IEEE Transactions on Power Delivery, July 1999, Vol. 4, No. 3.
- [6] Kaufmann, “Méthodes et modiles de lurechercheciperutionnelle”, Volume 11, Paris: Dunod, 1972, pp. 83- 171.
- [7] Teng, J., Lu, C., “Feeder-Switch Relocation for Customer Interruption Cost Minimization”, IEEE Transactions on Power Delivery, January 2002, Vol. 17, No. 1.
- [8] Cavalcante, P. L., Franco, J. F., Rider, M. J., Garcia, A. V., Martins, L. L., Malveira, M. R. R., Franco, R. J., Carvalho, P. F. S., Guimarães, D. S., Junior, L. J. H., “Advanced Network Reconfiguration System Applied to CEMIG-D System”, Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LA), 2013

IEEE PES Conference On.

- [9] Martin, J. A., Gil, A. J., “A new heuristic approach for distribution systems loss reduction,” *Int. J. Elect. Power Syst. Research*, Nov. 2008, vol. 78, no. 11, pp. 1953-1958.
- [10] Luo, S., Cui, W., “Distribution Network Optimization Reconfiguration Based on Hybrid Algorithm”, *Electrical and Control Engineering (ICECE)*, 2011 International Conference on.
- [11] Hataway, G., Warren, T., Stephens, C., “Implementation of a High-Speed Distribution Network Reconfiguration Scheme”, *59^o Annual Conference for Protective Relay Engineers*, IEEE, 2006.
- [12] Javadian, S. A. M., Tamikzar, R., Haghifam, M. R., “A Protection and Reconfiguration Scheme for Distribution Networks with DG”, *IEEE Bucharest Power Tech Conference*, July 2009.
- [13] Javadian, S.A.M., Haghifam, M. R., Rezaei, N., "A Fault Location and Protection Scheme for Distribution Systems in presence of DG Using MLP Neural Networks," *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, , Calgary, Alberta, Canada, 26-30 July 2009.
- [14] Augugliaro, A., Dusonchet, L., Giuseppe, M., Sanseverino, E. R., “Minimum Losses Reconfiguration of MV Distribution Networks Through Local Control of Tie-Switches”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, July 2003, Vol. 18, No. 3.
- [15] Radhia, B., King, R. T. F. A., Rughooputh, H. C. S., “Optimal Network Reconfiguration of Electrical Distribution Systems”, *Industrial Technology*, 2003 IEEE International Conference on.
- [16] Teng, J.-H., “A network-topology-based three-phase load flow for distribution systems”, *Proc. Nutl. Sci. Counc. ROC@*), 2000, Vol.24, pp. 259-264, No. 4.

- [17] Morton, A. B., Mareels, I. M. Y., “An Efficient Brute-Force Solution to the Network Reconfiguration Problem”, IEEE Transactions on Power Delivery July, 2000, vol. 15. No. 3. DD. 996-1000.
- [18] Monticelli, A. J. M., “Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica”, Ed. Edigardblucher Ltda., Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel), Eletrobrás, São Paulo, 1983.
- [19] Pereira, J. L. R. P. “Material de aula da disciplina de Análise de Redes Elétricas I”, Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Sistemas de Energia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF, 2014.
- [20] Junior, I. C. S. “Material de aula da disciplina de Potência II”, Programa de Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF, 2013.
- [21] Bordignon, A. L. B. “Equipamentos Elétricos Industriais”, Notas de Minicurso, 1º Ed., Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF, Novembro, 2012.
- [22] Falcão, D. M. “Notas de Aula de Análise de Redes Elétricas”, Programa de Engenharia Elétrica, COPPE, UFRJ, 2006.
- [23] Golub, G., Ortega, J. M. “Scientific Computing: An Introduction with Parallel Computing”, Academic Press, Boston, 1993.
- [24] Benedito, R. A. S., “Material de aula em Sistemas Elétricos de Potência, Fluxo de Carga”, UTFPR, Pará, 2010.
- [25] Gomes, F. V.; Carneiro, S. Jr.; Pereira, J. L. R.; Vinagre, M. P.; Garcia, P. A. N.; “A New Heuristic Reconfiguration Algorithm for Large Distribution Systems”, IEEE Transactions on Power Systems, 2005, vol.. 20, no. 3, pp. 1373-1378.
- [26] Peponis, G., Papadopoulos, M., “Reconfiguration of Radial Distribution Networks: Application of Heuristic Methods on Large-scale Networks”, IEEE

Proc-Gener. Transm. Distribution, 1995, vol.142, no. 6, pp. 631-638.

- [27] Shirmohammadi, D., Hong, H. W., “Reconfiguration of Electric Distribution for Resistive Line Loss Reduction”, IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, vol. 4, no. 2, pp. 1492-1498.
- [28] Goswami S. K., Basu S. K., “A New Algorithm for the Reconfiguration of Distribution Feeders for Loss Minimization”, IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, vol. 7, no. 3, pp. 1484-1491.
- [29] Civanlar, S., Grainger, J. J., Yin, H. and Lee, S. S. H. “Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction”, IEEE Transactions on Power Delivery, 1988, vol. 3, no. 3, pp. 1217-1223.
- [30] Arias-Albornoz, M., Sanhueza-Hardy, H. “Distribution Network Configuration for Minimum Energy Supply Cost”, IEEE Transactions on Power Systems, 2004, vol. 19, no. 1, pp. 538-542.
- [31] Venkatesh, B., Ranjan, R., Gooi, H. B., “Optimum Reconfiguration of Radial Distribution Systems to Maximize Loadability”, IEEE Transactions on Power Systems, 2004, vol. 19, no. 1, pp. 260-266.
- [32] Gomes, F. V.; Carneiro, S. Jr.; Pereira, J. L. R.; Vinagre, M. P.; Garcia, P. A. N.; “A New Distribution System Reconfiguration Approach Using Optimum Power Flow and Sensitivity Analysis for Loss Reduction”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 21, no. 4, pp. 1616-1623, Nov., 2006.
- [33] Akduman, B., Turkay, B., Uyar, A.S., “Service Restoration in Distribution Systems using an Evolutionary Algorithm”, Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower 2010), 7th Mediterranean Conference and Exhibition on, Agia Napa, pp. 1-9, Nov. 2010.
- [34] Yann-Chang Huang, Shin-Ju Chen, Chao-Ming Huang, “Evolving Radial Basic Function Neural Network for Fast Restoration of Distribution Systems”,

Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 6th IEEE Conference on, Beijing, pp. 401-406, June 2011.

- [35] Chao-Ming Huang, “Multiobjective Service Restoration of Distribution Systems Using Fuzzy Cause-Effect Networks ”, Power Systems, IEEE Transactions on, vol. 18, pp. 867-874, May 2003.