

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**Bernardo Jacques Delgado Costa**

**ALGORITMO PARA RESTAURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO  
BASEADO EM BUSCA POR ALIMENTADORES ADJACENTES**

**Juiz de Fora**

**2017**

**Bernardo Jacques Delgado Costa**

**ALGORITMO PARA RESTAURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO  
BASEADO EM BUSCA POR ALIMENTADORES ADJACENTES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

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

**Juiz de Fora**

**2017**

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

Costa, Bernardo Jacques Delgado.

Algoritmo para restauração de sistemas de distribuição baseado em busca por alimentadores adjacentes / Bernardo Jacques Delgado Costa. -- 2017.

107 p. : il.

Orientador: Leandro Ramos de Araujo

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, 2017.

1. Restauração de sistemas de distribuição. 2. Algoritmo computacional. 3. Realocação de cargas. 4. Busca exaustiva. 5. Sistemas elétricos de distribuição. I. Araujo, Leandro Ramos de, orient. II. Título.

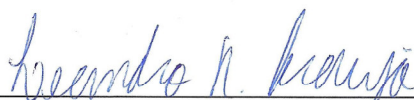
**Bernardo Jacques Delgado Costa**

**ALGORITMO PARA RESTAURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO  
BASEADO EM BUSCA POR ALIMENTADORES ADJACENTES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 23/02/2017

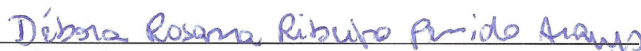
BANCA EXAMINADORA:



---

Prof. Leandro Ramos de Araújo, D.Sc.

Universidade Federal de Juiz de Fora



---

Prof.<sup>a</sup> Débora Rosana Ribeiro Penido Araujo, D.Sc.

Universidade Federal de Juiz de Fora



---

Prof. Bruno Henrique Dias, D.Sc.

Universidade Federal de Juiz de Fora



---

Prof. Márcio Zamboti Fortes, D.Sc.

Universidade Federal Fluminense

Aos meus familiares e amigos.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais e meu irmão, por todo amor, compreensão e apoio, sendo o porto seguro com o qual eu sei que sempre posso contar.

À Flávia, pelo amor, companheirismo, carinho e apoio dedicados em todos os momentos, além de sua compreensão ao longo dessa caminhada.

Ao João Paulo e ao Frederico, pela oportunidade proporcionada e também por todo ensinamento, apoio e confiança depositados, contribuindo imensamente para o meu desenvolvimento profissional e pessoal.

Ao Leandro, por ter me apoiado desde o início dessa caminhada, compreendendo minha menor disponibilidade de tempo e me dando suporte sempre que necessário.

Aos amigos da Lupa, em especial ao Douglas, Ricardo, Maurício e Marcus, por toda ajuda e torcida, auxiliando no processo de desenvolvimento desse projeto.

Por fim, agradeço à Universidade Federal de Juiz de Fora e a todos os professores e colegas do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, pelo conhecimento e suporte dedicados.

*“Aprender é a única coisa de que a mente nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se arrepende”*

*Leonardo da Vinci*

## RESUMO

Este trabalho propõe um método capaz de promover, em tempo real e de forma automática, a restauração de um sistema elétrico de distribuição radial frente a uma contingência em qualquer ponto, utilizando somente dados facilmente obtidos pelos equipamentos de proteção e controle disponíveis, tais como: valores de tensão, corrente, fator de potência e estado do equipamento. Devido à característica de operação autônoma do método, são considerados apenas os equipamentos telecontrolados instalados na rede.

Muitos métodos têm sido propostos para o problema de restabelecimento de energia em sistemas de distribuição. Entretanto, em sua maioria, são dependentes de dados da rede que não podem ser facilmente obtidos, tais como os valores de impedância das linhas, demanda das cargas, entre outros dados. Além disso, normalmente são propostos planos de restabelecimento que deverão ser analisados pelo operador do Centro de Operações da Distribuição (COD) para que ele, posteriormente, execute as ações necessárias para o restabelecimento do sistema.

O método proposto pode ser resumido como segue. Após a atuação do dispositivo de proteção frente a uma falta, o algoritmo entra em operação e identifica a área afetada, promovendo o isolamento dos trechos com defeito. Feito isso, é realizada uma análise das possibilidades de restauração do sistema, que se baseia na seleção de trechos pertencentes a alimentadores adjacentes à área afetada, que atendam algumas restrições. Após a seleção, é realizado um teste de todas as combinações possíveis de serem realizadas com esses trechos e a melhor solução é executada, podendo essa ser baseada no maior número de cargas restabelecidas ou na restauração do maior número de cargas prioritárias.

Palavras-chave: Restauração de Sistemas de Distribuição. Algoritmo Computacional. Realocação de Cargas. Busca Exaustiva. Sistemas Elétricos de Distribuição.



## ABSTRACT

This work proposes a method capable of promoting, in real time and automatically, the restoration of a radial distribution system after a contingency at any point, using only data easily obtained by the available protection and control equipments, such as: voltage, current, power factor and equipment status. Due to the automatic operation feature of the method, only the equipments with remote control installed in the network are considered.

Many methods have been proposed for the problem of distribution systems restoration. However, most rely on network data that cannot be easily obtained, such as line impedance, load demand, and other data. In addition, the proposed restoration plans should normally be reviewed by the operator of Distribution Operations Center (DOC), so that he can then take the necessary steps to restore the system.

The proposed method can be summarized as follows. After the protection device acts against a fault, the algorithm starts and identifies the affected area, promoting the isolation of the faulty sections. Once this is done, an analysis is made of the possibilities of system restoration, which is based on the selection of sections belonging to adjacent feeders of the affected area, which meet some restrictions. After the selection, all possible combinations to be performed with these sections are tested and the best solution is performed, which can be based on the largest number of loads restored or the restoration of the largest number of priority loads.

Keywords: Distribution Systems Restoration. Computer Algorithm. Load Relocation. Exhaustive Search. Distribution Electrical Systems.

# SUMÁRIO

<b>Capítulo 1</b>	<b><i>Introdução</i></b> .....	<b>11</b>
1.1	Considerações Iniciais .....	11
1.2	Motivações .....	12
1.3	Revisão Bibliográfica .....	13
1.4	Objetivos do Trabalho.....	17
1.5	Publicações Relacionadas ao Trabalho.....	18
1.6	Estrutura do Trabalho .....	18
<b>Capítulo 2</b>	<b><i>Conceitos Básicos de Restauração de Sistemas de Distribuição</i></b> .....	<b>20</b>
2.1	Introdução .....	20
2.2	Sistema de Distribuição Primária.....	20
2.3	Aplicação do Serviço de Restauração Automática.....	22
<b>Capítulo 3</b>	<b><i>Método Proposto</i></b> .....	<b>25</b>
3.1	Introdução .....	25
3.2	Estruturas de Dados .....	25
3.2.1	Topologia da Rede.....	26
3.2.2	Informações da Rede .....	27
3.2.3	Grandezas Operacionais .....	28
3.3	Fluxograma do Algoritmo.....	29
3.3.1	Entrada de Dados Estáticos .....	30
3.3.2	Entrada de Dados Dinâmicos.....	30
3.3.3	Estimação das Cargas .....	31
3.3.4	Identificação e Isolamento dos Trechos Afetados .....	34
3.3.5	Identificação dos Alimentadores Adjacentes à Área Afetada.....	36
3.3.6	Análise para Restauração.....	42
3.3.7	Restauração do Sistema .....	46
3.3.8	Análise de Tensão.....	46
<b>Capítulo 4</b>	<b><i>Método Baseado em Algoritmos Genéticos</i></b> .....	<b>48</b>
4.1	Introdução .....	48
4.2	Fluxograma do Algoritmo.....	48
4.3	Análise para Restauração Baseada em AG .....	50
4.3.1	Geração da População Inicial .....	50
4.3.2	Inicialização dos Parâmetros do AG.....	51
4.3.3	Avaliação dos Indivíduos .....	52
4.3.4	Seleção dos Indivíduos .....	53
4.3.5	Cruzamento dos Indivíduos .....	53
4.3.6	Mutação dos Indivíduos.....	54
4.3.7	Retorno do Melhor Indivíduo Encontrado.....	54
<b>Capítulo 5</b>	<b><i>Testes e Resultados com Sistemas Simulados</i></b> .....	<b>56</b>
5.1	Introdução .....	56
5.2	Sistema 1 .....	56

<b>5.3</b>	<b>Sistema 2</b> .....	<b>60</b>
5.3.1	Simulação 1 .....	62
5.3.2	Simulação 2 .....	67
<b>5.4</b>	<b>Sistema 3</b> .....	<b>71</b>
5.4.1	Simulação 1 .....	72
5.4.2	Simulação 2 .....	78
5.4.3	Simulação 3 .....	85
<b>5.5</b>	<b>Sistema 4</b> .....	<b>90</b>
<b>5.6</b>	<b>Conclusões do Capítulo</b> .....	<b>93</b>
<b>Capítulo 6</b>	<b><i>Testes e Resultados com Equipamentos Reais</i></b> .....	<b>94</b>
<b>6.1</b>	<b>Introdução</b> .....	<b>94</b>
<b>6.2</b>	<b>Estrutura Montada em Laboratório</b> .....	<b>94</b>
<b>6.3</b>	<b>Comunicação do Sistema</b> .....	<b>97</b>
<b>6.4</b>	<b>Resultados</b> .....	<b>98</b>
<b>6.5</b>	<b>Conclusões do Capítulo</b> .....	<b>101</b>
<b>Capítulo 7</b>	<b><i>Conclusões</i></b> .....	<b>102</b>
<b>7.1</b>	<b>Conclusões Gerais</b> .....	<b>102</b>
<b>7.2</b>	<b>Trabalhos Futuros</b> .....	<b>103</b>
<b>Bibliografia</b>	.....	<b>104</b>

# Capítulo 1 Introdução

## 1.1 Considerações Iniciais

Interrupções permanentes em um sistema de distribuição de energia elétrica podem atingir um grande número de consumidores e geralmente apresentam um prolongado intervalo de tempo para que sejam solucionadas, visto que na maioria das vezes se faz necessário o deslocamento de profissionais até a região para detecção da falha e restabelecimento do sistema. Esse processo é demorado e gera transtornos e prejuízos econômicos tanto para os consumidores quanto para as concessionárias de energia elétrica.

Após a ocorrência de uma falta, os equipamentos de proteção do sistema entram em operação e promovem a abertura do trecho defeituoso, interrompendo o fornecimento de energia. Uma vez que a maioria das redes de distribuição opera em uma topologia radial, todas as cargas a jusante do trecho com falha também terão o serviço interrompido, mesmo que não possuam qualquer problema, contribuindo assim para o aumento do número de consumidores afetados (BORGES, 2012).

Nesse ponto, a concessionária perceberá a falha, seja através de chamados oriundos dos clientes afetados ou de alarmes providos pelos equipamentos de proteção e controle ao Centro de Controle da Distribuição (COD), e iniciará um processo de identificação da área de ocorrência do problema, que normalmente se baseia na verificação do trecho compreendido entre dois equipamentos de proteção ou manobra, onde somente o dispositivo mais a montante foi sensibilizado por uma corrente de falta, aliada a experiência dos engenheiros responsáveis. Feito isso, uma equipe será deslocada para a área identificada e iniciará uma busca visual na linha, que poderá se estender por quilômetros, com a finalidade de encontrar a fonte do problema, promovendo então as ações necessárias para solucionar o defeito e, então, liberar a reenergização do ramo.

Para que a qualidade do fornecimento de energia elétrica seja mantida, as concessionárias de energia devem atender às metas estipuladas pelos órgãos reguladores. No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é a entidade responsável por regular e fiscalizar os processos inerentes à geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

Os principais indicadores utilizados pela ANEEL para avaliar a continuidade do serviço de fornecimento de energia ofertado pelas concessionárias são:

- Duração equivalente de interrupção por unidade consumidora (DEC): Apresenta o intervalo de tempo médio em que cada unidade consumidora ficou privada do fornecimento de energia, dentro de um período de apuração.
- Frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora (FEC): Apresenta o número médio de interrupções do fornecimento de energia que cada unidade consumidora sofreu, dentro de um período de apuração.
- Duração de interrupção individual por unidade consumidora (DIC): Apresenta o intervalo de tempo em que cada consumidor, individualmente, foi privado do fornecimento de energia, dentro de um período de apuração.
- Frequência de interrupção individual por unidade consumidora (FIC): Apresenta o número de interrupções do fornecimento de energia que cada consumidor, individualmente, sofreu dentro de um período de apuração.

É necessário ressaltar que os índices apresentados anteriormente são apurados somente para interrupções superiores a 3 minutos de duração (ANEEL, 2016).

Nesse cenário, sistemas capazes de atuar automaticamente sobre uma rede de distribuição com falta permanente, de forma a isolar o trecho com falha e restaurar a alimentação nos demais trechos não afetados pelo problema, dentro do intervalo de tempo máximo de 3 minutos, se mostram de grande importância e interesse para pesquisas.

## **1.2 Motivações**

A crescente demanda por um serviço de fornecimento de energia de qualidade por parte dos consumidores gera uma cobrança cada vez mais rígida dos órgãos reguladores, o que leva as concessionárias de energia a investir continuamente em soluções para automatizar a sua rede de distribuição.

Nesse contexto, um sistema capaz de atuar automaticamente sobre uma rede de distribuição, através de equipamentos telecontrolados, de forma a restaurar o seu funcionamento após uma falha, se mostra de grande valor para o aumento da qualidade

do serviço prestado e consequente redução dos indicadores da concessionária frente às metas estipuladas pelos órgãos reguladores.

A maioria dos trabalhos encontrados na literatura sobre restauração de redes de distribuição propõe, após a utilização de diferentes métodos para resolução do problema, a disponibilização ao operador do COD das melhores alternativas encontradas, para que ele então possa analisar e posteriormente tomar as providências necessárias para a conclusão do problema. Além disso, muitas vezes essas soluções dependem de dados da rede de distribuição que não podem ser obtidos com facilidade, tais como valores de impedância das linhas e carregamento do sistema, o que acaba por dificultar a sua operação na prática.

Com isso, métodos capazes de permitir a atuação de forma automática, sem a necessidade de intervenção humana, e que utilizem dados da rede de distribuição facilmente obtidos pelos equipamentos instalados, visando sua aplicação prática, foram o grande motivador para o desenvolvimento desse trabalho.

### **1.3 Revisão Bibliográfica**

Tendo em vista a necessidade de melhoria contínua na qualidade do fornecimento de energia elétrica, temas relacionados à reconfiguração de redes de distribuição se destacam e são constantemente abordados na literatura. A seguir serão brevemente apresentadas as principais publicações relacionadas ao tema e utilizadas como base de conhecimento para o desenvolvimento do presente trabalho.

Em (AOKI *et al.*, 1989) uma metodologia heurística, que tem seu desempenho melhorado através da utilização do método do gradiente dual efetivo, é proposta para resolução do problema de restauração de sistemas de distribuição. O algoritmo proposto identifica as cargas que estão desenergizadas e promove o fechamento das chaves que interligam esses setores aos alimentadores de fronteira. Caso as restrições operacionais sejam violadas, as cargas são distribuídas entre os demais alimentadores com a finalidade de eliminar essas restrições. Para isso, o método do gradiente dual efetivo é utilizado para identificar quais chaves devem ser manobradas de forma a obter uma melhor efetividade na eliminação das violações.

Em (MORELATO E MONTICELLI, 1989) uma busca heurística baseada em uma árvore de decisão binária é proposta. O algoritmo promove uma busca em profundidade

na árvore de decisão binária, formada pelas chaves normalmente abertas (0) e normalmente fechadas (1), incorporando o conhecimento prévio sobre a rede em questão para restringir a busca e aumentar a performance do algoritmo.

Em (SHIRMOHAMMADI, 1992) outra metodologia heurística é apresentada para restabelecer o fornecimento de energia elétrica em trechos isolados devido à ocorrência de uma falta permanente ou manutenção programada. Após identificar a área com problema e apresentar as chaves que deverão ser abertas para isolar o trecho, o algoritmo desenvolvido promove o fechamento de todas as demais chaves do sistema, formando assim uma rede em malha. Um fluxo de potência é então executado para converter as cargas em injeção de corrente nodal. Feito isso, a chave com menor valor de corrente é eleita para abertura. O processo é então repetido até que o sistema se torne radial.

Em (FUKUYAMA e CHIANG, 1995) é proposto um método para restauração de sistemas de distribuição radial utilizando Algoritmo Genético Paralelo (AGP). O algoritmo proposto se baseia na implementação de um AGP de granularidade grossa (*coarse-grain*), que divide a população total de busca em sub-populações. As sub-populações alimentam Algoritmos Genéticos (AG) convencionais que são executados paralelamente em diferentes processadores. Os melhores indivíduos de cada AG após cada época executada migram entre os processadores vizinhos, até que uma condição de término seja alcançada, ou seja, até que o sistema seja restaurado atendendo às seguintes restrições operacionais: radialidade do sistema, capacidade dos alimentadores e os limites de tensão e corrente impostos.

Em (BRETAS *et al.*, 1998) um método para restauração de sistemas de distribuição radial utilizando AG também é proposto. O diferencial desse trabalho está na utilização de uma nova representação dos sistemas de distribuição, através de cadeias de grafos, para alimentação do AG. Essa nova representação permite ao AG lidar com sistemas de grande porte em um tempo reduzido, uma vez que só produz soluções factíveis, reduzindo o universo de busca para resolução do problema.

Em (MIU *et al.*, 1998) o problema da restauração de um sistema de distribuição, considerando cargas prioritárias, é tratado como um problema multiobjetivo sujeito a restrições operacionais e elétricas. É proposto um algoritmo heurístico que, visando manter a radialidade do sistema, promove a manobra das chaves em pares eleitos considerando as chaves com maior carga transferível, obtida através de um fluxo de potência que é executado após cada manobra. A configuração final é dada considerando

a restauração das cargas prioritárias e posteriormente o maior número de cargas possível, com o menor número de manobras e respeitando a capacidade dos alimentadores.

Em (HSIAO e CHIEN, 2000) é proposta uma combinação de *Fuzzy* com AG para resolução do problema de restauração do serviço em sistemas de distribuição. A resolução proposta engloba a minimização de cinco objetivos: área sem serviço, número de operações das chaves, corrente dos alimentadores, desvio de tensão nas barras e carga dos transformadores. São considerados no processo de solução a manutenção da topologia radial do sistema e o atendimento às restrições da rede no processo de comutação das chaves. O algoritmo desenvolvido utiliza conjuntos *fuzzy* para modelar as funções objetivo descritas e posteriormente o AG para solucionar o problema de otimização.

Em (HUANG, 2003) foi proposto um método que utiliza redes *Fuzzy Cause-Effect* (FCE) para resolução do problema multiobjetivo de restauração de sistemas de distribuição. Através das regras obtidas na interação com os operadores da rede de distribuição, uma rede FCE é montada. Feito isso, os objetivos *fuzzy* para restauração do serviço são combinados através de uma estratégia de soma ponderada. Com a finalidade de auxiliar os operadores do sistema de distribuição a classificar suas preferências, o processo de hierarquia analítica proposto em (SATTY, 1980) é utilizado para determinar o peso de cada objetivo criado.

Em (INAGAKI *et al.*, 2006) um método baseado em AG é proposto para formar um conjunto de Pareto de soluções ótimas para resolução do problema de restauração de sistemas de distribuição com múltiplos objetivos. O algoritmo desenvolvido combina o AG com a meta-heurística do recozimento simulado, visando melhorar a performance do AG em otimizações locais. Essa solução combinada tem como objetivos minimizar o total de cargas desenergizadas e o número de manobras das chaves do sistema, atendo às seguintes restrições: manter a topologia radial do sistema, não permitir o desligamento de cargas que não tiveram seu fornecimento interrompido pela falha, não exceder a capacidade dos alimentadores, não exceder os limites de corrente da rede bem como os limites de queda de tensão.

Em (KLEINBERG *et al.*, 2009) um método heurístico é proposto para resolução do problema de restauração de sistemas de distribuição, considerando um contexto de redes inteligentes (*Smart Grids*), onde alguns consumidores têm parte de sua carga diretamente controlada pela distribuidora de energia, como por exemplo, controle do ar



condicionado, permitindo que essas cargas sejam reduzidas no caso de necessidade de restauração da rede. O algoritmo proposto se baseia em uma classificação das chaves, utilizando para tal a teoria dos grafos e uma análise do fluxo de potência, e incorpora a possibilidade de redução das cargas diretamente controladas pela concessionária, possibilitando um aumento no número de cargas restauradas.

Em (BORGES *et al.*, 2011) a restauração de sistemas de distribuição é tratada como um problema de programação não linear inteira mista. O método proposto é baseado na criação de um índice de sensibilidade, que classifica as chaves normalmente abertas quanto à potência aparente que transportam, gerado a partir de um fluxo de potência ótimo que utiliza o Método Primal Dual de Pontos Interiores (GRANVILLE *et al.*, 1996; KARMAKAR E RAMAKRISHNAN, 1991) no seu processo de solução. A chave com maior índice de sensibilidade é fechada e o algoritmo verifica se ocorreu a formação de um laço. Caso um laço tenha sido formado, o algoritmo identifica e abre a chave pertencente ao laço que transporta a menor potência aparente. Todo o processo é repetido até que todas as chaves normalmente abertas tenham sido manobradas.

Em (HUANG *et al.*, 2011) é proposto um algoritmo baseado em redes neurais de Função de Base Radial (RBF) para solução do problema de restauração de redes de distribuição sob diferentes níveis de carregamento. O método proposto compreende duas etapas, sendo uma para criação da base de dados para treinamento da rede e outra para construção da rede. Na primeira etapa é empregado um método de inferência *fuzzy* para gerar planos de restauração sob vários níveis de carregamento, levando em conta três objetivos *fuzzy*: total de cargas restauradas, número de chaves manobradas e total de dispositivos sobrecarregados. Concluída a primeira etapa, uma rede RBF é então construída para utilizar os dados da fase anterior em seu treinamento e posteriormente fornecer a solução para problemas de restauração. Nessa etapa os autores propõem a utilização de um algoritmo de Evolução Diferencial para lidar com os parâmetros de largura e centro das funções de base radial e com os pesos da camada de saída da rede, visando com isso uma melhor performance do algoritmo.

Em (CAVALCANTE *et al.*, 2013) são apresentados os resultados iniciais de um projeto de P&D ANEEL realizado em parceria com a CEMIG-D. A proposta do projeto é desenvolver uma ferramenta de reconfiguração automática da rede de distribuição de energia elétrica da CEMIG-D, considerando todas as suas particularidades, como redes extensas e ramificadas, grande extensão de alimentadores rurais e alimentadores com variados perfis de consumidores. Para tal, os autores apresentam uma solução baseada

na combinação dos algoritmos Branch Exchange (GOSWAMI E BASU, 1992) e Busca Tabu, sendo o último responsável por sair dos ótimos locais encontrados pelo primeiro.

Em (MORI e MUROI, 2015) um método baseada em Busca Tabu é proposto para resolução do problema de restauração de redes de distribuição. Para contornar a demanda computacional exigida para criação da lista tabu, principalmente para restauração de sistemas de distribuição de grande porte, os autores propõem o conceito de vizinhança probabilística reduzida, que consiste na seleção de soluções candidatas de forma randômica para verificação. Após selecionar as soluções candidatas, o algoritmo move a melhor solução daquela vizinhança para a lista tabu. Se as condições de término foram satisfeitas, o algoritmo retorna a melhor solução encontrada para o problema, caso contrário, ele gera uma nova vizinhança e o processo se repete.

Em (RODRIGUES, 2015) foi proposto um método para restauração de sistemas de distribuição considerando apenas dados de medição e informações topológicas da rede de distribuição. O método proposto faz uma procura da melhor solução partindo do ponto de defeito e testando todas as possíveis combinações. Contudo, alguns aspectos importantes não foram contemplados, tais como: limitação do conjunto de busca, busca em duas etapas para redução do tempo de processamento, contingências múltiplas, lista de priorização das cargas em diversas escalas e operação dinâmica. Esses aspectos foram abordados nesta dissertação.

Em (CAVALCANTE *et al.*, 2016) um método de duas etapas, baseado em uma abordagem matemática, é proposto para resolução do problema de restauração de redes de distribuição. A restauração do sistema é estruturada como um problema de Programação Não Linear Inteira Mista. Para sua resolução, a solução proposta é dividida em duas etapas, onde a primeira etapa consiste na utilização de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para resolver parte do problema, referente às variáveis de decisão binárias do sistema, e a segunda etapa consiste na utilização de Programação Não Linear para encontrar a solução final do problema, utilizando os dados obtidos na primeira etapa.

## **1.4 Objetivos do Trabalho**

O objetivo principal desse trabalho é desenvolver um algoritmo computacional que, após a ocorrência de uma falta permanente em uma rede de distribuição radial, seja

capaz de isolar o trecho em questão e restaurar o restante do sistema em um tempo inferior a 3 minutos (tempo estipulado pela ANEEL para início da contabilização dos índices de desempenho), de forma automática, sem a necessidade de intervenção do operador do COD da concessionária.

Para tanto, serão considerados somente os equipamentos telecontrolados da rede, visto que o método proposto irá atuar sobre esses equipamentos de forma automática após a identificação da melhor solução para o problema.

O algoritmo faz uso somente de informações facilmente obtidas através das chaves e religadores instalados na rede, que são basicamente os valores de tensão, corrente, fator de potência e o estado atual do equipamento, e permite a restauração do maior número de cargas possível, com possibilidade de priorização de trechos, obedecendo às restrições técnicas da rede em questão, visando com isso à aplicação prática da solução.

Serão realizados testes com o método proposto em uma rede radial composta por chaves e religadores reais montada em laboratório, utilizando modems 3G para telecontrole dos equipamentos. Além disso, o algoritmo será exposto também a testes com redes simuladas para efeito de validação do método.

## **1.5 Publicações Relacionadas ao Trabalho**

COSTA, B. J. D.; ARAUJO, L. R. A Method of Restoring Distribution Systems Using Adjacent Networks and Two Levels Search. IEEE Latin America Transactions, (aceito) a ser publicado em 2017.

## **1.6 Estrutura do Trabalho**

Este trabalho é composto de sete capítulos, incluindo este de introdução e os demais que serão descritos a seguir.

O capítulo 2 apresenta os conceitos básicos de restauração de redes de distribuição primárias.

O capítulo 3 apresenta o método proposto para resolução do problema de restauração de sistemas de distribuição, incluindo a apresentação detalhada das etapas executadas pelo algoritmo desenvolvido.

O capítulo 4 apresenta um método baseado em Algoritmos Genéticos que foi desenvolvido com o intuito de servir como parâmetro de comparação para os resultados obtidos com o método proposto.

O capítulo 5 apresenta os resultados dos testes realizados com quatro redes simuladas distintas, incluindo uma baseada em um sistema real de uma concessionária brasileira.

O capítulo 6 apresenta uma rede com equipamentos reais que foi montada em laboratório e os resultados obtidos com o método proposto frente às faltas geradas em diferentes pontos desse sistema.

O capítulo 7 apresenta as conclusões gerais do trabalho, considerando o desempenho do método proposto frente aos testes realizados. Nesse capítulo também são abordadas as possibilidades de trabalhos futuros.

## **Capítulo 2    Conceitos Básicos de Restauração de Sistemas de Distribuição**

### **2.1 Introdução**

O sistema de distribuição é o responsável pelo fornecimento da energia elétrica para os consumidores finais, sendo parte do sistema elétrico de potência, que é composto ainda por outros dois subsistemas: o sistema de geração, responsável pela produção da energia elétrica e o sistema de transmissão, responsável pelo transporte da energia elétrica produzida até o setor de distribuição (SANCHES, 2013).

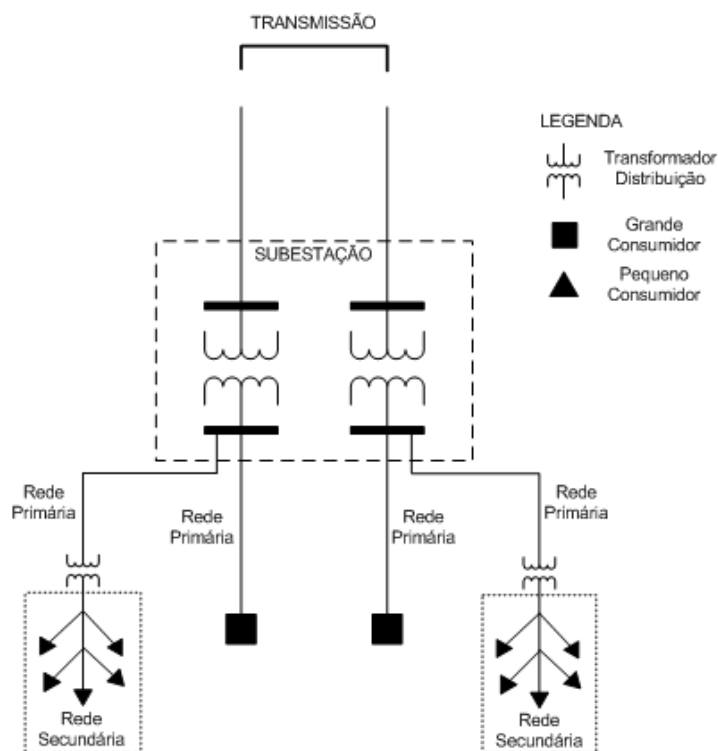
Por ser encarregado de entregar a energia elétrica aos consumidores finais, o sistema de distribuição deve atender aos requisitos de qualidade, confiabilidade e economicidade (SOUZA, 2013). Prezando os aspectos de continuidade do fornecimento de energia, a ANEEL impõe às companhias de distribuição os indicadores de continuidade coletivos (DEC e FEC) e individuais (DIC e FIC).

Contudo, o sistema de distribuição está constantemente sujeito a intempéries e situações adversas, sendo inevitável a ocorrência de interrupções permanentes causadas por eventos fortuitos.

Nesse cenário, o objetivo do sistema de restauração do serviço é isolar o trecho afetado por um defeito e minimizar o número de consumidores sem energia através da realocação das cargas desenergizadas para outros alimentadores, obedecendo às restrições operacionais da rede em questão.

### **2.2 Sistema de Distribuição Primária**

O sistema de distribuição pode ser dividido em duas partes: rede de distribuição primária e rede de distribuição secundária, conforme apresentado na Figura 2.1.



**Figura 2.1 - Representação de um sistema de distribuição.**

O sistema de distribuição primária está compreendido entre as subestações urbanas e os transformadores de distribuição. Essa rede geralmente opera com uma topologia radial na tensão de 13,8kV, configuração essa justificada pela maior simplicidade e facilidade de proteção do sistema frente à topologia malhada, ainda que em detrimento do aspecto de continuidade do serviço, visto que todas as cargas de uma mesma rede são energizadas por um único alimentador (MARQUEZ, 2014).

Já o sistema de distribuição secundária se inicia a partir dos transformadores de distribuição e opera normalmente em tensões de 220/127V, atendendo aos consumidores de baixa tensão.

Em decorrência da tensão elevada, as redes primárias contam com equipamentos de proteção, tais como religadores e disjuntores, que tem o objetivo de proteger o sistema na ocorrência de defeitos, desligando a parte afetada pelo problema. Após a atuação desses dispositivos perante uma falha, devido à topologia radial do sistema, todas as cargas a jusante do equipamento de proteção tem seu fornecimento de energia interrompido, comprometendo a continuidade do serviço.

Para contornar esse problema, blocos de cargas dessas redes são agrupados, formando trechos que são separados por chaves que operam no estado normalmente

aberta (NA) ou normalmente fechada (NF). Essa estrutura permite o isolamento de trechos defeituosos e a realocação das demais cargas entre alimentadores.

Há alguns anos, as chaves NA e NF eram predominantemente manuais, ou seja, só podiam ser manobradas localmente pela equipe de campo da concessionária responsável. Atualmente, com o avanço tecnológico e o constante investimento das empresas distribuidoras na automação dos sistemas de distribuição, essas chaves estão gradativamente sendo equipadas com o recurso de telecontrole, que permite a manobra desses equipamentos remotamente, sem a necessidade de deslocamento de uma equipe para operação local.

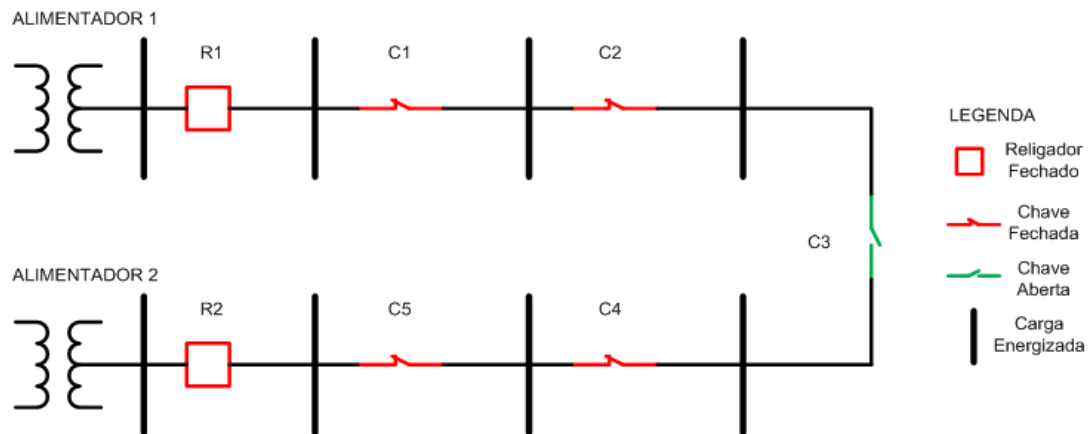
Desta forma, a rede de distribuição primária será a parte do sistema de distribuição abordada nesse estudo.

### ***2.3 Aplicação do Serviço de Restauração Automática***

Após a atuação dos equipamentos de proteção devido a uma falta permanente, todas as cargas a jusante desse ponto terão seu fornecimento de energia interrompido. Desta forma, a função do serviço de restauração é detectar e isolar o trecho defeituoso e restabelecer o fornecimento de energia para as demais cargas que não pertencem ao trecho com problema.

Esse objetivo é possível através de uma alteração na topologia original do sistema de distribuição, realizada por manobras de abertura e fechamento de chaves NF e NA, com a finalidade de transferir as cargas desenergizadas para outros alimentadores, mantendo as restrições operacionais impostas.

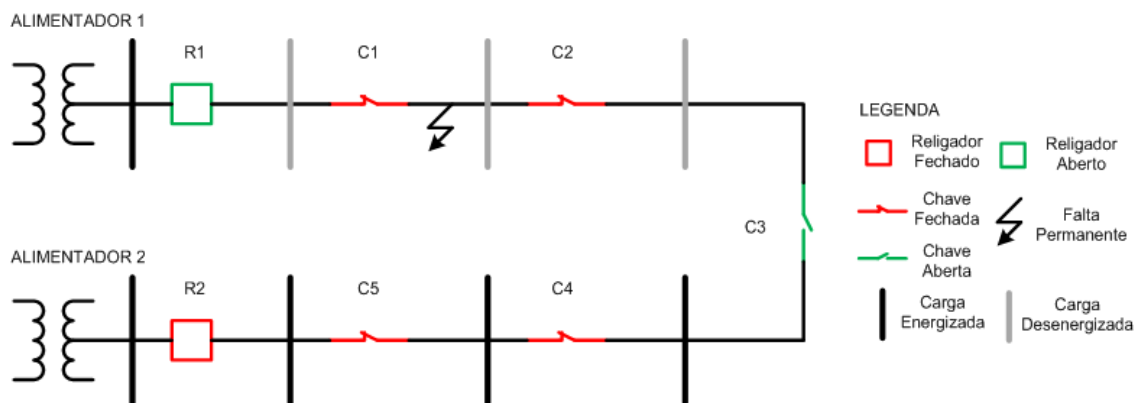
Para exemplificar esse processo, vamos considerar o sistema de distribuição com dois alimentadores apresentado na Figura 2.2.



**Figura 2.2 - Configuração inicial do sistema.**

Esse sistema é constituído de dois religadores de proteção, R1 e R2, e cinco chaves de manobra, sendo a chave C3 uma NA e as demais NF.

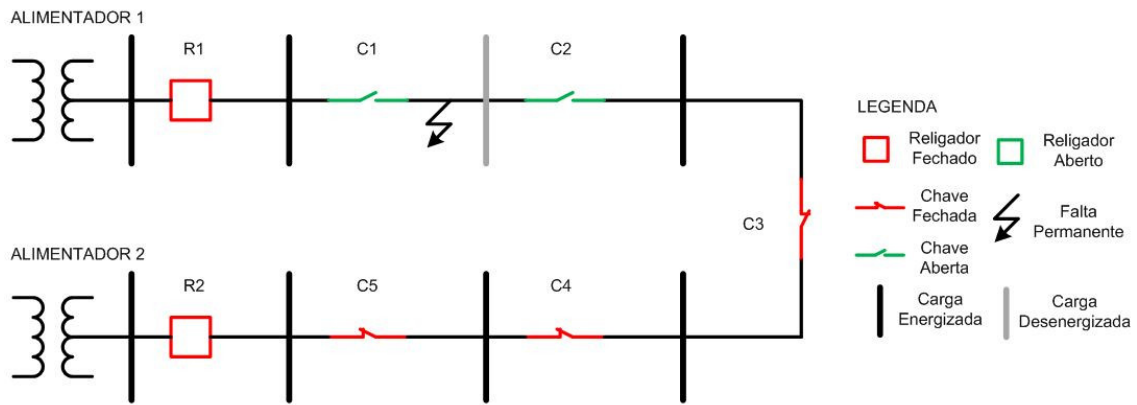
Suponhamos que ocorra uma falta permanente no trecho compreendido entre a chave C1 e a chave C2. Em decorrência dessa falha, o religador R1 irá abrir para extinguir a corrente de defeito, interrompendo o fornecimento de energia para todas as cargas a jusante dele, conforme pode ser observado na Figura 2.3.



**Figura 2.3 - Atuação do equipamento de proteção devido a uma falta permanente.**

Nessa situação, o serviço de restauração deverá detectar o trecho defeituoso e comandar a abertura das chaves C1 e C2 a fim de isolá-lo do sistema. Para restaurar o fornecimento de energia nos demais trechos não afetados pelo problema, uma possível solução seria o fechamento do religador R1 e da chave C3, reduzindo assim o número de cargas desenergizadas, conforme apresentado na Figura 2.4.





**Figura 2.4 - Possibilidade de restauração do sistema.**

Porém, para que essa solução seja viável, o serviço de restauração deve garantir as restrições operacionais de funcionamento do sistema, tais como a manutenção da topologia radial e dos níveis de corrente e tensão dentro dos limites estipulados. Nessa situação, visto que a topologia radial foi mantida, o serviço de restauração deverá garantir que o ALIMENTADOR 2 é capaz de suportar parte da carga que pertencia ao ALIMENTADOR 1, sem afetar os limites operacionais do sistema.

## **Capítulo 3 Método Proposto**

### **3.1 Introdução**

O método proposto tem como premissa a utilização restrita a equipamentos telecontrolados no processo de restauração da rede de distribuição, visto que o diferencial do trabalho está na possibilidade de se utilizar o sistema em tempo real e de forma autônoma.

O princípio de funcionamento do método desenvolvido se baseia na identificação dos trechos pertencentes a alimentadores distintos, que fazem fronteira com a área desenergizada. Os trechos de alimentadores adjacentes são incorporados ao processo de busca, onde todas as possibilidades, considerando somente os trechos selecionados, são testadas, levando em conta o número de equipamentos NA necessários para manter o sistema radial e conexo.

Além disso, os dados utilizados pelo algoritmo são facilmente obtidos pelos equipamentos atuais, o que torna o método passível de ser aplicado na prática.

Neste capítulo o método proposto será detalhado, de forma a apresentar as informações da rede necessárias, bem como o funcionamento geral do algoritmo. Por fim será apresentado um exemplo de aplicação do método para o restabelecimento de redes de distribuição.

### **3.2 Estruturas de Dados**

As estruturas de dados necessárias para o funcionamento do algoritmo possuem partes estáticas, que possuem seus dados inseridos pelo operador do sistema antes da inicialização, e partes dinâmicas, que terão seus dados atualizados periodicamente através de uma integração ao sistema SCADA da concessionária. Todas as informações necessárias ao sistema e as estruturas de dados utilizadas pelo algoritmo serão apresentadas a seguir. Para facilitar o entendimento, usaremos como base o sistema da Figura 3.1.

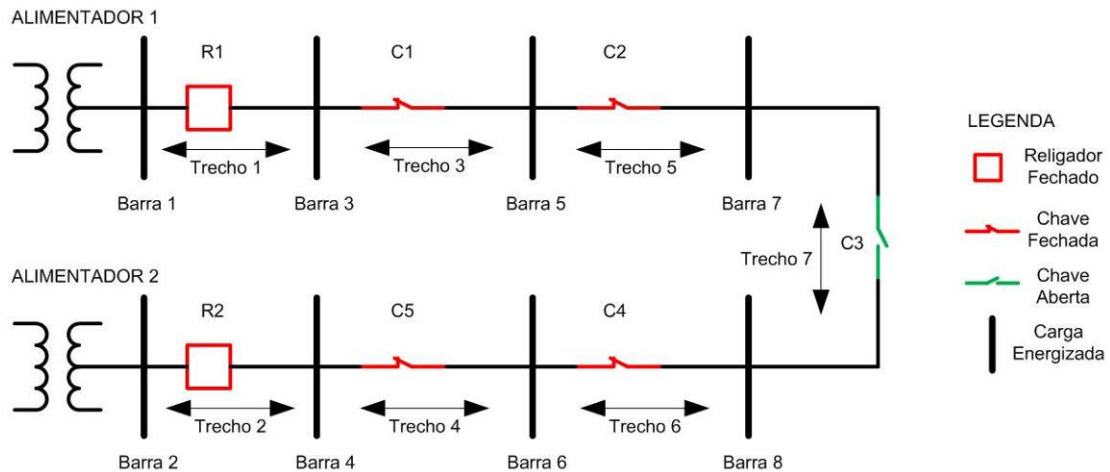


Figura 3.1 - Sistema teste com dois alimentadores.

### 3.2.1 Topologia da Rede

Os dados da topologia da rede possuem sua estrutura baseada na identificação das barras “DE” para as barras “PARA” de cada um dos trechos, considerando ainda o tipo de equipamento instalado no trecho e algumas informações do equipamento, que serão atualizadas periodicamente. A Tabela 3.1 mostra a organização dos dados de topologia da rede para o sistema da Figura 3.1.

Tabela 3.1 – Estrutura de dados da topologia de rede.

DE	PARA	LIGAÇÃO	ESTADO	BLOQUEIO	SOBRE-CORRENTE	TRECHO	PRIORIDADE
1	3	R	1	0	0	1	10
2	4	R	1	0	0	2	10
3	5	C	1	0	0	3	5
4	6	C	1	0	0	4	6
5	7	C	1	0	0	5	9
6	8	C	1	0	0	6	4
7	8	C	0	0	0	7	1

As colunas “DE” e “PARA” da Tabela 3.1, correspondem às barras do trecho em questão, enumerado na coluna “TRECHO”. Vale ressaltar que o algoritmo promove a correção do fluxo de carga do sistema, barra “DE” para barra “PARA”, automaticamente, não importando a ordem que elas sejam inseridas na inicialização. Isso é possível através da informação dos barramentos das subestações, que deve ser fornecida ao sistema e será apresentada na seção 3.2.2.

A coluna “LIGAÇÃO” identifica se existe algum equipamento no trecho e pode assumir os seguintes valores:

- R: Indica que existe um religador no trecho;
- C: Indica que existe uma chave no trecho;
- L: Indica que não existe equipamento no trecho;

A coluna “ESTADO” indica o estado do equipamento instalado no trecho. O valor “0” indica equipamento aberto e o valor “1” equipamento fechado. Caso não exista equipamento no trecho, essa coluna será ignorada pelo algoritmo.

A coluna “BLOQUEIO” identifica, com valor “1”, os trechos que estão bloqueados para participar do processo de restauração e, portanto deverão ser ignorados pelo algoritmo.

A coluna “SOBRE-CORRENTE” identifica, com valor “1”, os equipamentos que foram sensibilizados por uma corrente de curto, detectada por seu respectivo relé de proteção. Esse valor é atualizado periodicamente, de acordo com as configurações da concessionária.

A coluna “PRIORIDADE” indica a prioridade do trecho em questão, em uma escala de 1 a 10. Esses dados devem ser inseridos pelo usuário e serão utilizados pelo algoritmo durante o processo de restauração para decidir quais trechos tem prioridade sobre os demais caso o alimentador não suporte energizar todos os trechos possíveis e encontre mais de uma solução com o mesmo número de cargas energizadas. Esse parâmetro não deve ser confundido com a identificação de cargas prioritárias, que será apresentada na seção 3.2.2, pois essas permitem ao algoritmo diminuir o número de cargas possíveis de serem reenergizadas em detrimento de uma priorização de cargas específicas.

### **3.2.2 Informações da Rede**

O algoritmo necessita que seja fornecido a ele um vetor de entrada contendo todos os barramentos das subestações do sistema. Considerando o sistema teste da Figura 3.1, que possui duas barras de saída da subestação, barra 1 e barra 2, o vetor ficaria da seguinte forma:

$$\text{BARRAMENTO\_SUBESTACAO} = [1 \ 2]$$

Caso existam cargas que devam ser priorizadas durante o processo de restauração, ou seja, cargas definidas pelo usuário como prioritárias frente às demais cargas do sistema, essas deverão ser informadas através de um vetor, do contrário o vetor deverá conter o valor “0”, conforme mostrado abaixo:

CARGAS\_PRIORITARIAS = [0]

Além disso, são necessárias também algumas informações referentes aos alimentadores da rede. A Tabela 3.2 apresenta a estrutura de dados dos alimentadores, considerando o sistema de teste da Figura 3.1 como exemplo.

**Tabela 3.2 - Estrutura de dados dos alimentadores.**

NUMERO	BARRA	LIMITE (kVA)
1	3	4000
2	4	4000

A coluna “BARRA” apresenta a barra à jusante do barramento da subestação correspondente ao alimentador enumerado na coluna “NUMERO”.

A coluna “LIMITE” apresenta o limite máximo de potência suportada pelo alimentador, em kVA, para cada fase.

### 3.2.3 Grandezas Operacionais

Os dados de medição são coletados periodicamente e atualizados na estrutura de dados conforme apresentado na Tabela 3.3.

**Tabela 3.3 – Estrutura de dados dos valores de medição.**

ID	VA (kV)	IA (A)	FPA	VB (kV)	IB (A)	FPB	VC (kV)	IC (A)	FPC	TRECHO
1	8,0	100	0,98	8,0	100	0,98	8,0	100	0,98	1
2	8,0	100	0,97	8,0	100	0,97	8,0	100	0,97	2
3	7,9	70	0,96	7,9	70	0,96	7,9	70	0,96	3
4	7,9	65	0,97	7,9	65	0,97	7,9	65	0,97	4
5	7,8	40	0,94	7,8	40	0,94	7,8	40	0,94	5
6	7,8	35	0,95	7,8	35	0,95	7,8	35	0,95	6
7	7,7	0	0	7,7	0	0	7,7	0	0	7

As colunas “VA”, “VB” e “VC” apresentam os valores de tensão, em kV, das fases A, B e C, respectivamente, presentes no trecho indicado pela coluna “TRECHO”.

As colunas “IA”, “IB” e “IC” apresentam os valores de corrente, em A, das fases A, B e C, respectivamente, presentes no trecho indicado pela coluna “TRECHO”.

As colunas “FPA”, “FPB” e “FPC” apresentam os valores de fator de potência das fases A, B e C, respectivamente, presentes no trecho indicado pela coluna “TRECHO”.

A coluna “ID” contém apenas um índice da estrutura, que é utilizado durante o processo de busca do algoritmo.

### **3.3 Fluxograma do Algoritmo**

O método proposto foi implementado computacionalmente utilizando o software MATLAB e o fluxograma apresentado na Figura 3.2, destaca as principais etapas de funcionamento do algoritmo, que serão detalhadas nas seções subsequentes.

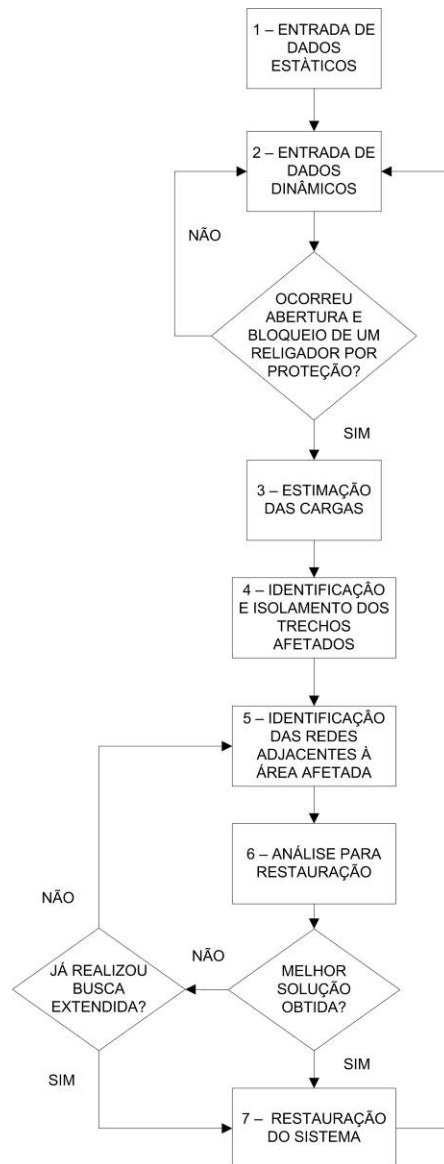


Figura 3.2 - Fluxograma das principais etapas do algoritmo desenvolvido.

### 3.3.1 Entrada de Dados Estáticos

A primeira etapa de funcionamento do algoritmo se baseia na entrada dos dados da rede, que deve obedecer à estrutura de dados apresentada na seção 3.2 e ser realizada pelo usuário antes da inicialização do sistema.

### 3.3.2 Entrada de Dados Dinâmicos

Após fornecer ao algoritmo todos os dados necessários, de acordo com a estrutura apresentada na seção 3.2, o sistema é iniciado e permanece em um processo de

atualização periódica das grandezas operacionais da rede, conforme visto na seção 3.2.3, que dependerá da integração do sistema com o software SCADA da concessionária.

O algoritmo permanecerá nesse processo de atualização até que um evento de abertura por proteção de um religador, seguido de seu bloqueio, ocorra. Em outras palavras, o algoritmo aguarda até que receba do SCADA uma indicação de abertura de um religador da rede por proteção, seguida de uma indicação de bloqueio dele, ou seja, uma indicação de que o religador não está em processo de religamento e permanecerá aberto indefinidamente, interrompendo o trecho ao qual está conectado.

### **3.3.3 Estimação das Cargas**

Uma vez recebida a indicação de abertura e bloqueio de um religador, acompanhada de indicação de passagem de corrente de curto, o algoritmo inicia o processo de estimação das cargas pertencentes à rede. Esse processo é necessário para que na etapa de análise da restauração o algoritmo consiga encontrar soluções factíveis, considerando a capacidade de carga que os alimentadores possuem e o total de cargas vinculadas a cada um deles, definindo assim os limites máximos de transferência de carga.

Para realizar o cálculo do carregamento de todos os trechos de um alimentador, de forma precisa, são necessários diversos parâmetros que em sua maioria são difíceis de ser obtidos e atualizados pela concessionária, tais como resistência, indutância e capacitância dos cabos elétricos, tapas dos transformadores entre outros (RODRIGUES, 2015).

Portanto, de forma a viabilizar a implementação prática do método proposto, o algoritmo desenvolvido realiza uma estimação das cargas dos trechos baseada apenas em parâmetros de medição presentes nos equipamentos de proteção e manobra já instalados na rede, tais como religadores e chaves. Esses parâmetros são: valor RMS de tensão de cada fase (A, B e C), valor RMS de corrente de cada fase (A, B e C) e fator de potência de cada fase (A, B e C). Com esses valores é possível estimar a potência aparente de cada trecho compreendido entre dois equipamentos instalados que forneçam os parâmetros mencionados anteriormente.



As equações (3.1) e (3.2) mostram como as potências ativa e reativa, respectivamente, são estimadas para cada fase.

$$P_X = V_X * I_X * fp_X \quad (3.1)$$

$$Q_X = V_X * I_X * \left( \sqrt{1 - fp_X^2} \right) \quad (3.2)$$

Onde:

- $P_X$  é a potência ativa estimada para a fase X de um trecho da rede;
- $Q_X$  é a potência reativa estimada para a fase X de um trecho da rede;
- $V_X$  é o valor RMS de tensão da fase X de um trecho da rede;
- $I_X$  é o valor RMS de corrente da fase X de um trecho da rede;
- $fp_X$  é o fator de potência da fase X de um trecho da rede;

Uma vez calculadas as potências ativa e reativa, a potência aparente pode então ser facilmente obtida através da equação (3.3).

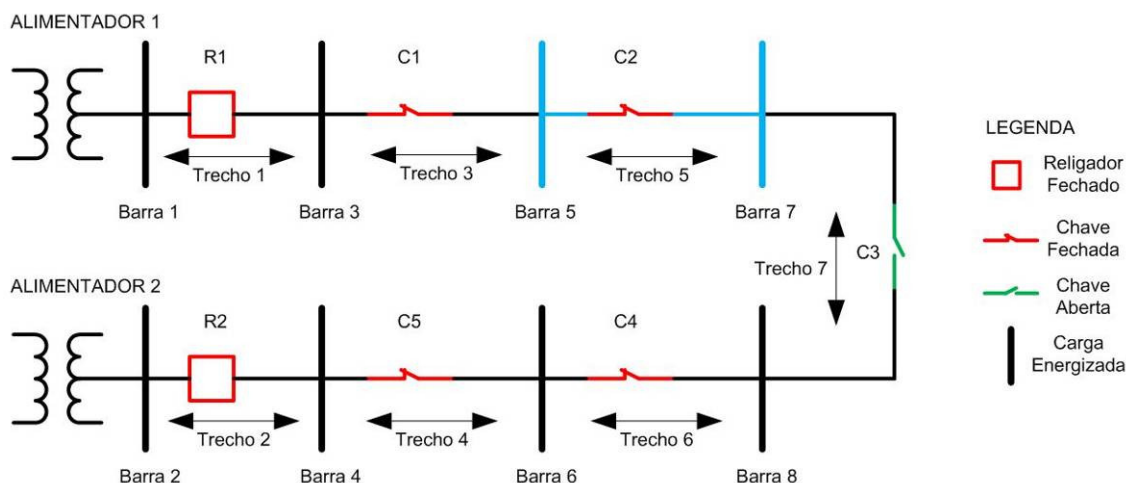
$$S_X = \sqrt{P_X^2 + Q_X^2} \quad (3.3)$$

Onde:

- $S_X$  é a potência aparente estimada para a fase X de um trecho da rede;
- $P_X$  é a potência ativa estimada para a fase X de um trecho da rede;
- $Q_X$  é a potência reativa estimada para a fase X de um trecho da rede;

Para estimar a carga de todos os trechos de um ramo de um alimentador, o algoritmo inicia os cálculos de potência ativa e reativa pelo trecho mais a jusante do ramo que possua um equipamento NF instalado e segue em direção ao alimentador, sempre subtraindo do valor calculado para o trecho atual, o valor medido no trecho anterior. Esse processo se repete em todos os ramos de todos os alimentadores da rede. Com a finalidade de facilitar o entendimento, serão apresentados os passos utilizados pelo algoritmo para estimar a carga dos trechos energizados pelo alimentador 1 do sistema teste apresentado na Figura 3.1.

O primeiro passo consiste em identificar o trecho mais a jusante do ramo energizado pelo alimentador 1 que possua um equipamento NF instalado. Esse trecho é o de número 5, destacado em azul na Figura 3.3.



**Figura 3.3 - Identificação do trecho mais a jusante do alimentador 1.**

Após identificar o trecho mais a jusante, o algoritmo consulta os valores de tensão, corrente e fator de potência, para cada fase, medidos pelo equipamento instalado nesse trecho. Para diminuir o número de cálculos, vamos considerar somente a fase A, visto que os processos são idênticos para as demais fases. De acordo com a Tabela 3.3, os valores medidos pela chave C2 para a fase A do trecho 5 são: 7,8 kV, 40 A e fator de potência de 0,94. Substituindo esses valores nas equações 3.1 e 3.2, teremos os seguintes valores de potência ativa e reativa, respectivamente: 293,28 kW e 106,45 kvar.

Uma vez estimados os valores de potência ativa e reativa do trecho 5, o algoritmo passa para o trecho a montante dele, ou seja, o trecho de número 3, que compreende as barras 3 e 5. De acordo com a Tabela 3.3, os valores medidos pela chave C1 para a fase A do trecho 3 são: 7,9 kV, 70 A e fator de potência de 0,96. Substituindo esses valores nas equações 3.1 e 3.2, teremos os seguintes valores de potência ativa e reativa, respectivamente: 530,88 kW e 154,84 kvar. Como o trecho 3 está à montante do trecho 5, é necessário subtrair dos valores obtidos aqueles calculados para o trecho 5. Logo, teremos os seguintes valores de potência ativa e reativa para o trecho 3:

$$P_3 = 530,88 - 293,28 = 237,60 \text{ kW}$$

$$Q_3 = 154,84 - 106,45 = 48,39 \text{ kvar}$$

Por fim, o algoritmo irá para o trecho de número 1, que compreende as barras 1 e 3. De acordo com a Tabela 3.3, os valores medidos pelo religador R1 para a fase A do trecho 1 são: 8,0 kV, 100 A e fator de potência de 0,98. Substituindo esses valores nas equações 3.1 e 3.2, teremos os seguintes valores de potência ativa e reativa, respectivamente: 784 kW e 159,20 kvar. Subtraindo desse total os valores calculados para os trechos anteriores:

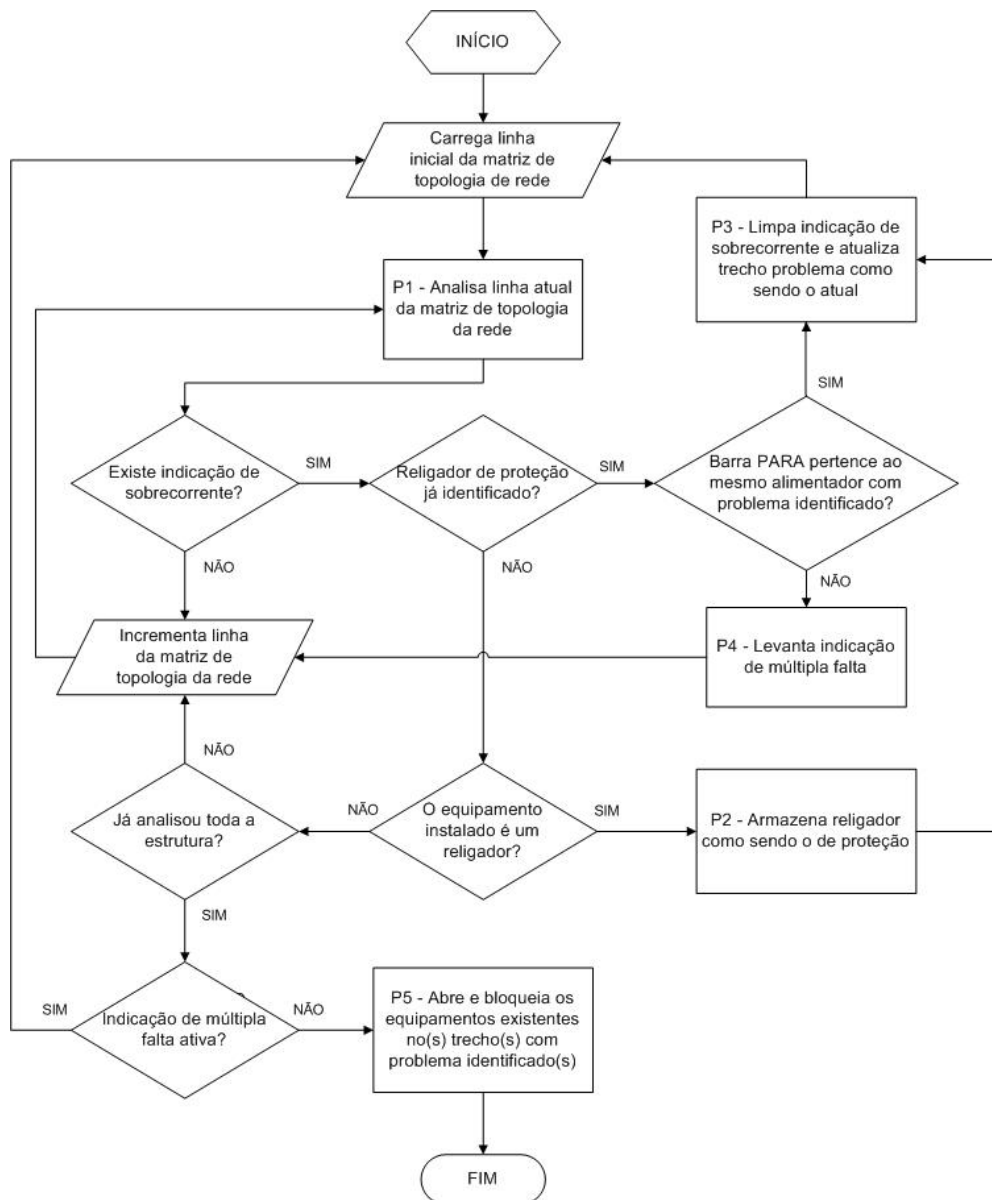
$$P_3 = 784 - 237,60 - 293,28 = 253,12 \text{ kW}$$

$$Q_3 = 159,20 - 48,39 - 106,45 = 4,36 \text{ kvar}$$

Uma vez estimados os valores de potência ativa e reativa de todos os trechos da rede, o algoritmo poderá calcular a potência aparente durante o processo de análise para a restauração, permitindo assim que ele verifique, para cada solução, se o alimentador será capaz de suprir a carga demandada.

### **3.3.4 Identificação e Isolamento dos Trechos Afetados**

Nessa etapa o algoritmo percorre todo o sistema para identificar a área afetada por um problema e promove a abertura dos trechos necessários para garantir seu isolamento. O fluxograma da Figura 3.4 apresenta os passos de funcionamento do algoritmo desenvolvido durante o processo de identificação e isolamento dos trechos afetados, que serão detalhados na sequência.



**Figura 3.4 - Fluxograma do funcionamento do processo de identificação e isolamento dos trechos afetados.**

Para identificar a área afetada, o algoritmo realiza uma busca por toda a estrutura de dados da topologia de rede com a finalidade de encontrar o religador que abriu para extinguir a corrente de falta do sistema. Para tanto, o algoritmo busca pelo religador mais a jusante de um alimentador, que esteja aberto e com indicação de passagem de corrente de curto, conforme apresentado nos passos “P1” a “P3” do fluxograma apresentado na Figura 3.4.

Uma vez identificado o religador de proteção e o alimentador ao qual pertence, o algoritmo limpa a indicação de corrente de curto e armazena o trecho que compreende o religador como sendo o trecho afetado pelo problema, iniciando em seguida uma nova

busca por toda a matriz da topologia de rede, dessa vez buscando por chaves com indicação de corrente de falta que estejam instaladas nesse mesmo alimentador. Caso encontre um trecho que possua uma chave com essa indicação, o algoritmo atualiza o trecho com problema para o atual, limpa a indicação de corrente de curto e reinicia a busca desde o início da matriz de topologia, conforme passos “P1” e “P3” do fluxograma apresentado na Figura 3.4. Esse processo se repete até que toda a estrutura seja varrida sem que nenhuma indicação de corrente de curto seja encontrada.

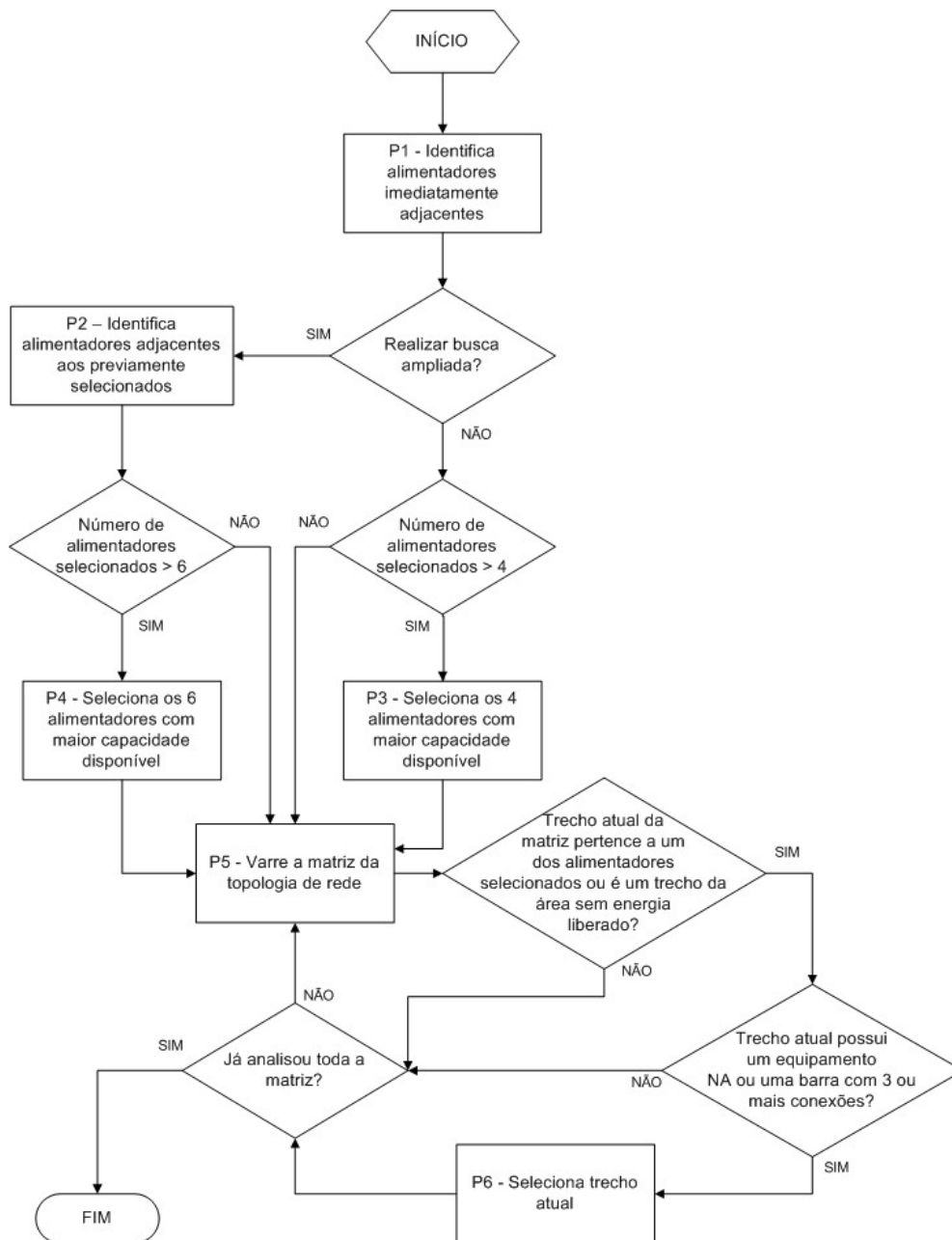
Se durante o processo de busca, um equipamento instalado em um trecho pertencente a outro alimentador possuir indicação de corrente de curto, uma indicação de múltipla falta será carregada, para que o algoritmo repita todo o processo para esse alimentador assim que finalizar a busca do problema no alimentador atual, conforme passo “P4” do fluxograma apresentado na Figura 3.4.

Uma vez analisada toda a matriz da topologia, sem que nenhuma indicação de corrente de curto tenha sido identificada, o algoritmo promove a abertura e bloqueio dos equipamentos instalados nos trechos identificados durante a busca, bem como a abertura e bloqueio dos equipamentos instalados nos trechos que façam conexão às barras “PARA” dos trechos identificados, conforme passo “P5” do fluxograma apresentado na Figura 3.4.

### **3.3.5 Identificação dos Alimentadores Adjacentes à Área Afetada**

Encontrada e isolada a área afetada por um problema, o algoritmo inicia o processo base do método proposto: a identificação dos alimentadores adjacentes à área desenergizada.

O fluxograma da Figura 3.5 apresenta as etapas principais de funcionamento do processo de identificação dos alimentadores adjacentes à área afetada, realizado pelo algoritmo, que serão detalhadas na sequência.



**Figura 3.5 - Fluxograma do funcionamento do processo de identificação dos trechos pertencentes a alimentadores adjacentes.**

O princípio de funcionamento está na seleção dos trechos pertencentes a alimentadores adjacentes à área afetada. Essa seleção foi dividida em duas etapas, que dependem das soluções obtidas pelo algoritmo para resolução do problema: busca reduzida e busca ampliada.

Inicialmente o algoritmo realiza uma busca reduzida, que consiste na seleção apenas dos trechos pertencentes aos alimentadores imediatamente adjacentes à área afetada, conforme passo “P1” do fluxograma apresentado na Figura 3.5. Esse processo é

realizado através de uma busca por toda a estrutura de dados da topologia de rede, com a finalidade de encontrar equipamentos NA que façam fronteira com o alimentador identificado com problema. Dessa forma os alimentadores imediatamente adjacentes são selecionados, considerando um limite de quatro alimentadores distintos. Caso esse limite seja ultrapassado, os quatro alimentadores com maior capacidade disponível são selecionados, conforme passo “P3” do fluxograma apresentado na Figura 3.5.

Se uma solução capaz de restaurar todas as barras possíveis não for encontrada, o algoritmo retorna para a etapa de identificação dos alimentadores adjacentes à área afetada e promove uma busca ampliada, executando o passo “P2” do fluxograma apresentado na Figura 3.5, que eleva a seleção de trechos para os alimentadores adjacentes àqueles selecionados no passo “P1”, aumentando o limite para seis alimentadores distintos. Assim como ocorre na busca reduzida, caso o limite seja ultrapassado, os seis alimentadores com maior capacidade disponível são selecionados, conforme passo “P4” do fluxograma apresentado na Figura 3.5.

Após identificar os alimentadores que farão parte do processo de seleção, o algoritmo inicia uma busca por toda a matriz de topologia da rede a fim de identificar os trechos que pertençam aos alimentadores selecionados. É importante ressaltar que os trechos pertencentes à área sem energia, com exceção daqueles bloqueados para isolamento da falta, também participam do processo de seleção.

Uma vez definido o conjunto de trechos, somente aqueles com equipamentos NA em sua ligação ou que possuam barras com três ou mais ligações, são selecionados, conforme passos “P5” e “P6” do fluxograma apresentado na Figura 3.5. A seleção de trechos com equipamentos NA se deve ao fato de que esses equipamentos são responsáveis por promover a separação entre dois alimentadores distintos, permitindo a transferência de carga quando necessário. Logo, para que exista possibilidade de restauração de uma área desenergizada, necessariamente deverá ocorrer o fechamento de um ou mais equipamentos NA, justificando sua participação no processo de análise. Já a seleção de trechos que possuam barras com três ou mais ligações é realizada para permitir a análise de rotas alternativas para a restauração, visto que esses trechos introduzem derivações ao sistema e, portanto, podem permitir rotas alternativas de alimentação. Os demais trechos não influem no processo de restauração e são considerados somente na necessidade de corte de carga.

Essas restrições de seleção reduzem consideravelmente o número de possibilidades necessárias para a solução, visto que o algoritmo realiza o teste de todas

as possibilidades possíveis dentro do universo de trechos selecionados, ou seja, é realizada uma combinação matemática simples e, portanto, quanto maior o número de trechos considerados, muito maior será o número de possibilidades testadas. Para facilitar o entendimento, considere o sistema da Figura 3.6 como exemplo.

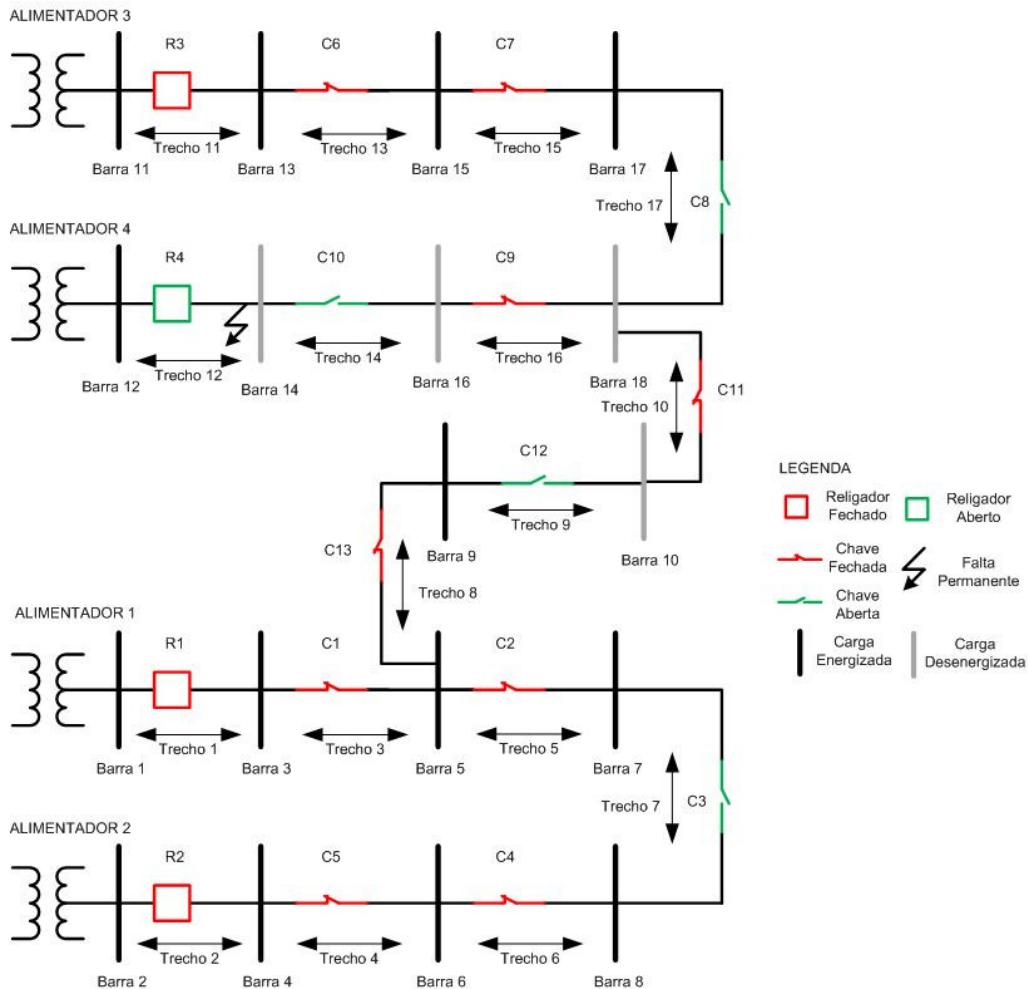
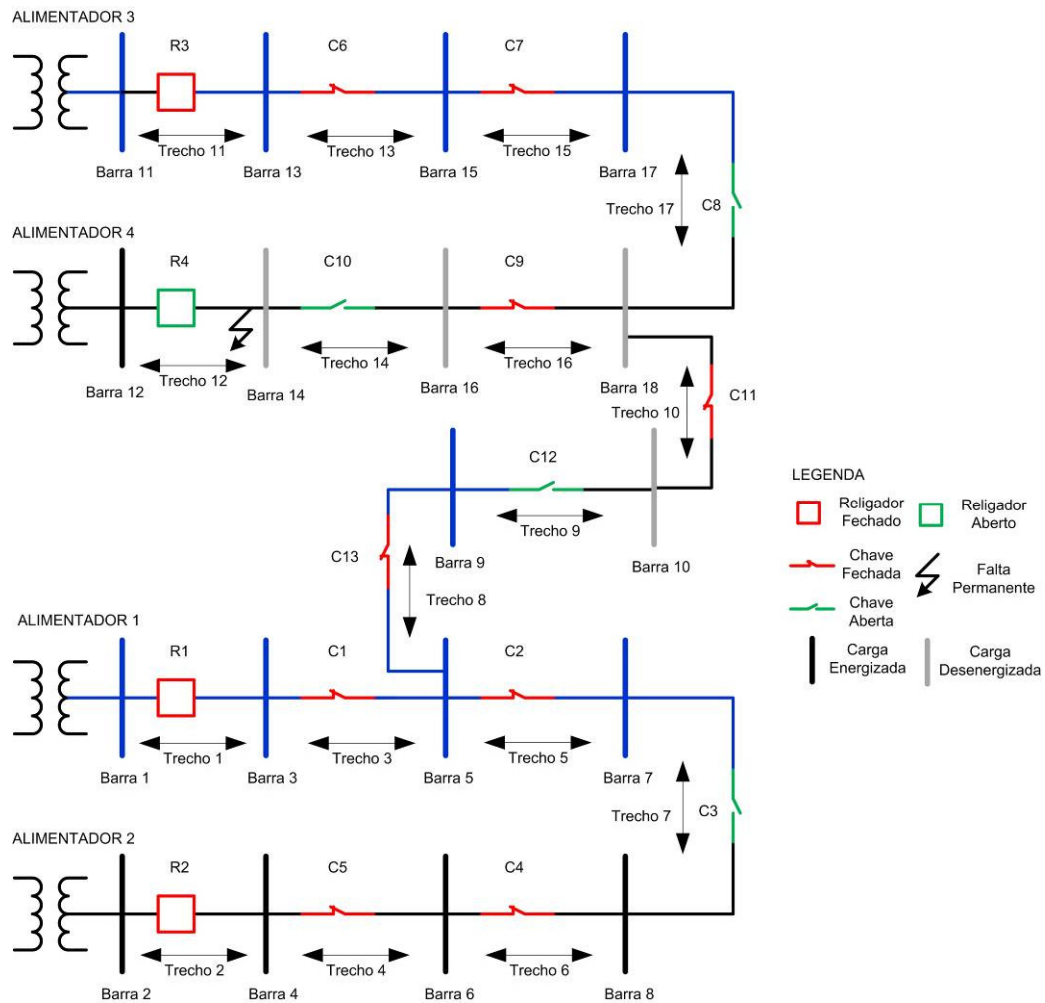


Figura 3.6 - Sistema teste com quatro alimentadores.

Após ocorrer uma falta permanente no trecho compreendido entre as barras 12 e 14, o religador R4 irá abrir permanentemente por proteção e o algoritmo irá promover a abertura da chave C10, isolando assim o trecho afetado pelo problema, porém desenergizando as barras 10, 16 e 18.

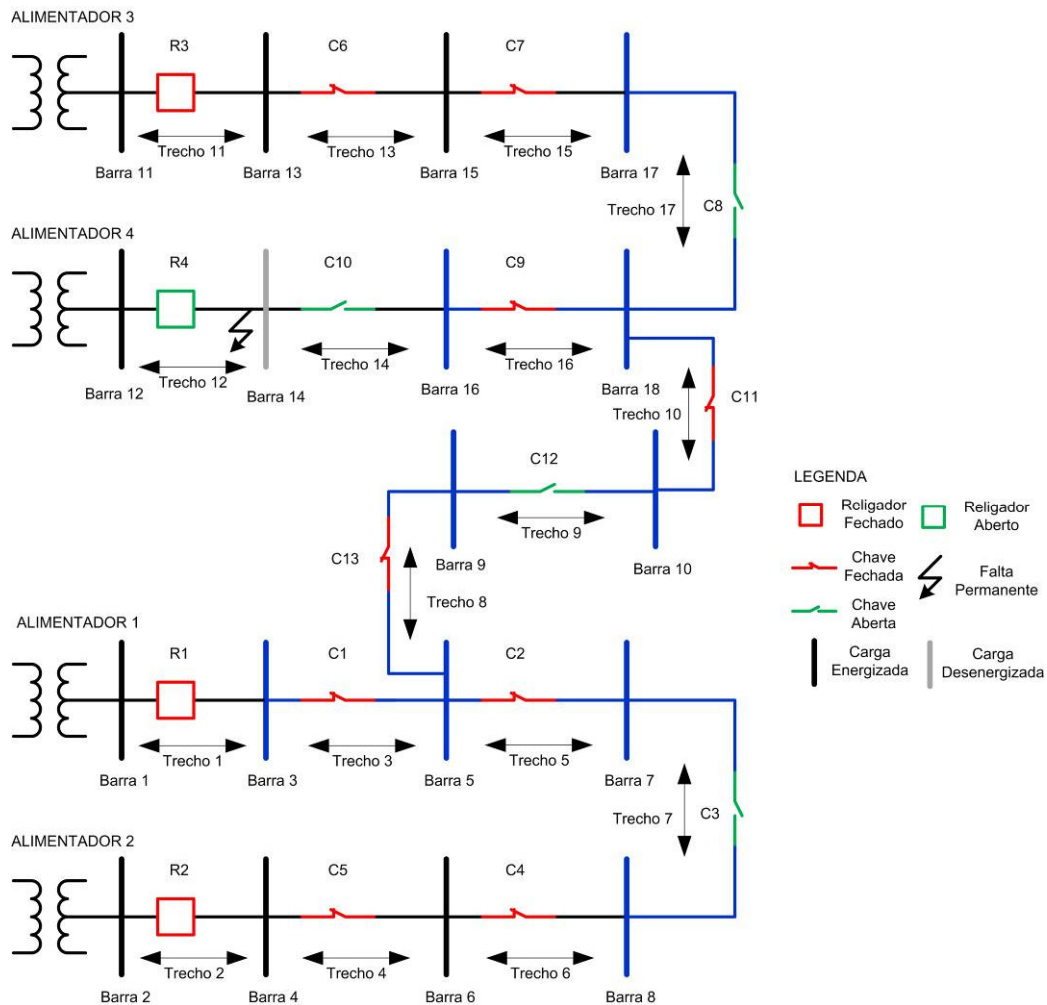
O algoritmo iniciará então a busca reduzida por alimentadores imediatamente adjacentes à área desenergizada. Serão encontrados dois alimentadores adjacentes no sistema em questão, o alimentador 1 e o alimentador 3, conforme destacado em azul na Figura 3.7.





**Figura 3.7 - Identificação das redes adjacentes na busca reduzida.**

Identificados os alimentadores imediatamente adjacentes, o algoritmo fará a seleção dos trechos que irão participar do processo de análise para restauração. Conforme dito anteriormente, somente os trechos pertencentes à área sem energia ou aos alimentadores adjacentes selecionados, e que possuam equipamentos NA em sua ligação ou que estejam conectados a barras com três ou mais conexões serão selecionados. Logo, para o sistema apresentado nesse exemplo, serão considerados, na etapa de busca reduzida, oito trechos, destacados em azul na Figura 3.8.

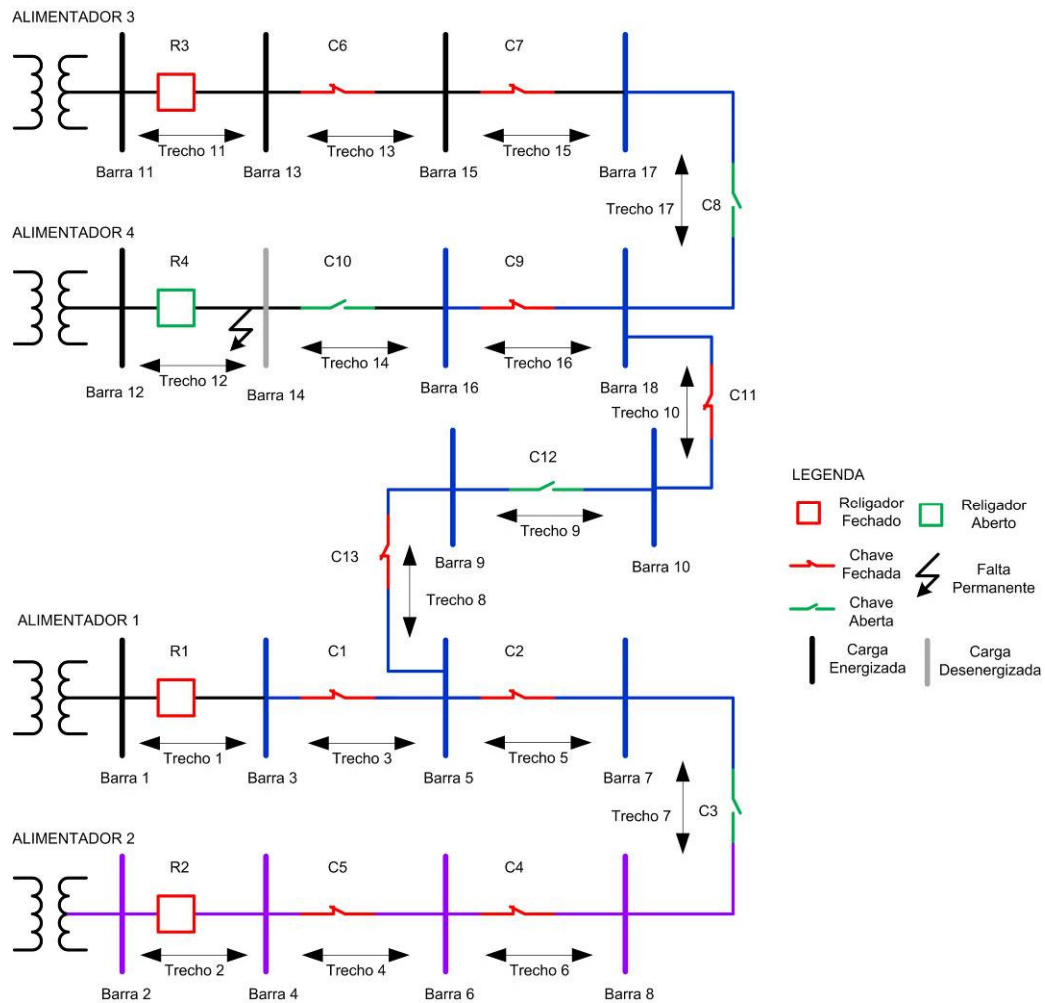


**Figura 3.8 - Seleção dos trechos que farão parte da análise para restauração.**

Os trechos interconectados pelas chaves C3, C8 e C12 foram selecionados por se tratarem de trechos que possuem equipamentos NA em sua interligação. Já os trechos interconectados pelas chaves C1, C2, C9, C11 e C13 foram selecionados por fazerem conexão com barras que possuem três ou mais ligações.

Vale ressaltar que a seleção do trecho interconectado pela chave C3 permite que o alimentador 2 participe da restauração do sistema, mesmo não sendo uma rede imediatamente adjacente.

Caso a melhor solução não seja obtida na etapa de análise para restauração, o algoritmo retornará para essa etapa e ampliará a busca para os alimentadores adjacentes àqueles selecionados anteriormente. Dessa forma, o alimentador 2, destacado em roxo na Figura 3.9, será incluso no processo de seleção de trechos.

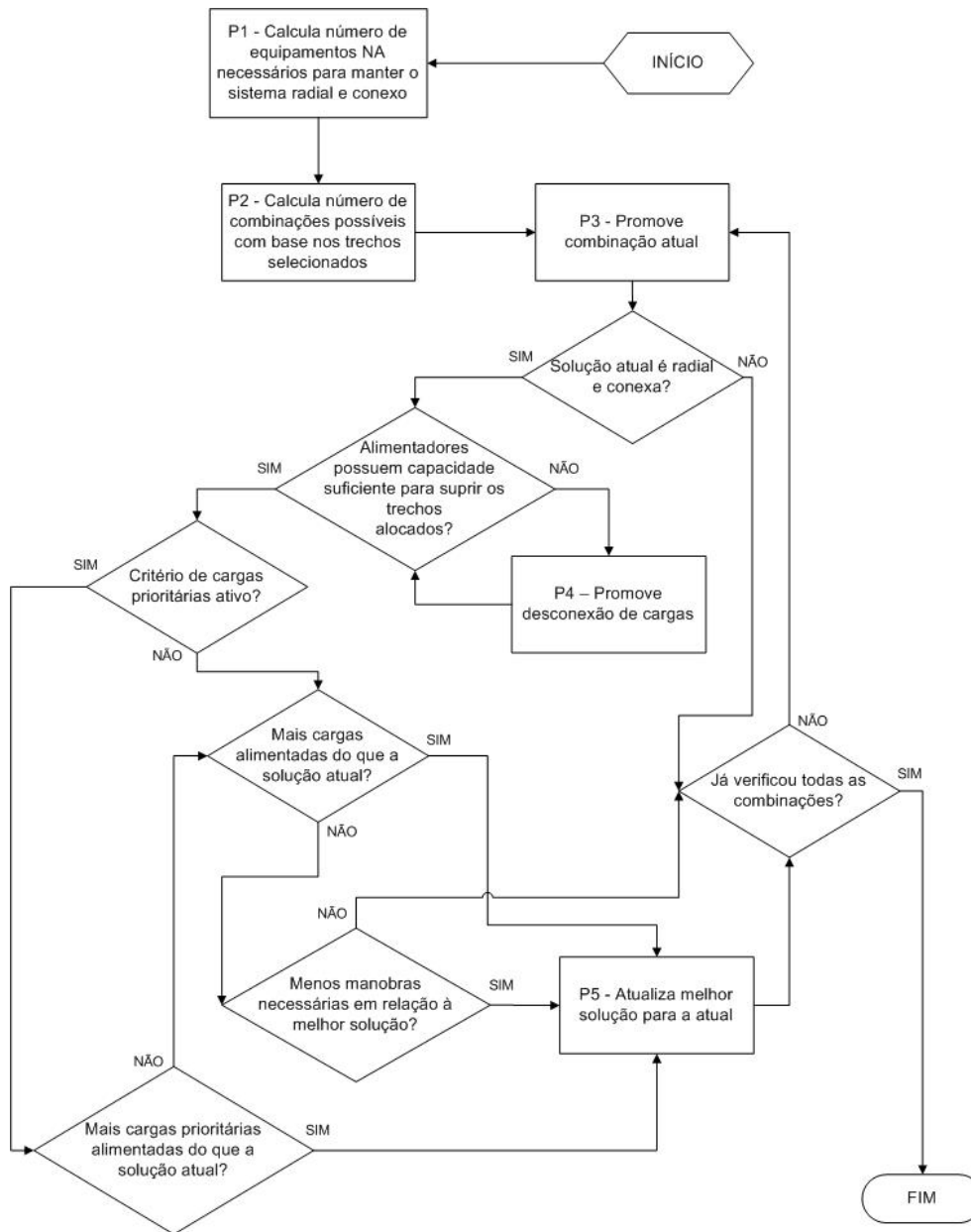


**Figura 3.9 - Identificação dos alimentadores adjacentes na busca ampliada.**

No caso do sistema utilizado nesse exemplo, nenhum novo trecho será selecionado devido à busca ampliada, visto que o único trecho do alimentador adicionado que atende às restrições de seleção é o trecho compreendido entre as barras 8 e 7, que já faz parte dos trechos selecionados na busca reduzida.

### 3.3.6 Análise para Restauração

O primeiro passo realizado pelo algoritmo, ao entrar na etapa de análise para restauração, é calcular o número de equipamentos NA necessários para manter o sistema radial e conexo, conforme passo “P1” do fluxograma apresentado na Figura 3.10.



**Figura 3.10 - Fluxograma do funcionamento do processo de análise para restauração.**

A equação (3.4) apresenta o cálculo realizado para identificar o número de equipamentos NA necessários.

$$NA = TL - (BL - BS) \quad (3.4)$$

Onde:

- $NA$  é o total de equipamentos NA necessários para manter o sistema radial e conexo;

- $TL$  é o total de trechos liberados pelo sistema, ou seja, trechos que não foram bloqueados devido à ocorrência de problemas;
- $BL$  é o total de barras liberadas pelo sistema, ou seja, barras que não estão isoladas devido à ocorrência de problemas;
- $BS$  é o total de barramentos de subestação do sistema.

Uma vez calculado o número de equipamentos NA necessários, o algoritmo verifica o total de equipamentos NA existentes no sistema, descontando os que estiverem presentes em trechos bloqueados para isolamento da falta, e subtrai desse valor o número calculado, obtendo assim o número de equipamentos NA que deverão ser fechados.

É subtraído então, do total de trechos que possuem equipamentos NA em sua ligação, selecionados na etapa descrita na seção 3.3.5, o número de equipamentos NA a serem fechados, permitindo assim que o total de possibilidades necessárias para testar todas as combinações seja calculado, conforme passo “P2” do fluxograma apresentado na Figura 3.10, através da fórmula de combinação matemática simples, dada pela equação (3.5).

$$N_{n,p} = \frac{n!}{p!(n-p)!} \quad (3.5)$$

Onde:

- $N$  é o total de possibilidades necessárias para se testar todas as combinações;
- $n$  é o total de equipamentos presentes nos trechos selecionados para participar do processo de restauração;
- $p$  é o total de equipamentos presentes nos trechos selecionados, descontado o total de equipamentos NA também presentes, que deverão existir para manter o sistema radial e conexo;

Considerando o sistema teste com quatro alimentadores da Figura 3.6, o algoritmo precisou bloquear os trechos compreendidos entre as barras 12 e 14, e as barras 14 e 16, com a finalidade de isolar o curto ocorrido na área. Logo, o total de trechos liberados do

sistema ficou igual a 15. Somente uma barra, a de número 14, não poderá ser reenergizada, sendo assim o total de barras possíveis de serem energizadas é de 17. Dessas barras, quatro são barramentos de subestação.

Substituindo todos esses valores na equação (3.4), teremos:

$$NAs = 15 - (17 - 4) = 2$$

Dessa forma serão necessários somente dois equipamentos NA no sistema para mantê-lo radial e conexo após a restauração. Considerando que inicialmente o sistema possuía três equipamentos NA, as chaves C3, C8 e C12, apenas um equipamento NA deverá se tornar NF.

Ao analisar os trechos selecionados, apresentados na Figura 3.8, é possível verificar todos os três equipamentos NA estão presentes. Como somente um equipamento deve ser fechado, o algoritmo fará uma combinação matemática de oito equipamentos, tomados seis a seis, visto que a solução final deverá possuir seis equipamentos fechados e dois abertos. Sendo assim, a equação (3.5) ficará da seguinte forma:

$$N_{8,6} = \frac{8!}{6! * (8 - 6)!} = 28$$

Portanto o algoritmo irá testar vinte e oito possibilidades para restaurar o sistema em questão.

A cada combinação, o algoritmo avalia a solução obtida a fim de eleger a melhor resolução para o problema, conforme passos “P3” do fluxograma apresentado na Figura 3.10.

Após executar uma combinação, o algoritmo verifica se o sistema é radial e conexo. Em caso positivo, o algoritmo verifica se os alimentadores possuem capacidade de alimentar todas as barras que foram alocadas. Se algum alimentador não tiver capacidade suficiente de alimentar todas as cargas, o algoritmo promove a desconexão de uma carga e repete o processo de verificação, até que o alimentador em questão tenha capacidade suficiente para prover energia a todas as cargas, conforme passo “P4” do fluxograma apresentado na Figura 3.10. Esse processo de desconexão é iniciado sempre pela carga mais a jusante do ramo. Caso existam duas ou mais barras de extremidade no ramo, o trecho escolhido para desconexão será aquele com menor prioridade, que é apresentada na coluna “PRIORIDADE” da Tabela 3.1.

Após essa etapa, o algoritmo compara a solução obtida com a melhor solução encontrada até o momento, conforme passo “P5” do fluxograma apresentado na Figura

3.10, podendo considerar dois quesitos principais: número de cargas energizadas ou número de cargas prioritárias energizadas. Para a primeira opção o algoritmo considera como melhor solução aquela que apresentar o maior número de cargas energizadas. Caso existam duas ou mais soluções com o mesmo número de cargas energizadas, o algoritmo elege a que demandar o menor número de manobras dos equipamentos. Já para a opção de cargas prioritárias, a melhor solução será a que energizar todas as cargas prioritárias e o maior número das demais cargas. Da mesma forma que ocorre para a opção anterior, caso existam duas ou mais soluções com o mesmo número de cargas energizadas, a melhor solução será a que promover o menor número de manobras no sistema.

Caso o algoritmo tenha realizado somente a busca reduzida por alimentadores adjacentes e, até esse ponto, não tenha encontrado uma solução capaz de energizar todas as barras possíveis de serem restauradas, ele retorna à etapa de busca por alimentadores adjacentes e realiza uma busca ampliada. Caso contrário, se a busca ampliada já foi realizada, a restauração é finalizada com a melhor solução encontrada.

### **3.3.7 Restauração do Sistema**

Obtida a melhor solução, o algoritmo identifica todos os equipamentos que deverão ser manobrados para isolar a área afetada pelo problema, definidos na etapa descrita na seção 3.3.4, bem como aqueles necessários para o restabelecimento do sistema, obtidos na etapa anterior.

Feito isso, caso esteja no modo de simulação, o algoritmo irá imprimir todos os dados na tela para avaliação do usuário. Já no modo de operação real, o algoritmo passará para o software de integração com o SCADA, através de um protocolo previamente definido, os dados dos equipamentos a serem manobrados, permitindo assim a restauração do sistema de forma automática.

### **3.3.8 Análise de Tensão**

A análise de tensão da solução escolhida é um módulo adicional do algoritmo que pode ser utilizado durante o processo de restauração, de acordo com a necessidade do usuário. Porém, para sua utilização, é necessário que o usuário informe os valores das

impedâncias dos alimentadores. Feito isso, um fluxo de potência é executado para cada melhor solução encontrada pelo algoritmo, onde as cargas são estimadas conforme as equações (3.1) e (3.2), e alocadas nas barras terminais da área de medição da carga. Caso uma dada melhor solução possua quedas de tensão maiores que o permitido, essa é descartada, mantendo o algoritmo a melhor solução validada até o momento.



## Capítulo 4 Método Baseado em Algoritmos Genéticos

### 4.1 Introdução

Com o propósito de comparar os resultados obtidos com o método proposto, foi desenvolvido um código baseado em Algoritmos Genéticos (AG).

As etapas de funcionamento do algoritmo desenvolvido são idênticas às do método proposto, apresentadas no capítulo anterior, se diferenciando somente naquelas relacionadas à restauração da rede propriamente dita, que é baseada em AG.

Nesse capítulo será apresentado o método baseado em AG desenvolvido, com foco nos parâmetros do AG utilizados, visto que as demais etapas, tais como a estrutura de dados utilizada, identificação e isolamento da falha, entre outras, são iguais às do método proposto e já foram detalhadas no capítulo 3.

### 4.2 Fluxograma do Algoritmo

O método baseado em AG foi implementado computacionalmente utilizando a *toolbox* do MATLAB e o fluxograma apresentado na Figura 4.1 destaca as principais etapas de funcionamento do algoritmo.



Figura 4.1 - Fluxograma das principais etapas do algoritmo baseado em AG desenvolvido.

Conforme mencionado anteriormente, as etapas de 1 a 4, além da etapa 6, são idênticas às do método proposto e foram detalhadas no capítulo 3. Sendo assim, a seção a seguir irá detalhar a etapa 5, apresentado os parâmetros utilizados para o funcionamento do AG. Para facilitar o entendimento, usaremos como base o sistema da Figura 4.2.

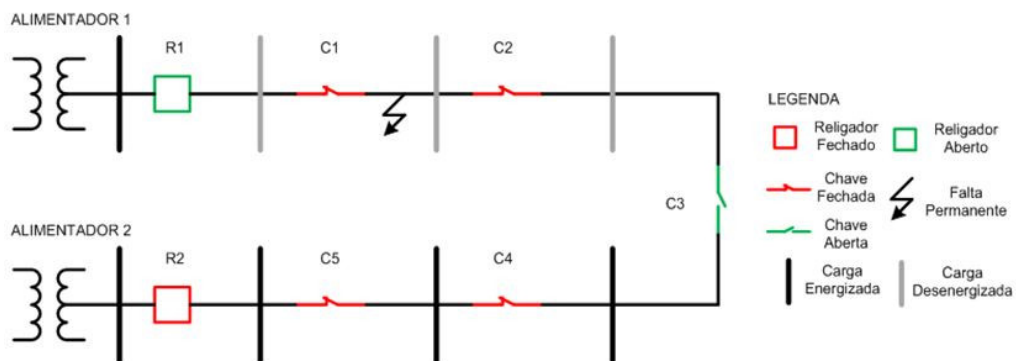


Figura 4.2 - Sistema teste para análise do algoritmo baseado em AG.

### 4.3 Análise para Restauração Baseada em AG

Após isolar a área afetada pelo problema e bloquear os trechos que não farão parte do processo de restauração, o AG é inicializado. O fluxograma da Figura 4.3 apresenta as principais etapas do AG, que serão descritas na sequência.

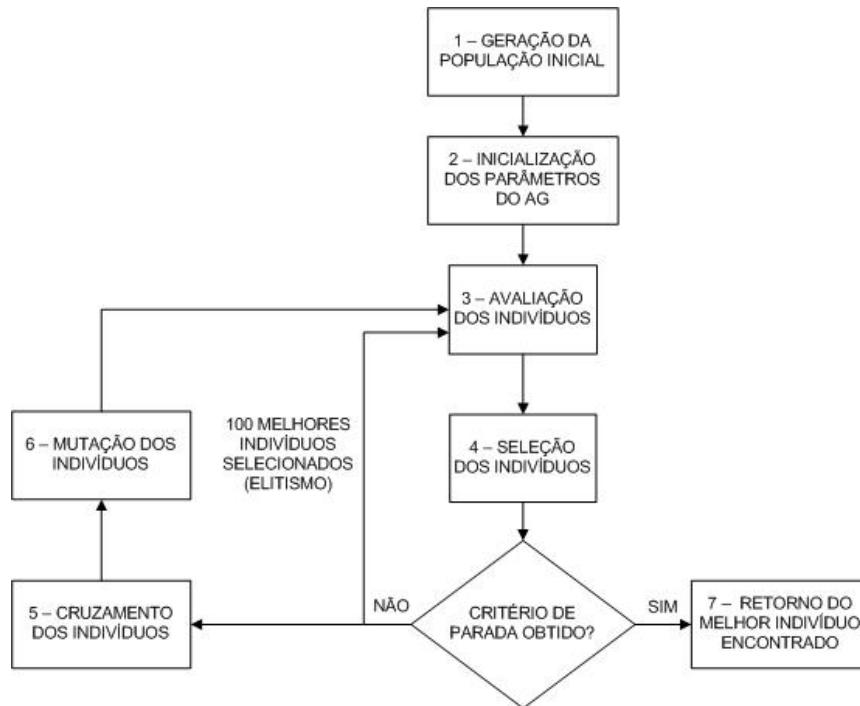


Figura 4.3 - Fluxograma das principais etapas do AG utilizado.

#### 4.3.1 Geração da População Inicial

Cada indivíduo (cromossomo) do AG representa uma possível solução para o problema, sendo formado por uma sequência binária, conforme apresentado na Figura 4.4.

E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	...	En
1	0	0	1	1	0	1	...	1

Figura 4.4 - Indivíduo do AG proposto.

Cada bit (gene) corresponde ao estado de um equipamento pertencente ao sistema, onde o valor 0 é a representação de um equipamento aberto e o valor 1 de um

equipamento fechado. Os equipamentos bloqueados para operação pelo algoritmo são desconsiderados do processo.

O AG proposto é inicializado com uma população composta por um indivíduo correspondente à topologia atual do sistema, após o isolamento da área afetada, e os demais gerados de forma aleatória.

O indivíduo correspondente ao sistema da Figura 4.2, após o isolamento da área afetada, é apresentado na Figura 4.5.

R1	R2	C3	C4	C5
1	1	0	1	1

**Figura 4.5 - Indivíduo correspondente à topologia atual do sistema teste.**

Como pode ser observado na Figura 4.5, os equipamentos C1 e C2 não fazem parte do processo por estarem bloqueados para operação, visto que estão isolando a área afetada pelo problema. Além disso, o equipamento R1, que abriu para extinguir a corrente de defeito, é representado como fechado, uma vez esse era o seu estado inicial e ele não está bloqueado para operação.

### 4.3.2 Inicialização dos Parâmetros do AG

Uma vez gerada a população inicial, os parâmetros de funcionamento do AG, necessários devido à utilização da *toolbox* do MATLAB, são configurados. Os principais parâmetros de controle utilizados no AG desenvolvido são apresentados na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1 - Parâmetros de controle do AG.**

Parâmetro	Valor
Tamanho da população	2200 indivíduos
População Inicial	Vetor gerado na etapa 1
Tipo de população	bitString
Total de gerações	15
Elitismo	100 indivíduos
Taxa de cruzamento	0,96
Limite máximo de execução	180 segundos

Função de seleção	@selectiontournament
Função de cruzamento	@crossoversinglepoint
Função de mutação	@mutationadaptfeasible

### 4.3.3 Avaliação dos Indivíduos

Cada indivíduo da população atual é avaliado pela função *fitness* e tem um valor de aptidão atribuído, que será utilizado como critério de seleção.

A função *fitness* desenvolvida é multiobjetivo, uma vez que a restauração do sistema procura maximizar o número de cargas energizadas e ao mesmo tempo minimizar o número de manobras necessárias.

A equação (4.1) apresenta a fórmula considerada pela função *fitness*:

$$fitness = ((BP - BP_E) * 0,5) + ((B - B_E) * 0,1) + \left( \frac{S_c}{S_t} * 0,39 \right) + \left( \frac{M}{E} * 0,01 \right) \quad (4.1)$$

Onde:

- $BP$  é o total de barras prioritárias do sistema configuradas pelo usuário;
- $BP_E$  é o número de barras prioritárias energizadas pela solução atual;
- $B$  é o total de barras do sistema;
- $B_E$  é o número de barras energizadas pela solução atual;
- $S_c$  é a capacidade de carga disponível no alimentador carregado, ou seja, já descontado o total consumido;
- $S_t$  é a capacidade de carga total do alimentador;
- $M$  é o número de manobras necessárias para executar a resposta obtida;
- $E$  é o total de equipamentos do sistema;

Os pesos apresentados na equação (4.1) foram ajustados através de análise dos resultados obtidos após testes exaustivos do algoritmo.

Caso um indivíduo apresente uma solução não radial e/ou desconexa para o sistema, o valor de  $S_c$  será igual ao valor de  $S_t$ .

#### **4.3.4 Seleção dos Indivíduos**

Uma vez avaliados, os melhores indivíduos da população atual são selecionados para gerar descendentes, que farão parte da próxima geração de indivíduos, no intuito de proporcionar uma melhora na solução para o problema em questão.

Devido à utilização do elitismo, os 100 melhores indivíduos da população atual são selecionados para participar da próxima geração sem qualquer alteração.

Uma vez que o tamanho da população configurado é de 1200 indivíduos, restam 1100 indivíduos para completar a nova geração.

A seleção desses indivíduos é feita por torneio entre 4 participantes, onde o vencedor de cada disputa é aquele com o melhor valor de aptidão, obtido na etapa anterior.

Caso nenhum critério de parada seja obtido, os indivíduos selecionados no processo de torneio sofrerão alterações por parte dos operadores genéticos, que tem o objetivo de diversificar a nova geração enquanto mantêm algumas características adquiridas nas gerações anteriores.

#### **4.3.5 Cruzamento dos Indivíduos**

Conforme configurado durante a segunda etapa, 96% dos indivíduos selecionados na etapa anterior participarão de um cruzamento, que tem o objetivo de formar novos indivíduos que possuam genes de duas soluções distintas.

O cruzamento adotado é o de ponto único, onde dois indivíduos são escolhidos aleatoriamente e um ponto de cruzamento é definido, também de forma aleatória, para os dois participantes. Todos os genes existentes após o ponto de cruzamento serão trocados entre os pais, gerando dessa forma dois filhos distintos, que terão parte dos genes pertencentes a um pai e parte pertencente ao outro, conforme Figura 4.6.

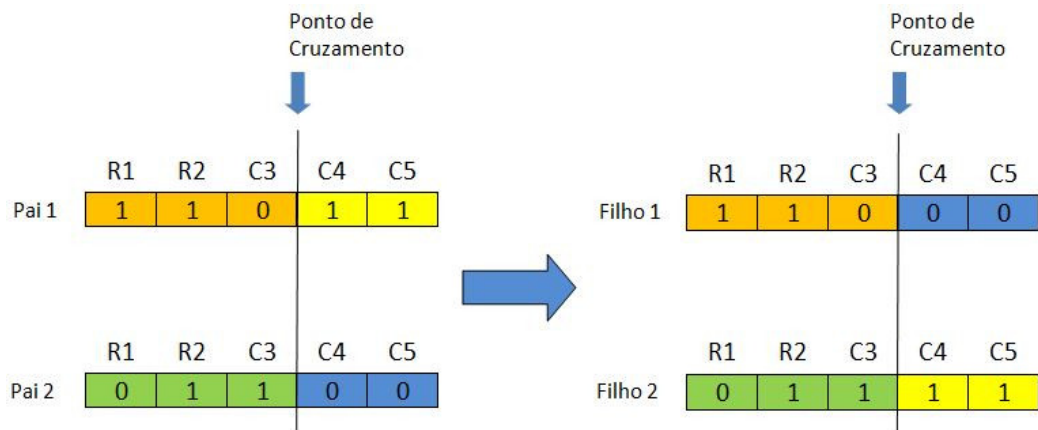


Figura 4.6 - Cruzamento de um ponto utilizado pelo AG.

### 4.3.6 Mutação dos Indivíduos

Nos indivíduos que não sofreram cruzamento na etapa anterior, 4% do total selecionado por torneio na etapa 4, é aplicada uma mutação adaptativa, onde um ou mais genes são alterados, conforme Figura 4.7, adotando os resultados obtidos nas gerações anteriores como critério de mutação.

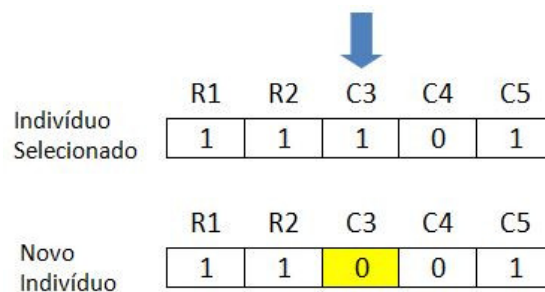


Figura 4.7 - Mutação de um gene.

### 4.3.7 Retorno do Melhor Indivíduo Encontrado

Após atingir 15 gerações ou ultrapassar o tempo máximo de execução de 180 segundos ou manter o valor médio da melhor solução sem alterações superiores a  $1e-6$ , o AG é finalizado.

O melhor indivíduo encontrado durante o processo de execução do AG é retornado e o algoritmo parte para a etapa de restauração do sistema, da mesma forma como ocorre no método proposto.



# Capítulo 5 Testes e Resultados com Sistemas Simulados

## 5.1 Introdução

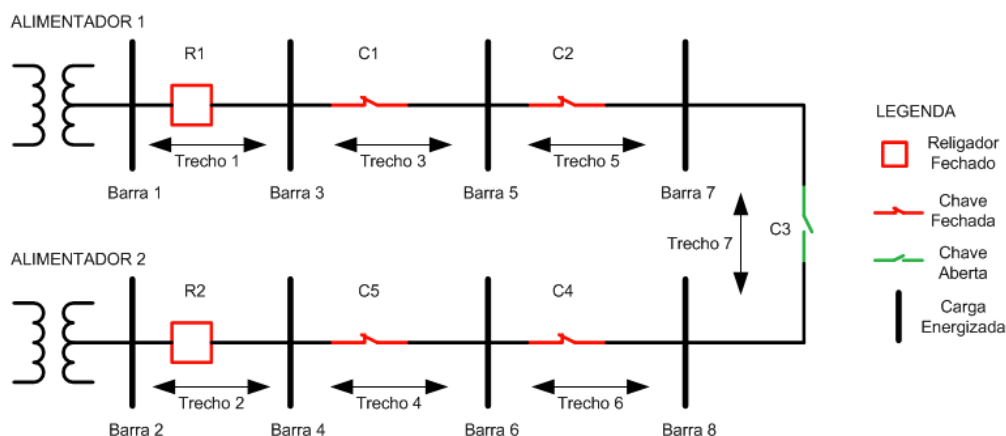
Com a finalidade de comprovar a eficiência do método proposto para o problema de restauração de sistemas de distribuição, foram realizados testes em quatro sistemas de distribuição simulados, com as seguintes características:

- Sistema 1: 8 barras, 7 equipamentos telecontrolados (6 NF e 1 NA) e 2 alimentadores;
- Sistema 2: 18 barras, 17 equipamentos telecontrolados (14 NF e 3 NA) e 4 alimentadores;
- Sistema 3 (baseado em um sistema real brasileiro): 155 seções, 200 equipamentos telecontrolados (139 NF e 61 NA) e 51 alimentadores;
- Sistema 4: 27 seções laterais, 33 equipamentos (19 NF e 14 NA) e 10 alimentadores.

Nesse capítulo serão apresentados os resultados obtidos utilizando o método proposto e o método baseado em AG, para restaurar os sistemas de 1 a 3 apresentados frente à faltas em trechos distintos. Além disso, será apresentada uma comparação dos resultados obtidos entre o método proposto e o método baseado em redes neurais de função de base radial desenvolvido em (HUANG *et al.*, 2011), para restauração do sistema 4 frente a uma falta em um único ponto, porém com diferentes níveis de carregamento.

## 5.2 Sistema 1

O sistema 1 possui 8 barras, 2 alimentadores e 7 equipamentos telecontrolados, sendo 6 equipamentos NF e 1 equipamento NA, conforme apresentado na Figura 5.1.



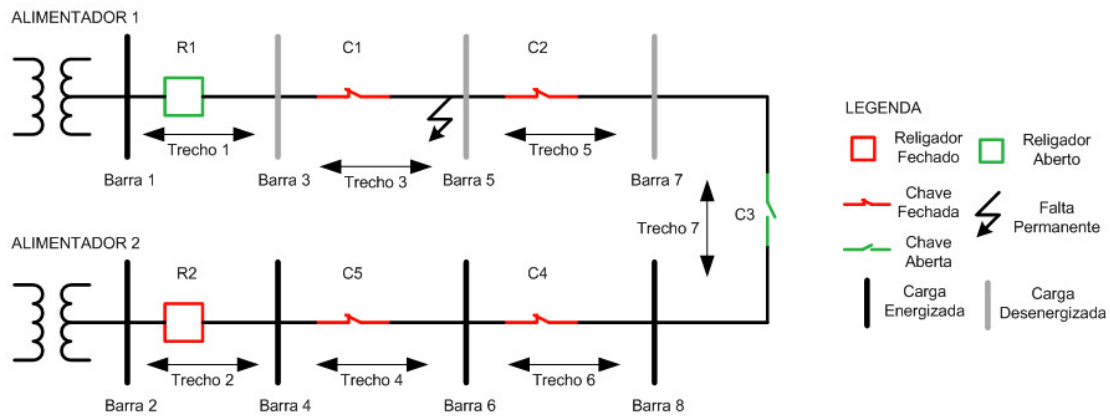
**Figura 5.1 - Sistema 1.**

A Tabela 5.1 apresenta os valores de medição necessários para o processo, conforme apresentado no capítulo 3, lidos por cada um dos equipamentos presentes no sistema.

**Tabela 5.1 - Valores de medição do sistema 1.**

ID	VA (kV)	IA (A)	FPA	VB (kV)	IB (A)	FPB	VC (kV)	IC (A)	FPC	TRECHO
1	8,0	100	0,98	8,0	100	0,98	8,0	100	0,98	1
2	8,0	100	0,97	8,0	100	0,97	8,0	100	0,97	2
3	7,9	70	0,96	7,9	70	0,96	7,9	70	0,96	3
4	7,9	65	0,97	7,9	65	0,97	7,9	65	0,97	4
5	7,8	40	0,94	7,8	40	0,94	7,8	40	0,94	5
6	7,8	35	0,95	7,8	35	0,95	7,8	35	0,95	6
7	7,7	0	0	7,7	0	0	7,7	0	0	7

Uma falta foi simulada no trecho 3 do sistema 1. Em uma situação real, a chave C1 indicaria a passagem de uma corrente de curto e o religador R1, após realizar as tentativas de religamento, abriria e iria a bloqueio, interrompendo a alimentação de todo o ramo energizado pelo alimentador 1, conforme Figura 5.2.



**Figura 5.2 - Curto no trecho 3 do sistema 1.**

Dessa forma, essas informações foram inseridas no algoritmo, promovendo a inicialização do processo de restauração do sistema.

O algoritmo realizou a estimativa das cargas do sistema, baseado nos valores da Tabela 5.1, medidos antes do curto. A Tabela 5.2 apresenta as estimativas calculadas.

**Tabela 5.2 - Cargas estimadas para as barras do sistema 1.**

Barra	Pot. Ativa	Pot. Reativa	Pot. Ativa	Pot. Reativa	Pot. Ativa	Pot. Reativa
	Fase A (kW)	Fase A (kVAR)	Fase B (kW)	Fase B (kVAR)	Fase C (kW)	Fase C (kVAR)
3	253,120	4,357	253,120	4,357	253,120	4,357
4	277,905	69,649	277,905	69,649	277,905	69,649
5	237,600	48,393	237,600	48,393	237,600	48,393
6	238,745	39,590	238,745	39,590	238,745	39,590
7	293,280	106,446	293,280	106,446	293,280	106,446
8	259,350	85,244	259,350	85,244	259,350	85,244

Em seguida o algoritmo inicia a identificação e isolamento da área afetada pelo curto. Foi identificado que o curto está presente no trecho 3, que as chaves C1 e C2 devem ser abertas e bloqueadas para participar do processo de análise para restauração, impedindo qualquer possibilidade de restauração para a barra 5 e liberando o religador R1 que abriu por proteção para ser fechado novamente.

Uma vez isolado o problema, a próxima etapa é a identificação dos alimentadores adjacentes à área afetada. Nesse sistema, o único trecho que atende às restrições de

seleção apresentadas no capítulo 3 é o trecho 7, sendo, portanto o único trecho selecionado.

Ao entrar na etapa de análise para restauração, o algoritmo calculou que o sistema não deverá possuir nenhum equipamento NA para restaurar o sistema, lembrando que os equipamentos abertos e bloqueados não são levados em conta, conforme a equação (3.4).

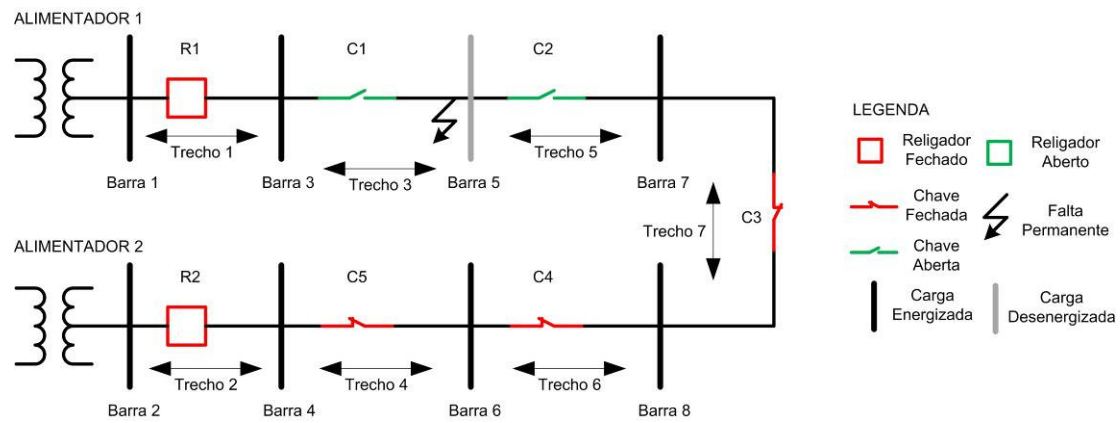
Dessa forma, como somente um trecho foi selecionado e ele possui um equipamento NA, a única possibilidade de restauração do sistema é o fechamento desse trecho. O algoritmo verifica então que o alimentador 2 possui potência suficiente para alimentar a barra 7 e permite o fechamento da chave C3, finalizando a etapa de análise e partindo para a etapa de restauração do sistema.

Uma vez que o teste foi realizado de forma simulada, o algoritmo imprime na tela as ações que deverão ser realizadas para restaurar o sistema 1, bem como o tempo de processamento necessário para resolução, conforme apresentado na Figura 5.3.

```
Command Window
Número de Barras do sistema: 8
Número de NFs inicial: 6
Número de NAs inicial: 1
Número de Linhas inicial: 0
-----
Número do trecho com problema: 3
-----
Número das barras desenergizadas: 3 5 7
Número das barras que não poderão ser reenergizadas: 5
Número de possibilidades: 1
-----
Para isolar a área afetada deve-se:
Abrir o trecho 3
Abrir o trecho 5
-----
Para reconfigurar deve-se :
Fechar o trecho 7
Fechar o trecho (proteção) 1
-----
Máximo de barras que podem ser energizadas: 7
Barras energizadas pela solução: 7
Elapsed time is 0.188754 seconds.
fx >> |
```

**Figura 5.3 - Resultado da restauração do sistema 1.**

A configuração final do sistema após a restauração é apresentada na Figura 5.4.



**Figura 5.4 - Configuração do sistema 1 após a restauração.**

A mesma falta apresentada para o sistema 1 foi exposta ao algoritmo baseado em AG. A resposta obtida foi idêntica à encontrada pelo método proposto, porém com um tempo bem superior, como mostra a Tabela 5.3.

**Tabela 5.3 - Resultados obtidos para o sistema 1 com os dois métodos, após 100 execuções.**

MÉTODO	BARRAS ENERGIZADAS NA MELHOR SOLUÇÃO	MANOBRAS EXECUTADAS NA MELHOR SOLUÇÃO	BARRAS DESENERGIZADAS NA MELHOR SOLUÇÃO	PERCENTUAL DE OCORRÊNCIA DA MELHOR SOLUÇÃO	TEMPO MÉDIO DE EXECUÇÃO
Proposto	7	4	Nenhuma	100%	0,183 segundos
Baseado em AG	7	4	Nenhuma	100%	5,16 segundos

### 5.3 Sistema 2

O sistema 2 possui 18 barras, 4 alimentadores e 17 equipamentos telecontrolados, sendo 14 equipamentos NF e 3 equipamentos NA, conforme apresentado na Figura 5.5.

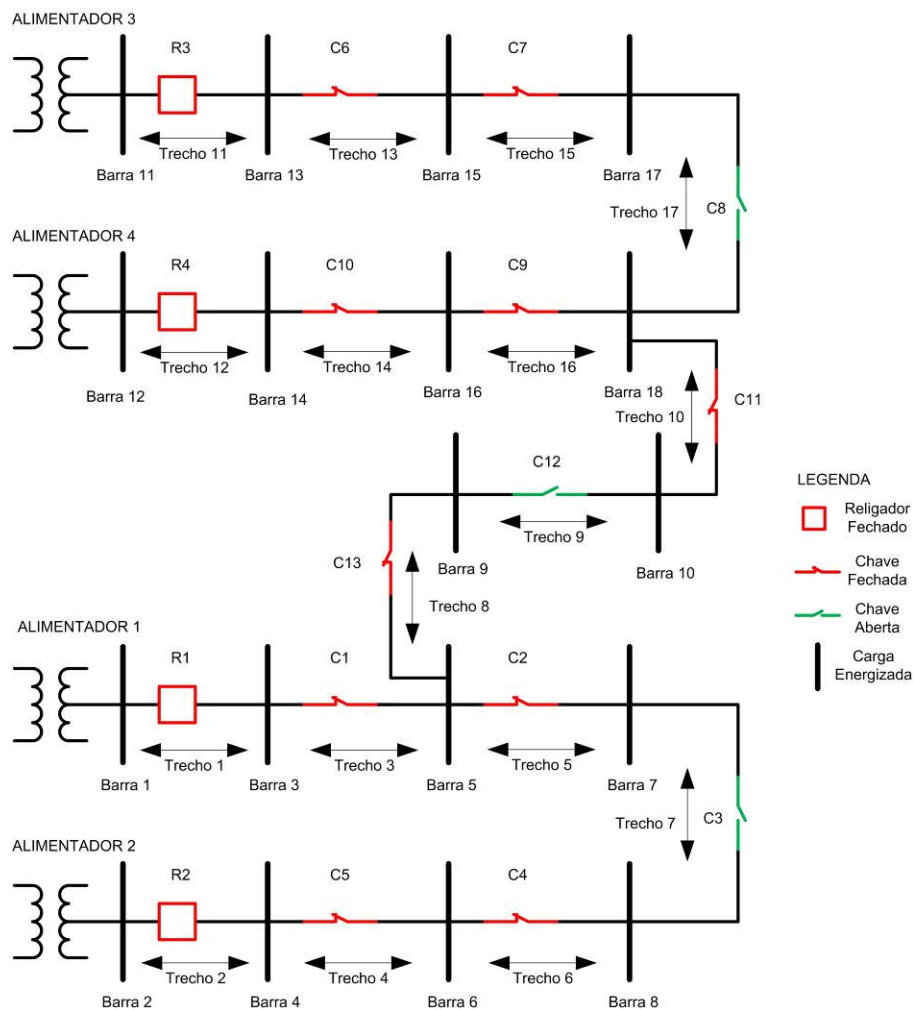


Figura 5.5 - Sistema 2.

A Tabela 5.4 apresenta os valores de medição necessários para o processo, conforme apresentado no capítulo 3, lidos por cada um dos equipamentos presentes no sistema.

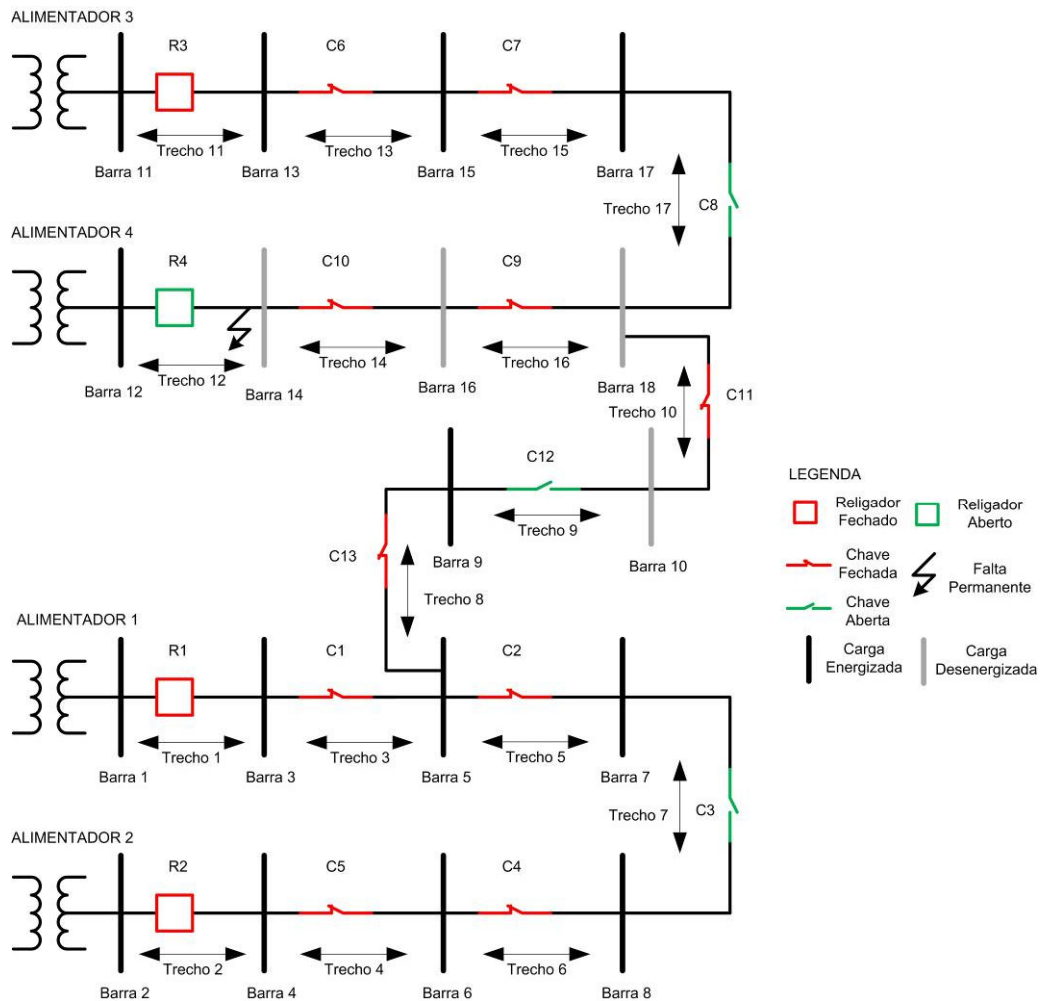
Tabela 5.4 - Valores de medição do sistema 2.

ID	VA (kV)	IA (A)	FPA	VB (kV)	IB (A)	FPB	VC (kV)	IC (A)	FPC	TRECHO
1	8,0	130	0,98	8,0	130	0,98	8,0	130	0,98	1
2	8,0	80	0,97	8,0	80	0,97	8,0	80	0,97	2
3	7,9	70	0,96	7,9	70	0,96	7,9	70	0,96	3
4	7,9	45	0,97	7,9	45	0,97	7,9	45	0,97	4
5	7,8	20	0,94	7,8	20	0,94	7,8	20	0,94	5
6	7,8	25	0,95	7,8	25	0,95	7,8	25	0,95	6
7	7,7	0	0	7,7	0	0	7,7	0	0	7

8	7,8	50	0,96	7,8	50	0,96	7,8	50	0,96	8
9	7,7	0	0	7,7	0	0	7,7	0	0	9
10	7,8	20	0,95	7,8	20	0,95	7,8	20	0,95	10
11	8,0	100	0,98	8,0	100	0,98	8,0	100	0,98	11
12	8,0	120	0,97	8,0	120	0,97	8,0	120	0,97	12
13	7,9	70	0,96	7,9	70	0,96	7,9	70	0,96	13
14	7,9	60	0,97	7,9	60	0,97	7,9	60	0,97	14
15	7,8	40	0,94	7,8	40	0,94	7,8	40	0,94	15
16	7,8	30	0,95	7,8	30	0,95	7,8	30	0,95	16
17	7,7	0	0	7,7	0	0	7,7	0	0	17

### 5.3.1 Simulação 1

Na simulação 1, uma falta foi simulada no trecho 12 do sistema 2. Em uma situação real, o religador R4, após realizar as tentativas de religamento, abriria e iria a bloqueio, interrompendo a alimentação de todo o ramo energizado pelo alimentador 4, conforme Figura 5.6.



**Figura 5.6 – Simulação 1 no sistema 2.**

Dessa forma, essas informações foram inseridas no algoritmo, promovendo a inicialização do processo de restauração do sistema.

O algoritmo realizou a estimativa das cargas do sistema, baseado nos valores da Tabela 5.4, medidos antes do curto. A Tabela 5.5 apresenta as estimativas calculadas.

**Tabela 5.5 - Cargas estimadas para as barras do sistema 2.**

Barra	Pot. Ativa	Pot. Reativa	Pot. Ativa	Pot. Reativa	Pot. Ativa	Pot. Reativa
	Fase A (kW)	Fase A (kVAR)	Fase B (kW)	Fase B (kVAR)	Fase C (kW)	Fase C (kVAR)
3	488,320	52,117	488,320	52,117	488,320	52,117
4	275,965	69,163	275,965	69,163	275,965	69,163
5	9,840	-7,583	9,840	-7,583	9,840	-7,583
6	159,585	25,535	159,585	25,535	159,585	25,535
7	146,640	53,223	146,640	53,223	146,640	53,223



8	185,250	60,889	185,250	60,889	185,250	60,889
9	374,400	109,200	374,400	109,200	374,400	109,200
10	148,200	48,711	148,200	48,711	148,200	48,711
13	253,120	4,358	253,120	4,358	253,120	4,358
14	471,420	118,149	471,420	118,149	471,420	118,149
15	237,600	48,393	237,600	48,393	237,600	48,393
16	237,480	42,165	237,480	42,165	237,480	42,165
17	293,280	106,446	293,280	106,446	293,280	106,446
18	74,100	24,355	74,100	24,355	74,100	24,355

Em seguida o algoritmo inicia a identificação e isolamento da área afetada pelo curto. Foi identificado que o curto está presente no trecho 12, que a chave C10 deve ser aberta e bloqueada para participar do processo de análise para restauração, bem como o religador R4, que já se encontra aberto devido à atuação da proteção, deixando a barra 14 sem possibilidade de restauração.

Uma vez isolado o problema, a próxima etapa é a identificação dos alimentadores adjacentes à área afetada. Visto que esse sistema possui quatro alimentadores, podem existir até três alimentadores adjacentes à área afetada. Para o exemplo apresentado, foram identificados dois alimentadores adjacentes após a busca reduzida: alimentador 1 e alimentador 3. Sendo assim, existem oito trechos que atendem às restrições de seleção apresentadas no capítulo 3, conforme descrito na Tabela 5.6.

**Tabela 5.6 - Trechos selecionados para a análise da restauração da simulação 1 do sistema 2.**

TRECHO	MOTIVO DA SELEÇÃO
3	Possui barra com 3 ou mais conexões (Barra 5)
5	Possui barra com 3 ou mais conexões (Barra 5)
7	Possui equipamento NA (C3)
8	Possui barra com 3 ou mais conexões (Barra 5)
9	Possui equipamento NA (C12)
10	Possui barra com 3 ou mais conexões (Barra 18)
16	Possui barra com 3 ou mais conexões (Barra 18)
17	Possui equipamento NA (C8)

Ao entrar na etapa de análise para restauração, o algoritmo calculou que o sistema deverá possuir dois equipamentos NA para restaurar o sistema, lembrando que os

equipamentos abertos e bloqueados não são levados em conta, conforme a equação (3.4).

Dessa forma, como o sistema possui três equipamentos NA na sua topologia inicial, um deles deverá passar a operar de forma NF. Com isso, de acordo com a equação (3.5), existem 28 possibilidades de restauração.

Após testar todas as possibilidades, o algoritmo concluiu que a melhor restauração para o sistema é a apresentada na Figura 5.7.

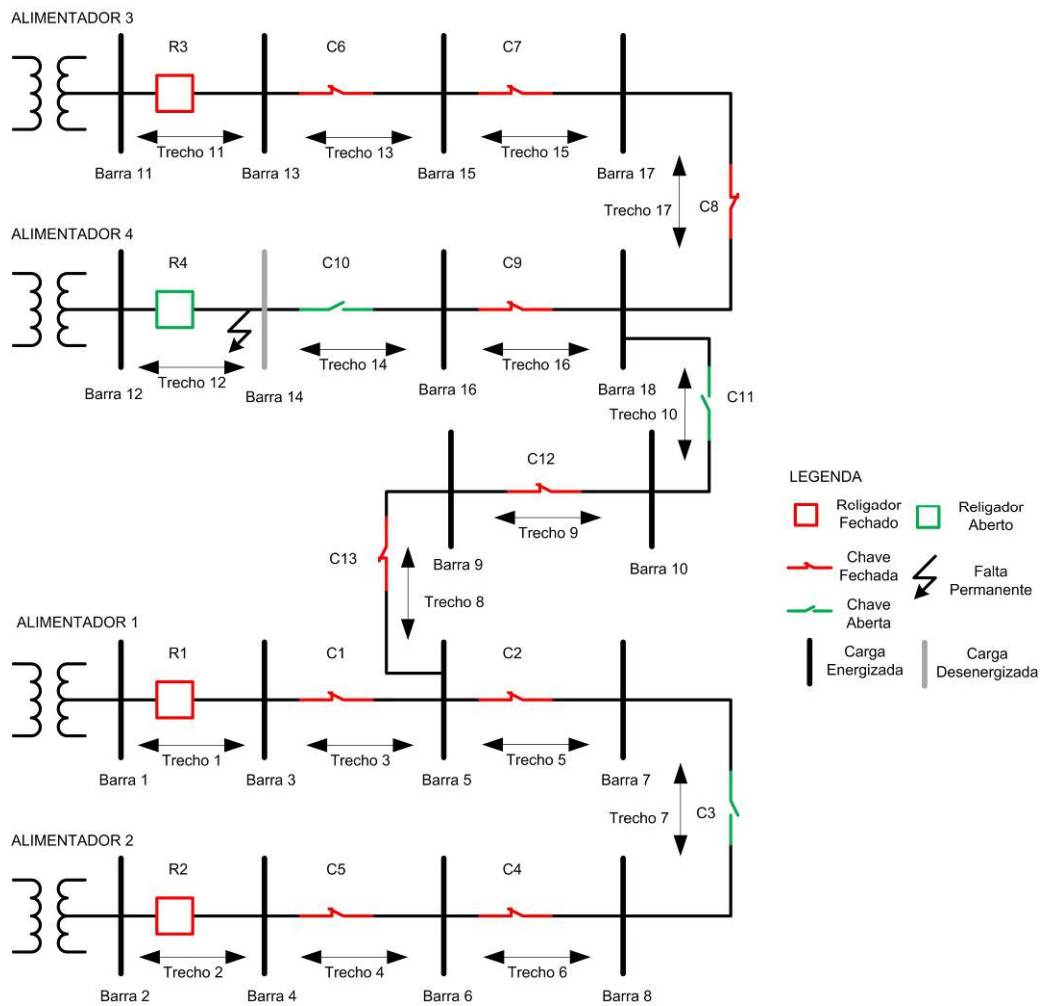


Figura 5.7 - Configuração do sistema 2 após a restauração para a simulação 1.

O algoritmo detectou que o alimentador 3 só possuía potência suficiente para energizar as barras 16 e 18, ficando a cargo do alimentador 1 prover energia à barra 10. Uma vez que o número máximo de barras possíveis de serem restauradas foi atingido, não foi necessária a execução da busca ampliada por alimentadores adjacentes, finalizando então a etapa de análise e partindo para a etapa de restauração do sistema.

Visto que o teste foi realizado de forma simulada, o algoritmo imprime na tela as ações que deverão ser realizadas para restaurar o sistema 2, bem como o tempo de processamento para resolução, conforme apresentado na Figura 5.8.

```

Command Window
Número de Barras do sistema: 18
Número de NFs inicial: 14
Número de NAs inicial: 3
Número de Linhas inicial: 0
-----
Número do trecho com problema: 12
-----
Número das barras desenergizadas: 10 14 16 18
Número das barras que não poderão ser reenergizadas: 14
Número de possibilidades: 28
-----
Para isolar a área afetada deve-se:
Abrir o trecho 14
-----
Para reconfigurar deve-se :
Fechar o trecho 9
Abrir o trecho 10
Fechar o trecho 17
-----
Máximo de barras que podem ser energizadas: 17
Barras energizadas pela solução: 17
Elapsed time is 0.200744 seconds.
fx >> |

```

**Figura 5.8 - Resultado da restauração do sistema 2 para a simulação 1.**

A mesma falta apresentada na simulação 1 para o sistema 2 foi exposta ao algoritmo baseado em AG. A resposta obtida foi idêntica à encontrada pelo método proposto, porém com um tempo bem superior, como mostra a Tabela 5.7.

**Tabela 5.7 - Resultados obtidos para a simulação 1 no sistema 2 com os dois métodos, após 100 execuções.**

MÉTODO	BARRAS ENERGIZADAS NA MELHOR SOLUÇÃO	MANOBRAS EXECUTADAS NA MELHOR SOLUÇÃO	BARRAS DESENERGIZADAS NA MELHOR SOLUÇÃO	PERCENTUAL DE OCORRÊNCIA DA MELHOR SOLUÇÃO	TEMPO MÉDIO DE EXECUÇÃO
Proposto	17	4	Nenhuma	100%	0,200 segundos
Baseado em AG	17	4	Nenhuma	100%	7,05 segundos

### 5.3.2 Simulação 2

Na simulação 2, uma falta foi realizada no trecho 2 do sistema. Em uma situação real, o religador presente nesse mesmo trecho, após realizar as tentativas de religamento, abriria e iria a bloqueio, interrompendo a alimentação das barras 4, 6 e 8, conforme Figura 5.9.

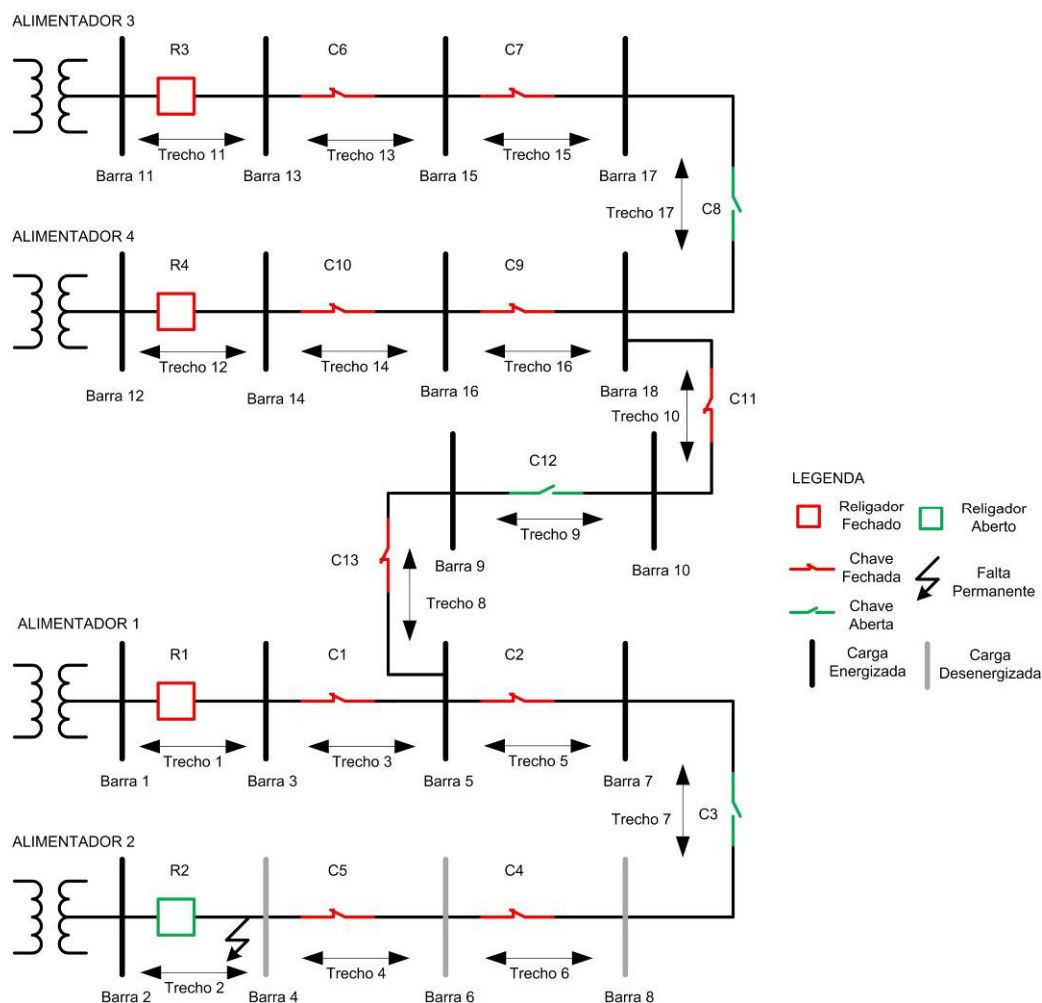


Figura 5.9 – Simulação 2 no sistema 2.

Além disso, para essa simulação, a barra 9 foi inserida como uma carga prioritária. Sendo assim, todas essas informações foram inseridas no algoritmo, promovendo a inicialização do processo de restauração do sistema.

O algoritmo realizou a estimação das cargas do sistema baseado nos mesmos valores da Tabela 5.4, medidos antes do curto. Dessa forma, as estimações de carga calculadas são as mesmas apresentadas anteriormente na Tabela 5.5.

Em seguida, o algoritmo inicia a identificação e isolamento da área afetada pelo curto. Foi identificado que o curto está presente no trecho 2, que a chave C5 deve ser aberta e bloqueada para participar do processo de análise para restauração, bem como o religador R2, que já se encontra aberto devido à atuação da proteção, deixando a barra 4 sem possibilidade de restauração.

Uma vez isolado o problema, a próxima etapa é a identificação dos alimentadores adjacentes à área afetada. Visto que esse sistema possui quatro alimentadores, podem existir até três alimentadores adjacentes à área afetada. Para o exemplo apresentado, somente o alimentador 1 foi identificado como imediatamente adjacente após a busca reduzida. Sendo assim, existem cinco trechos que atendem às restrições de seleção apresentadas no capítulo 3, conforme descrito na Tabela 5.8.

**Tabela 5.8 - Trechos selecionados na busca reduzida para a análise da restauração da simulação 2 no sistema 2.**

TRECHO	MOTIVO DA SELEÇÃO
3	Possui barra com 3 ou mais conexões (Barra 5)
5	Possui barra com 3 ou mais conexões (Barra 5)
7	Possui equipamento NA (C3)
8	Possui barra com 3 ou mais conexões (Barra 5)
9	Possui equipamento NA (C12)

Ao entrar na etapa de análise para restauração, o algoritmo calculou que o sistema deverá possuir dois equipamentos NA para restaurar o sistema, lembrando que os equipamentos abertos e bloqueados não são levados em conta, conforme a equação (3.4).

Dessa forma, como o sistema possui três equipamentos NA na sua topologia inicial, um deles deverá passar a operar de forma NF. Com isso, de acordo com a equação (3.5), existem cinco possibilidades de restauração.

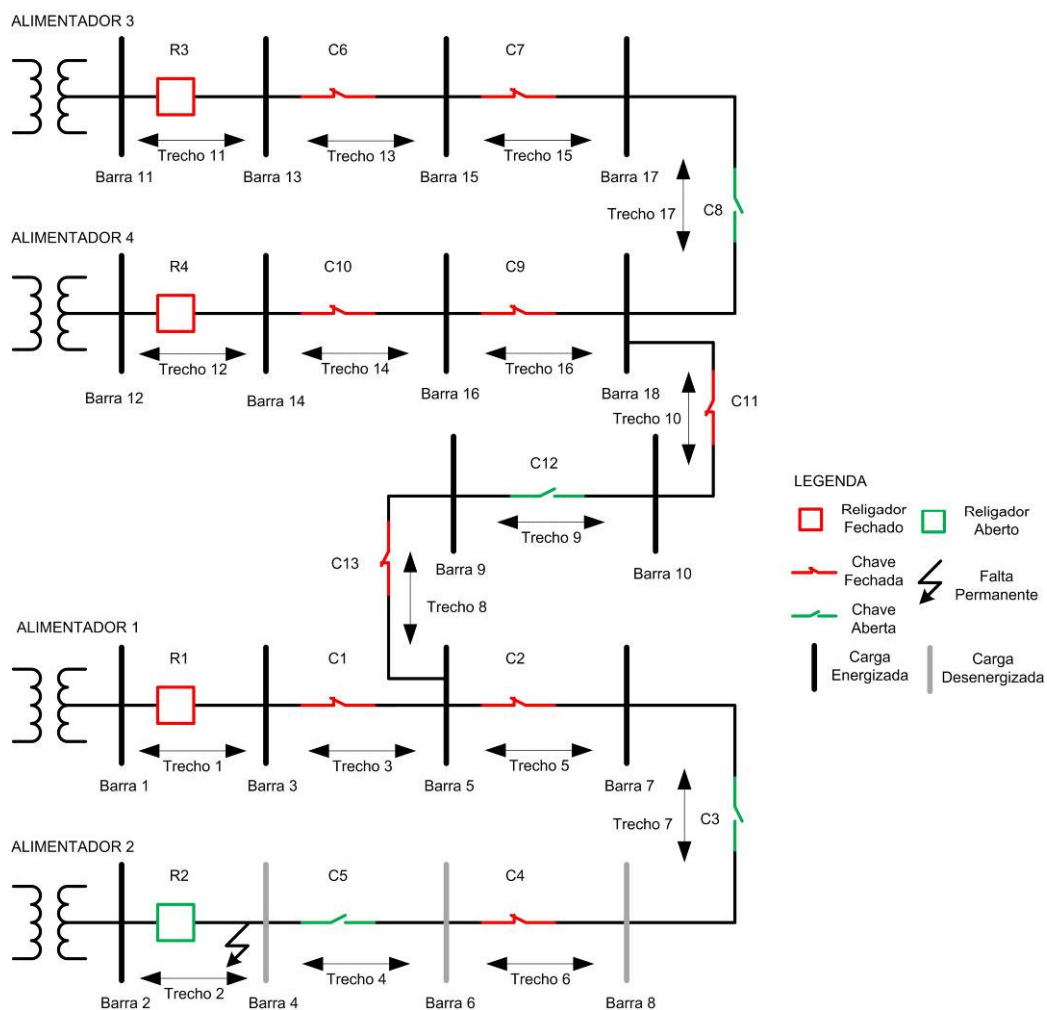
Após testar todas as possibilidades, o algoritmo não conseguiu obter uma solução capaz de restaurar todas as 17 barras possíveis de serem energizadas. Dessa forma uma busca ampliada foi iniciada, com o objetivo de verificar a possibilidade de atingir uma melhor solução.

Durante a busca ampliada, o número de trechos selecionados foi ampliado para 8, conforme apresentado na Tabela 5.9, elevando o número de possibilidades a serem testadas para 28.

**Tabela 5.9 - Trechos selecionados na busca ampliada para a análise da restauração da simulação 2 no sistema 2.**

TRECHO	MOTIVO DA SELEÇÃO
3	Possui barra com 3 ou mais conexões (Barra 5)
5	Possui barra com 3 ou mais conexões (Barra 5)
7	Possui equipamento NA (C3)
8	Possui barra com 3 ou mais conexões (Barra 5)
9	Possui equipamento NA (C12)
10	Possui barra com 3 ou mais conexões (Barra 18)
16	Possui barra com 3 ou mais conexões (Barra 18)
17	Possui equipamento NA (C8)

Após testar todas as possibilidades da busca ampliada, o algoritmo atingiu como melhor solução a restauração de 15 barras, deixando as barras 6 e 8, além da barra 4 que foi isolada devido ao defeito, sem alimentação, conforme apresentado na Figura 5.10.



**Figura 5.10 - Configuração do sistema 2 após a restauração para a simulação 2.**

É importante ressaltar que o alimentador 1 possuiria capacidade suficiente para alimentar as barras 6 e 8, caso a barra 9 fosse desconectada, o que elevaria o número de barras energizadas para 16. Porém, devido à priorização da carga 9, o algoritmo manteve essa carga energizada em detrimento das barras 6 e 8, visto que nenhum outro alimentador possuía capacidade suficiente para suprir a barra 9.

Visto que o teste foi realizado de forma simulada, o algoritmo imprime na tela as ações que deverão ser tomadas para restaurar a falta da simulação 2 do sistema 2, bem como o tempo de processamento para solucionar a restauração do sistema, conforme Figura 5.11.

```

Command Window
Número de Barras do sistema: 18
Número de NFs inicial: 14
Número de NAs inicial: 3
Número de Linhas inicial: 0
-----
Número do trecho com problema: 2
-----
Número das barras desenergizadas: 4 6 8
Número das barras que não poderão ser reenergizadas: 4
Número de possibilidades: 5
Número de possibilidades: 28
-----
Para isolar a área afetada deve-se:
Abrir o trecho 4
-----
Para reconfigurar deve-se :
-----
Máximo de barras que podem ser energizadas: 17
Barras energizadas pela solução: 15
Elapsed time is 0.205050 seconds.
fx >> |

```

**Figura 5.11 - Resultado da restauração do sistema 2 para a simulação 2.**

A mesma falta apresentada na simulação 2 para o sistema 2 foi exposta ao algoritmo baseado em AG. A resposta obtida foi idêntica à encontrada pelo método proposto, porém com um tempo bem superior, como mostra a Tabela 5.10.

**Tabela 5.10 - Resultados obtidos para a simulação 2 no sistema 2 com os dois métodos, após 100 execuções.**

MÉTODO	BARRAS ENERGIZADAS NA MELHOR SOLUÇÃO	MANOBRAS EXECUTADAS NA MELHOR SOLUÇÃO	BARRAS DESENERGIZADAS NA MELHOR SOLUÇÃO	PERCENTUAL DE OCORRÊNCIA DA MELHOR SOLUÇÃO	TEMPO MÉDIO DE EXECUÇÃO
Proposto	15	1	Barras 6 e 8	100%	0,208 segundos
Baseado em AG	15	1	Barras 6 e 8	100%	7,04 segundos

## 5.4 Sistema 3

O sistema 3 é baseado em um sistema real de uma concessionária de energia brasileira e possui 155 seções, 51 alimentadores e 203 trechos, sendo que em 200 trechos existem equipamentos telecontrolados instalados, onde 139 são equipamentos NF e 61 são equipamentos NA, conforme apresentado na Figura 5.12. Cada seção pode conter diversas barras, porém, por não possuírem equipamentos telecontrolados em suas ligações, elas foram representadas como uma única barra. Sendo assim, o termo “barra” será adotado para cada seção do sistema apresentado.

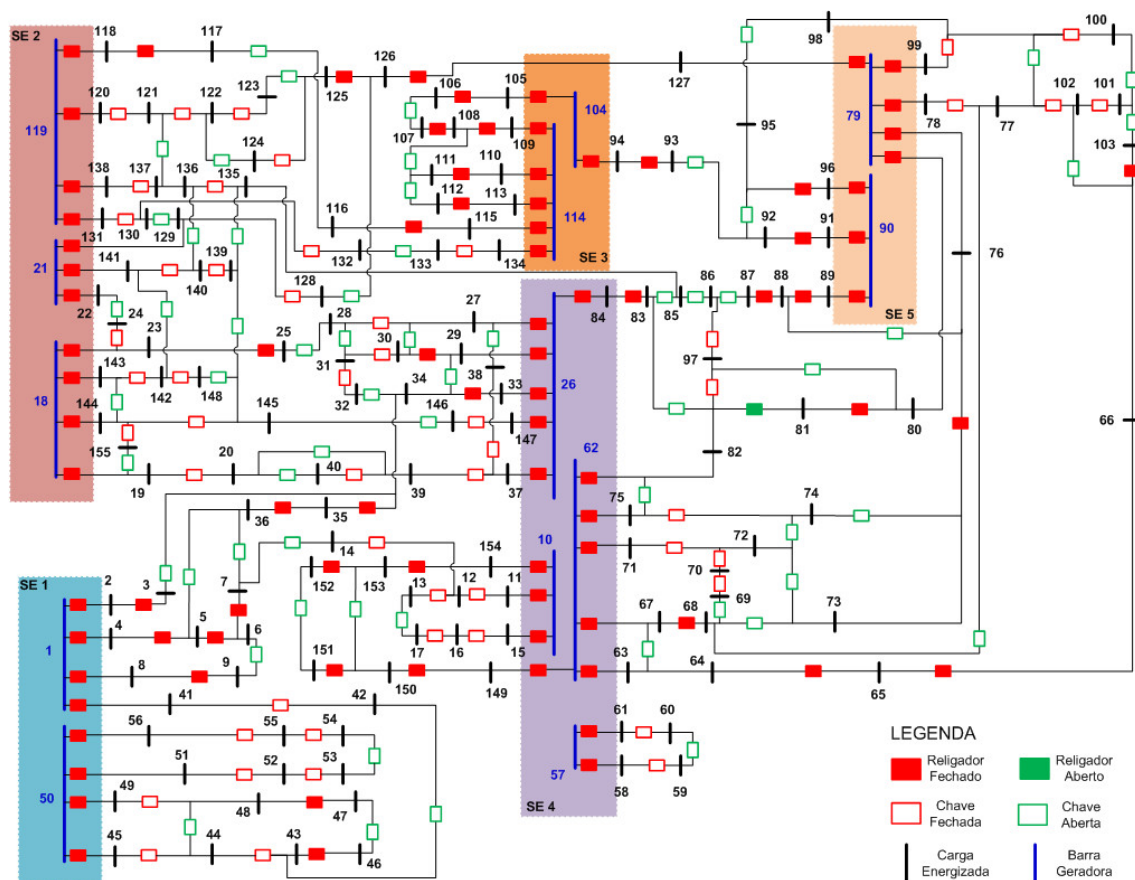


Figura 5.12 - Sistema 3.

Foram realizadas três simulações nesse sistema, com faltas em diferentes pontos, que serão apresentadas a seguir.



### 5.4.1 Simulação 1

Na simulação 1, uma falta foi realizada no trecho 15, compreendido entre as barras 10 e 11. Em uma situação real, o religador presente nesse mesmo trecho, após realizar as tentativas de religamento, abriria e iria a bloqueio, interrompendo a alimentação das barras 11, 12, 13 e 14, conforme Figura 5.13.

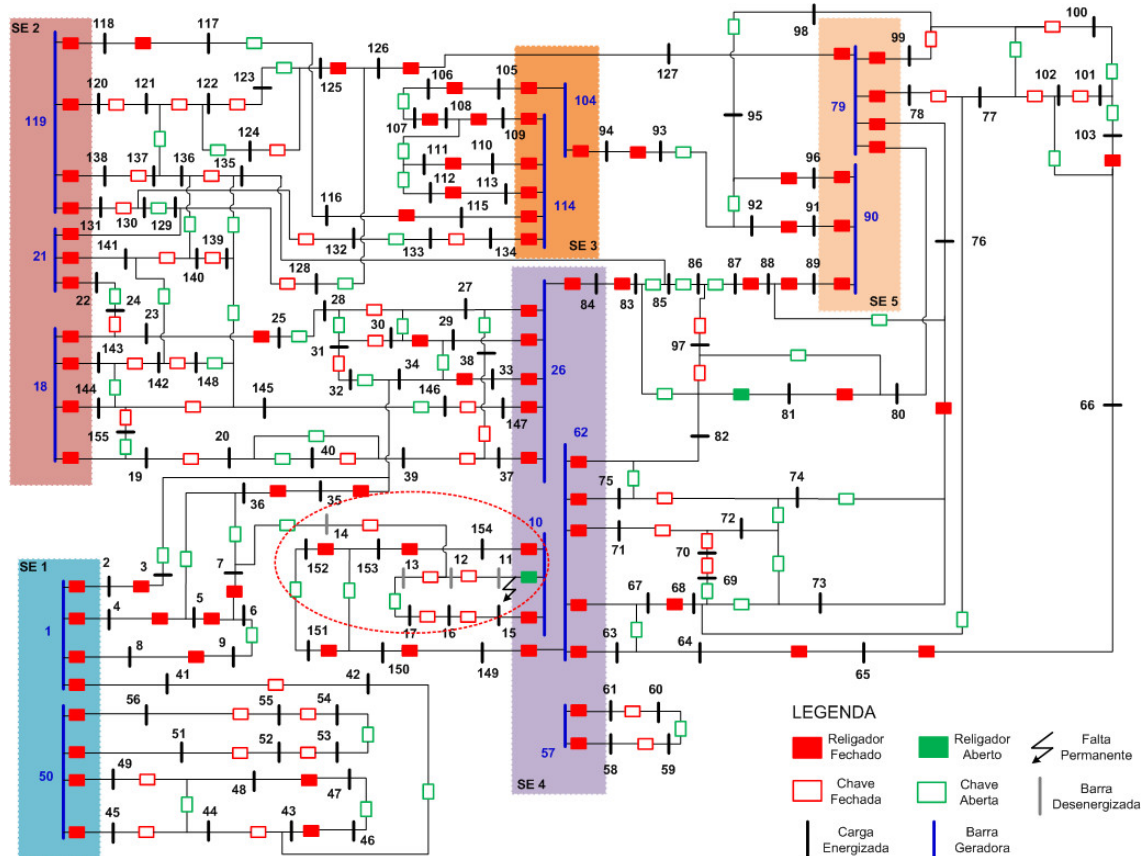


Figura 5.13 – Simulação 1 no sistema 3.

Dessa forma, essas informações foram inseridas no algoritmo, promovendo a inicialização do processo de restauração do sistema. O algoritmo realiza assim a estimação das cargas do sistema, baseado nos valores de medição inseridos previamente.

Em seguida o algoritmo inicia a identificação e isolamento da área afetada pelo curto. Foi identificado que o curto está presente no trecho 15, que a chave existente no trecho 18, compreendido entre as barras 11 e 12, deve ser aberta e bloqueada para participar do processo de análise para restauração, bem como o religador de proteção do

alimentador, que já se encontra aberto devido à atuação da proteção, deixando dessa forma a barra 11 sem possibilidade de restauração.

Uma vez isolado o problema, a próxima etapa é a identificação dos alimentadores adjacentes à área afetada. Para o exemplo apresentado, foram identificados dois alimentadores imediatamente adjacentes, após a busca reduzida: o alimentador 5, compreendido entre as barras 10 e 15, e o alimentador 2, compreendido entre as barras 1 e 4. Nesses alimentadores, existem dez trechos que atendem às restrições de seleção descritas no capítulo 3, conforme apresentado na Tabela 5.11.

**Tabela 5.11 - Trechos selecionados na busca reduzida para a análise da restauração da simulação 1 no sistema 3.**

TRECHO	BARRA DE	BARRA PARA	MOTIVO DA SELEÇÃO
7	4	5	Possui barra com 3 ou mais conexões (Barra 5)
8	5	6	Possui barra com 3 ou mais conexões (Barras 5 e 6)
9	5	36	Possui equipamento NA
10	6	7	Possui barra com 3 ou mais conexões (Barras 6 e 7)
11	6	9	Possui equipamento NA
12	7	14	Possui equipamento NA
13	7	36	Possui equipamento NA
19	12	13	Possui barra com 3 ou mais conexões (Barra 12)
20	12	14	Possui barra com 3 ou mais conexões (Barra 12)
21	13	17	Possui equipamento NA

Dentre esses trechos selecionados, existem 5 equipamentos NA, porém um deles deverá ser fechado para manter o sistema radial e conexo, de acordo com a equação (3.4). Dessa forma, o número de possibilidades que devem ser testadas pelo algoritmo após a busca reduzida é de 210, conforme equação (3.5).

Após testar todas as 210 possibilidades, o algoritmo não atingiu como melhor resposta a restauração das 154 barras possíveis de serem energizadas. Dessa forma uma busca ampliada foi iniciada, com o objetivo de verificar a possibilidade de atingir uma melhor solução.

Durante a busca ampliada, o número de trechos selecionados foi ampliado para 16, conforme apresentado na Tabela 5.12, elevando o número de possibilidades a serem testadas para 11440.

**Tabela 5.12 - Trechos selecionados na busca ampliada para a análise da restauração da simulação 1 no sistema 3.**

TRECHO	BARRA DE	BARRA PARA	MOTIVO DA SELEÇÃO
6	3	34	Possui equipamento NA
7	4	5	Possui barra com 3 ou mais conexões (Barra 5)
8	5	6	Possui barra com 3 ou mais conexões (Barras 5 e 6)
9	5	36	Possui equipamento NA
10	6	7	Possui barra com 3 ou mais conexões (Barras 6 e 7)
11	6	9	Possui equipamento NA
12	7	14	Possui equipamento NA
13	7	36	Possui equipamento NA
19	12	13	Possui barra com 3 ou mais conexões (Barra 12)
20	12	14	Possui barra com 3 ou mais conexões (Barra 12)
21	13	17	Possui equipamento NA
49	29	34	Possui equipamento NA
52	32	34	Possui equipamento NA
53	33	34	Possui barra com 3 ou mais conexões (Barra 34)
54	34	35	Possui barra com 3 ou mais conexões (Barra 34)
55	35	36	Possui barra com 3 ou mais conexões (Barra 36)

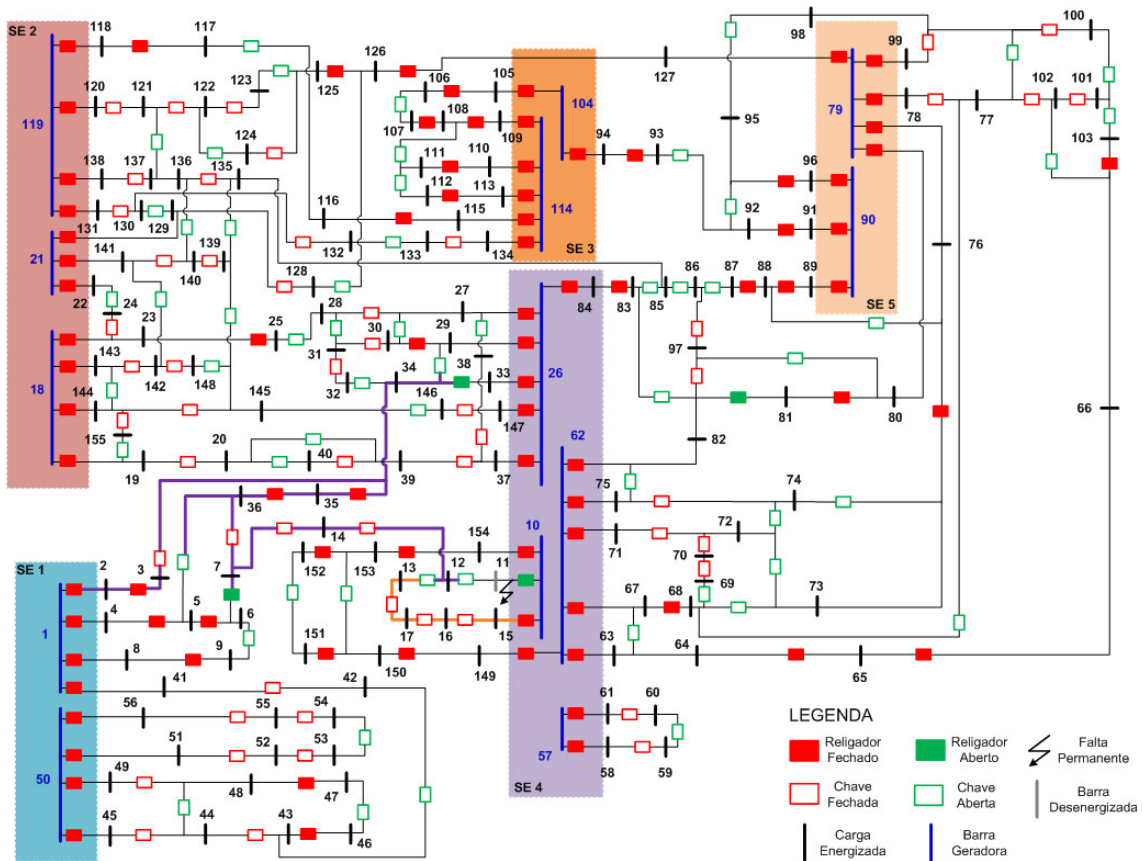
Uma vez testadas todas as possibilidades da busca ampliada, o algoritmo atingiu como melhor solução a restauração de 154 barras, deixando somente a barra 11 sem alimentação, finalizando assim a etapa de análise e passando para a etapa de restauração do sistema.

Visto que o teste foi realizado de forma simulada, o algoritmo imprime na tela as ações que deverão ser tomadas para restaurar a falta da simulação 1 do sistema 3, bem como o tempo de processamento para solucionar a restauração do sistema, conforme Figura 5.14.

```
Command Window
Número de Barras do sistema: 155
Número de NFs inicial: 139
Número de NAs inicial: 61
Número de Linhas inicial: 3
-----
Número do trecho com problema: 15
-----
Número das barras desenergizadas: 11 12 13 14
Número das barras que não poderão ser reenergizadas: 11
Número de possibilidades: 210
Número de possibilidades: 11440
-----
Para isolar a área afetada deve-se:
Abrir o trecho 18
-----
Para reconfigurar deve-se :
Fechar o trecho 6
Abrir o trecho 10
Fechar o trecho 12
Fechar o trecho 13
Abrir o trecho 19
Fechar o trecho 21
Abrir o trecho 53
-----
Máximo de barras que podem ser energizadas: 154
Barras energizadas pela solução: 154
Elapsed time is 13.029106 seconds.
fx >> |
```

**Figura 5.14 - Resultado da restauração do método proposto para a simulação 1 do sistema 3.**

A configuração final do sistema 3, após a restauração encontrada pelo método proposto para a falta da simulação 1, é apresentada na Figura 5.15.



**Figura 5.15 - Configuração do sistema 3 após restauração do método proposto para falta da simulação 1.**

A simulação 1 do sistema 3 também foi realizada no algoritmo baseado em AG. O algoritmo atingiu como melhor solução a restauração de 153 barras, conforme apresentado na Figura 5.16.

```
Command Window
Número de Barras do sistema: 155
Número de NFs inicial: 139
Número de NAs inicial: 61
Número de Linhas inicial: 3
-----
Número do trecho com problema: 15
-----
Número das barras desenergizadas: 11 12 13 14
Número das barras que não poderão ser reenergizadas: 11
Optimization terminated: maximum number of generations exceeded.
-----
Para isolar a área afetada deve-se:
Abrir o trecho 18
-----
Para reconfigurar deve-se :
Fechar o trecho 12
Abrir o trecho 19
Abrir o trecho 20
Fechar o trecho 21
-----
Máximo de barras que podem ser energizadas: 154
Barras energizadas pela solução: 153
Elapsed time is 97.763487 seconds.
fx >> |
```

**Figura 5.16 - Resultado da restauração do método baseado em AG para a falta da simulação 1 do sistema 3.**

A configuração final do sistema 3 após a restauração encontrada pelo método baseado em AG para a falta da simulação 1 é apresentada na Figura 5.17.

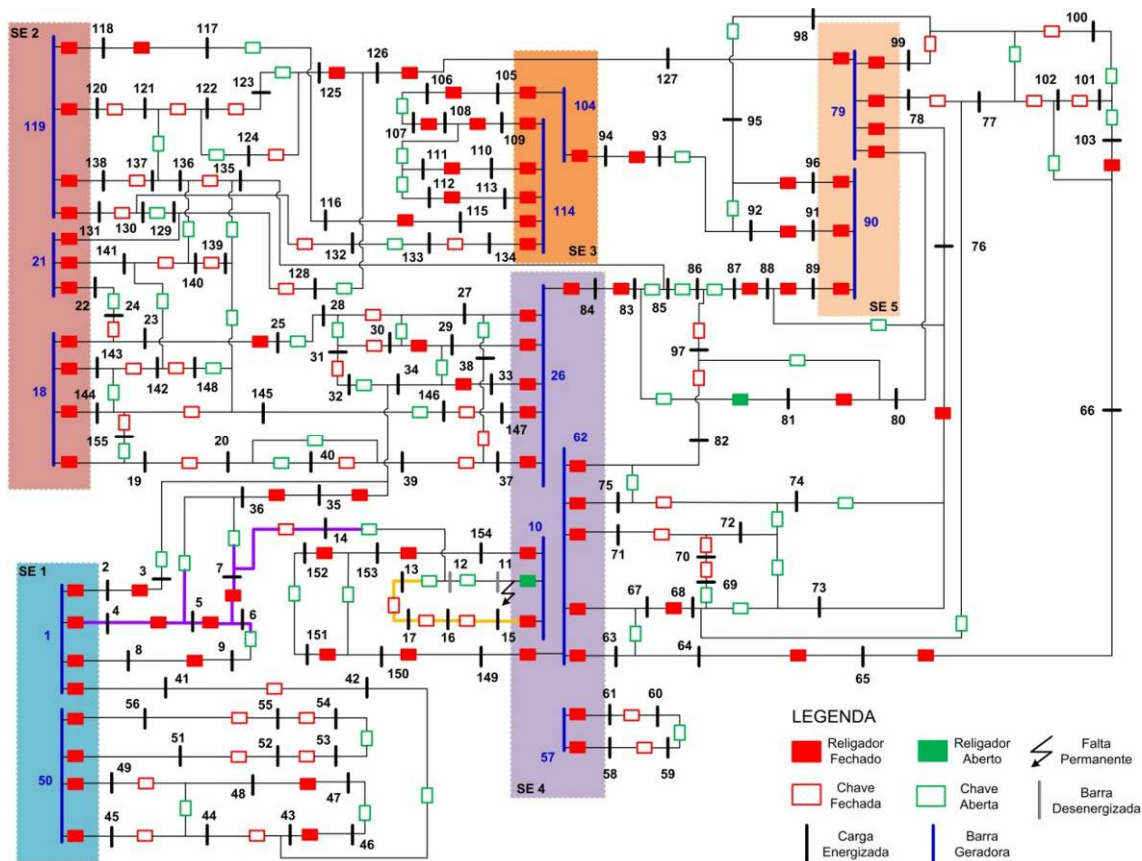


Figura 5.17 - Configuração do sistema 3 após restauração do método baseado em AG para falta da simulação 1 do sistema 3.

A Tabela 5.13 apresenta a comparação dos resultados obtidos, após 100 execuções, entre os dois métodos utilizados para restaurar o sistema 3 frente à falta da simulação 1.

Tabela 5.13 - Resultados obtidos com os métodos para a falta da simulação 1 do sistema 3, após 100 execuções.

MÉTODO	BARRAS ENERGIZADAS NA MELHOR SOLUÇÃO	MANOBRAS EXECUTADAS NA MELHOR SOLUÇÃO	BARRAS DESENERGIZADAS NA MELHOR SOLUÇÃO	PERCENTUAL DE OCORRÊNCIA DA MELHOR SOLUÇÃO	TEMPO MÉDIO DE EXECUÇÃO
Proposto	154	8	Nenhuma	100%	12,80 segundos
Baseado em AG	153	5	Barra 12	25%	96,23 segundos

## 5.4.2 Simulação 2

A simulação 2 foi composta por duas faltas simultâneas, sendo uma localizada no trecho 15, compreendido entre as barras 10 e 11, e a outra no trecho 117, compreendido



entre as barras 82 e 97. Em uma situação real, o religador presente no trecho 15 e o religador presente no trecho 86, compreendido entre as barras 62 e 82, após realizarem as tentativas de religamento, abririam e iriam a bloqueio, interrompendo a alimentação das barras 11, 12, 13, 14, 82, 86 e 97, conforme Figura 5.18.

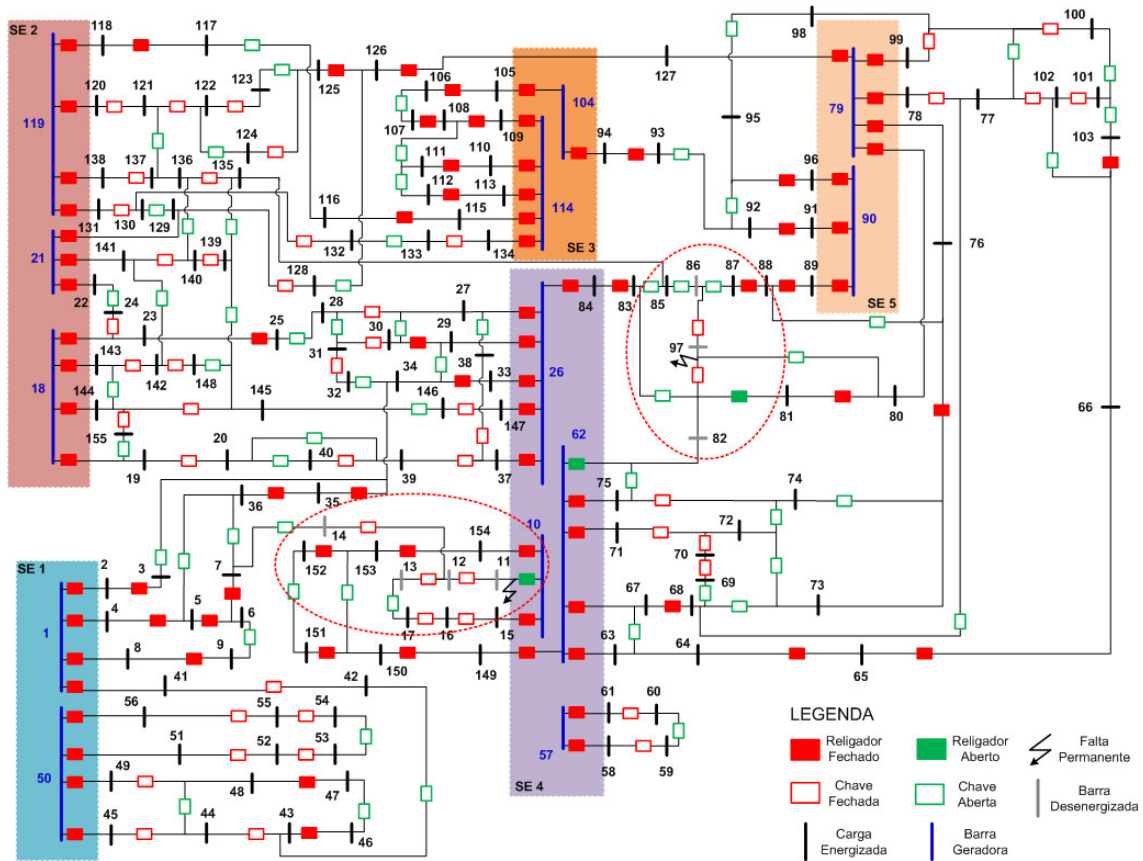


Figura 5.18 - Falhas da simulação 2 do sistema 3.

Dessa forma, essas informações foram inseridas no algoritmo, promovendo a inicialização do processo de restauração do sistema. O algoritmo realiza assim a estimação das cargas do sistema, baseado nos valores de medição inseridos previamente.

Em seguida, o algoritmo inicia a identificação e isolamento da área afetada pelo curto. Por se tratarem de duas faltas simultâneas, o algoritmo detectou a existência de múltiplas faltas no sistema, sendo uma no trecho 15, nomeada de falta 1, e a outra no trecho 117, nomeada de falta 2. Para isolar a falta 1, o algoritmo ordenou a abertura da chave existente no trecho 18, compreendido entre as barras 11 e 12, bloqueando a mesma para participar do processo de análise para restauração, e realizou também o bloqueio do religador de proteção do alimentador, que já se encontra aberto devido à



atuação da proteção, deixando dessa forma a barra 11 sem possibilidade de restauração. Já para isolar a falta 2, foi identificada que a chave existente no trecho 117, bem como a chave alocada no trecho 135, compreendido entre as barras 97 e 86, devem ser abertas e bloqueadas para participar do processo de análise para restauração, deixando a barra 97 sem possibilidade de restauração.

Uma vez isolado o problema, a próxima etapa é a identificação dos alimentadores adjacentes às áreas afetadas. No caso de faltas múltiplas, o algoritmo realiza a análise em partes, tratando uma falta por vez. Primeiro ele propõe as ações necessárias para restauração da primeira falta. Em seguida, em cima da rede restaurada em memória para essa falta, a segunda falta é considerada e analisada. Esse processo se repete até que todas as faltas tenham sido restauradas. Por fim, o algoritmo realiza todas as ações necessárias para isolar e restaurar o sistema como um todo.

Para o exemplo apresentado, durante a análise da falta 1, todo o processo de análise para restauração é idêntico ao apresentado na seção anterior, referente à falta “a”.

Uma vez restaurado o sistema para a falta 1, o algoritmo inicia o processo de análise para a falta 2. Foram identificados dois alimentadores imediatamente adjacentes, após a busca reduzida: o alimentador 38, compreendido entre as barras 90 e 89, e o alimentador 51, compreendido entre as barras 119 e 138. Nesses alimentadores, existem oito trechos que atendem às restrições de seleção descritas no capítulo 3, conforme apresentado na Tabela 5.14.

**Tabela 5.14 - Trechos selecionados na busca reduzida para a análise da segunda falta da simulação 2 do sistema 3.**

TRECHO	BARRA DE	BARRA PARA	MOTIVO DA SELEÇÃO
106	76	88	Possui equipamento NA
121	85	86	Possui equipamento NA
122	86	87	Possui equipamento NA
123	88	87	Possui uma barra com 3 ou mais conexões (Barra 88)
124	89	88	Possui uma barra com 3 ou mais conexões (Barra 88)
165	121	137	Possui equipamento NA
181	136	135	Possui uma barra com 3 ou mais conexões (Barras 135 e 136)
184	138	137	Possui uma barra com 3 ou mais conexões (Barra 137)

Dentre esses trechos selecionados, existem 4 equipamentos NA, porém um deles deverá ser fechado para manter o sistema radial e conexo, de acordo com a equação (3.4). Dessa forma, o número de possibilidades que devem ser testadas pelo algoritmo após a busca reduzida é de 56, conforme equação (3.5).

Após testar todas as 56 possibilidades, o algoritmo obteve como melhor resposta a restauração de 153 barras, ficando somente as barras 11 e 97 sem energia. Como esse total é o máximo de barras que podem ser energizadas, a busca ampliada não é necessária para a falta 2 e o algoritmo finaliza assim a etapa de análise e parte para a etapa de restauração.

Visto que o teste foi realizado de forma simulada, o algoritmo imprime na tela as ações que deverão ser tomadas para restaurar as faltas da simulação 2 do sistema 3, bem como o tempo de processamento para solucionar a restauração do sistema, conforme Figura 5.19.

```
Command Window
Número de Barras do sistema: 155
Número de NFs inicial: 139
Número de NAs inicial: 61
Número de Linhas inicial: 3
-----
Múltiplas faltas detectadas!
-----
Número do trecho com problema para falta 1: 15
-----
Número do trecho com problema para falta 2: 117
-----
Número das barras desenergizadas: 11 12 13 14 82 86 97
Número das barras que não poderão ser reenergizadas: 11 97
-----
Análise para falta 1:
Número de possibilidades: 210
Número de possibilidades: 11440
-----
Análise para falta 2:
Número de possibilidades: 56
-----
Para isolar a área afetada deve-se:
Abrir o trecho 18
Abrir o trecho 117
Abrir o trecho 135
-----
Para reconfigurar deve-se :
Fechar o trecho 6
Abrir o trecho 10
Fechar o trecho 12
Fechar o trecho 13
Abrir o trecho 19
Fechar o trecho 21
Abrir o trecho 53
Fechar o trecho 122
Fechar o trecho (proteção) 86
-----
Máximo de barras que podem ser energizadas: 153
Barras energizadas pela solução: 153
Elapsed time is 12.671259 seconds.
fx >> |
```

**Figura 5.19 - Resultado da restauração do método proposto para as faltas da simulação 2 do sistema 3.**

A configuração final do sistema 3, após a restauração encontrada para as faltas da simulação 2, é apresentada na Figura 5.20.

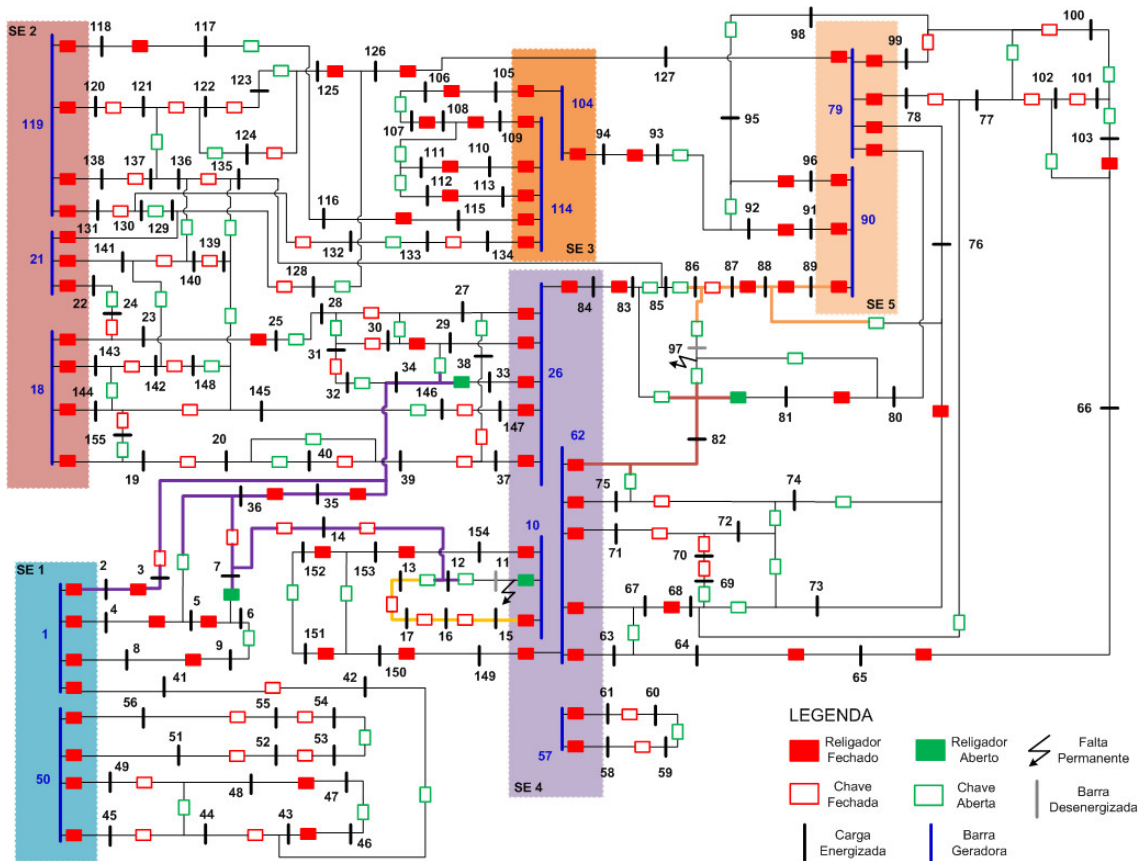


Figura 5.20 - Configuração do sistema 3 após restauração do método proposto para as faltas da simulação 2 do sistema 3.

A simulação 2 do sistema 3 foi exposta ao algoritmo baseado em AG. O algoritmo atingiu como melhor solução a restauração de 152 barras, conforme apresentado na Figura 5.21.

```
Command Window
Número de Barras do sistema: 155
Número de NFs inicial: 139
Número de NAs inicial: 61
Número de Linhas inicial: 3
-----
Múltiplas faltas detectadas!
-----
Número do trecho com problema para falta 1: 15
-----
Número do trecho com problema para falta 2: 117
-----
Número das barras desenergizadas: 11 12 13 14 82 86 97
Número das barras que não poderão ser reenergizadas: 11 97
Optimization terminated: maximum number of generations exceeded.
-----
Para isolar a área afetada deve-se:
Abrir o trecho 18
Abrir o trecho 117
Abrir o trecho 135
-----
Para reconfigurar deve-se :
Fechar o trecho 12
Abrir o trecho 19
Abrir o trecho 20
Fechar o trecho 21
Fechar o trecho 122
Fechar o trecho (proteção) 86
-----
Máximo de barras que podem ser energizadas: 153
Barras energizadas pela solução: 152
Elapsed time is 95.301466 seconds.
fx >> |
```

**Figura 5.21 - Resultado da restauração do método baseado em AG para as faltas da simulação 2 do sistema 3.**

A configuração final do sistema 3 após a restauração encontrada pelo método baseado em AG para as faltas da simulação 2 é apresentada na Figura 5.22.

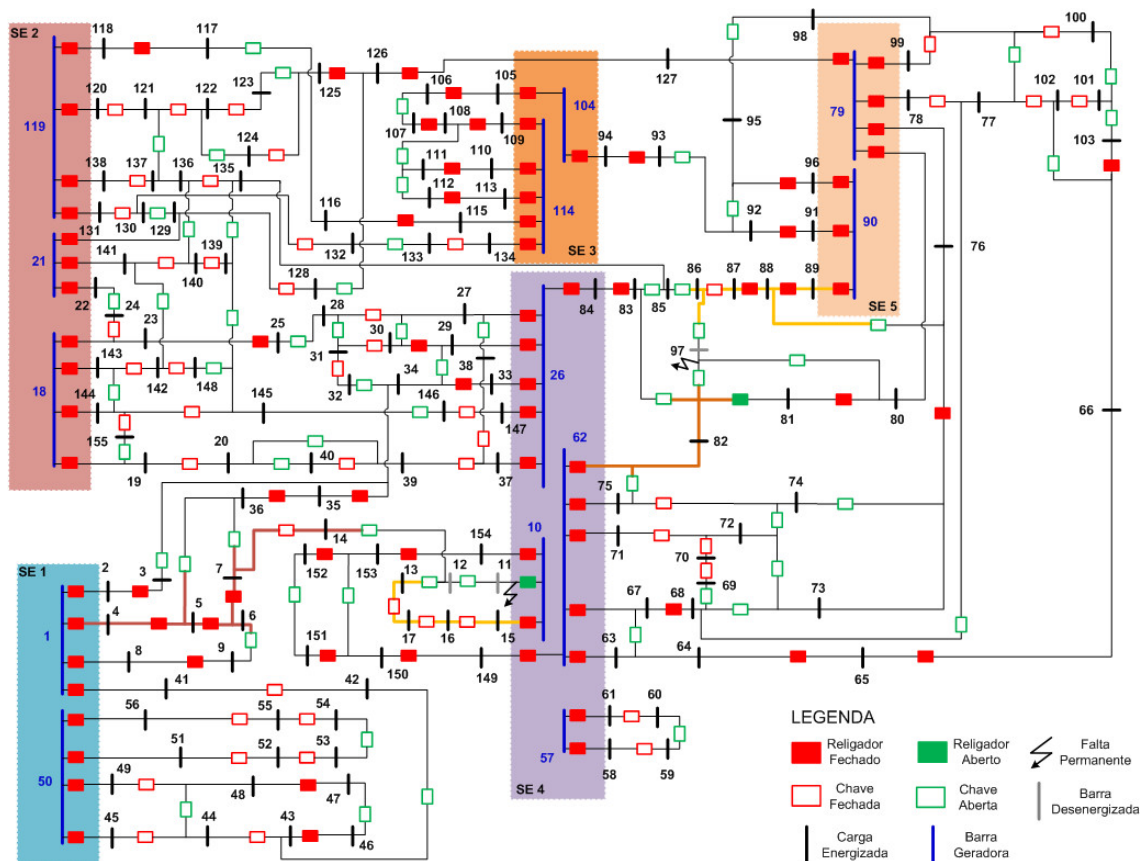


Figura 5.22 - Configuração do sistema 3 após restauração do método baseado em AG para as faltas da simulação 2 do sistema 3.

A Tabela 5.15 apresenta a comparação dos resultados obtidos, após 100 execuções, entre os dois métodos utilizados para restaurar o sistema 3 frente às faltas da simulação 2.

Tabela 5.15 - Resultados obtidos com os métodos para as faltas da simulação 2 do sistema 3, após 100 execuções.

MÉTODO	BARRAS ENERGIZADAS NA MELHOR SOLUÇÃO	MANOBRAS EXECUTADAS NA MELHOR SOLUÇÃO	BARRAS DESENERGIZADAS NA MELHOR SOLUÇÃO	PERCENTUAL DE OCORRÊNCIA DA MELHOR SOLUÇÃO	TEMPO MÉDIO DE EXECUÇÃO
Proposto	153	12	Nenhuma	100%	12,77 segundos
Baseado em AG	152	9	Barra 12	13%	96,34 segundos

### 5.4.3 Simulação 3

Para a simulação 3, uma falta foi realizada no trecho 183, compreendido entre as barras 136 e 137. Em uma situação real, o religador presente no trecho 161,

compreendido entre as barras 119 e 138, após realizar as tentativas de religamento, abriria e iria a bloqueio, interrompendo a alimentação das barras 85, 135, 136, 137 e 138, conforme Figura 5.23.

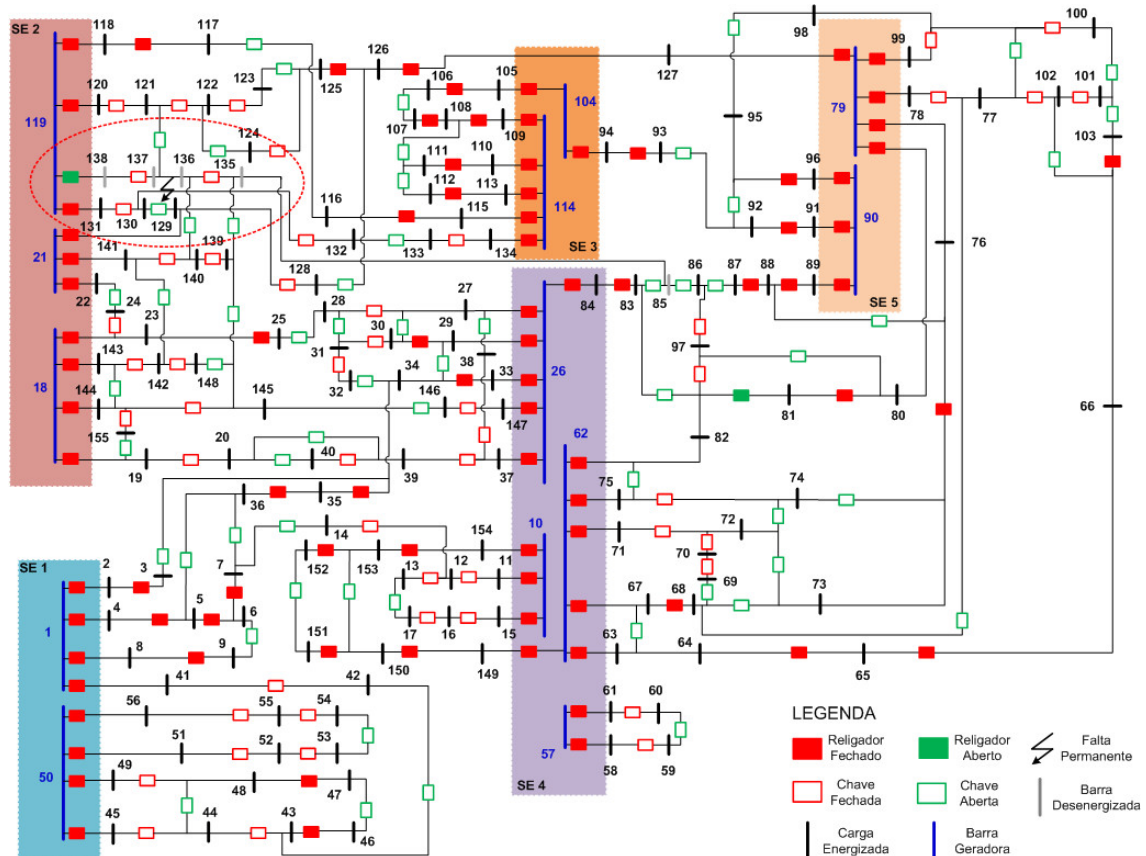


Figura 5.23 - Falta da simulação 3 do sistema 3.

Dessa forma, essas informações foram inseridas no algoritmo, promovendo a inicialização do processo de restauração do sistema. O algoritmo realiza assim a estimação das cargas do sistema, baseado nos valores de medição inseridos previamente.

Em seguida o algoritmo inicia a identificação e isolamento da área afetada pelo curto. Foi identificado que o curto está presente nos trechos 183 e 184, visto que não existe nenhum equipamento instalado no trecho 183 onde a falta foi simulada. Além disso, para isolar a área com problema, o algoritmo identificou a necessidade de abrir e bloquear a chave instalada no trecho 181, compreendido entre as barras 135 e 136, bem como a chave presente no trecho 184, compreendido entre as barras 137 e 138, deixando as barras 136 e 137 sem possibilidade de restauração.

Uma vez isolado o problema, a próxima etapa é a identificação dos alimentadores adjacentes à área afetada. Para o exemplo apresentado, foram identificados três alimentadores imediatamente adjacentes, após a busca reduzida: o alimentador 18, compreendido entre as barras 21 e 141, o alimentador 30, compreendido entre as barras 62 e 82, e o alimentador 32, compreendido entre as barras 26 e 84. Nesses alimentadores, existem dez trechos que atendem às restrições de seleção descritas no capítulo 3, conforme apresentado na Tabela 5.16.

**Tabela 5.16 - Trechos selecionados na busca reduzida para a análise da restauração da falta da simulação 3 do sistema 3.**

TRECHO	BARRA DE	BARRA PARA	MOTIVO DA SELEÇÃO
104	75	82	Possui equipamento NA
117	82	97	Possui uma barra com 3 ou mais conexões (Barra 97)
118	82	83	Possui equipamento NA
119	83	85	Possui equipamento NA
120	84	83	Possui uma barra com 3 ou mais conexões (Barra 83)
121	85	86	Possui equipamento NA
135	97	86	Possui uma barra com 3 ou mais conexões (Barras 86 e 97)
180	135	139	Possui equipamento NA
186	140	139	Possui uma barra com 3 ou mais conexões (Barras 139 e 140)
187	141	140	Possui uma barra com 3 ou mais conexões (Barras 140 e 141)

Dentre esses trechos selecionados, existem 5 equipamentos NA, porém um deles deverá ser fechado para manter o sistema radial e conexo, de acordo com a equação (3.4). Dessa forma, o número de possibilidades que devem ser testadas pelo algoritmo após a busca reduzida é de 210, conforme equação (3.5).

Após testar todas as 210 possibilidades, o algoritmo obteve como melhor resposta, a restauração de 153 barras. Como esse é o maior número de cargas possíveis de serem restauradas, uma vez que as barras 136 e 137 estão isoladas, a etapa de análise é finalizada e o algoritmo passa para a etapa de restauração do sistema.

Visto que o teste foi realizado de forma simulada, o algoritmo imprime na tela as ações que deverão ser tomadas para restaurar a falta da simulação 3 do sistema 3, bem

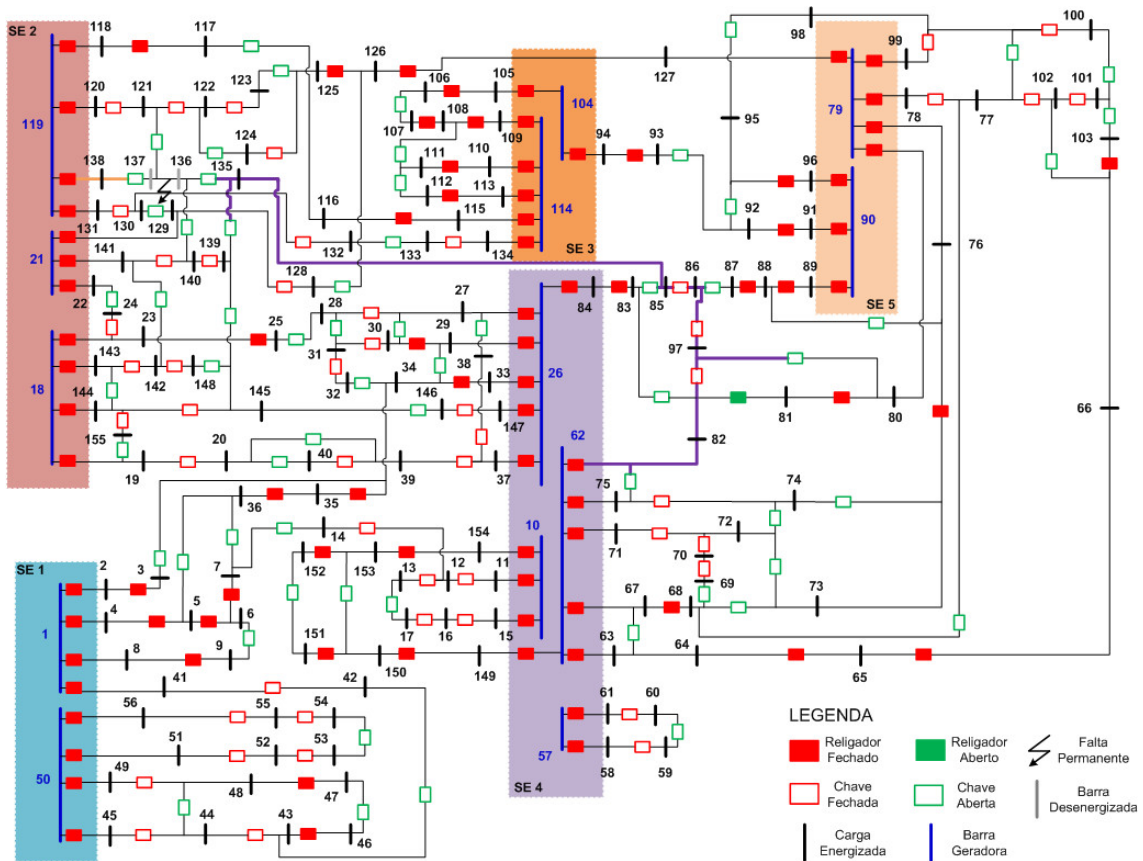


como o tempo de processamento para solucionar a restauração do sistema, conforme Figura 5.24.

```
Command Window
Número de Barras do sistema: 155
Número de NFs inicial: 139
Número de NAs inicial: 61
Número de Linhas inicial: 3
-----
Número dos trechos com problema: 183 184
-----
Número das barras desenergizadas: 85 135 136 137 138
Número das barras que não poderão ser reenergizadas: 136 137
Número de possibilidades: 210
-----
Para isolar a área afetada deve-se:
Abrir o trecho 181
Abrir o trecho 184
-----
Para reconfigurar deve-se :
Fechar o trecho 121
Fechar o trecho (proteção) 161
-----
Máximo de barras que podem ser energizadas: 153
Barras energizadas pela solução: 153
Elapsed time is 0.347460 seconds.
fx >> |
```

**Figura 5.24 - Resultado da restauração do método proposto para a falta da simulação 3 do sistema 3.**

A configuração final do sistema 3, após a restauração encontrada para a falta da simulação 3, é apresentada na Figura 5.25.



**Figura 5.25 - Configuração do sistema 3 após restauração do método proposto para falta da simulação 3.**

A simulação 3 apresentada para o sistema 3 foi exposta ao algoritmo baseado em AG. O algoritmo atingiu como melhor solução a mesma configuração obtida pelo método proposto, conforme apresentado na Figura 5.26.

```

Command Window
Número de Barras do sistema: 155
Número de NFs inicial: 139
Número de NAs inicial: 61
Número de Linhas inicial: 3
-----
Número dos trechos com problema: 183 184
-----
Número das barras desenergizadas: 85 135 136 137 138
Número das barras que não poderão ser reenergizadas: 136 137
Optimization terminated: maximum number of generations exceeded.
-----
Para isolar a área afetada deve-se:
Abrir o trecho 181
Abrir o trecho 184
-----
Para reconfigurar deve-se :
Fechar o trecho 121
Fechar o trecho (proteção) 161
-----
Máximo de barras que podem ser energizadas: 153
Barras energizadas pela solução: 153
Elapsed time is 61.619404 seconds.
fx >> |

```

**Figura 5.26 - Resultado da restauração do método baseado em AG para a falta da simulação 3 do sistema 3.**

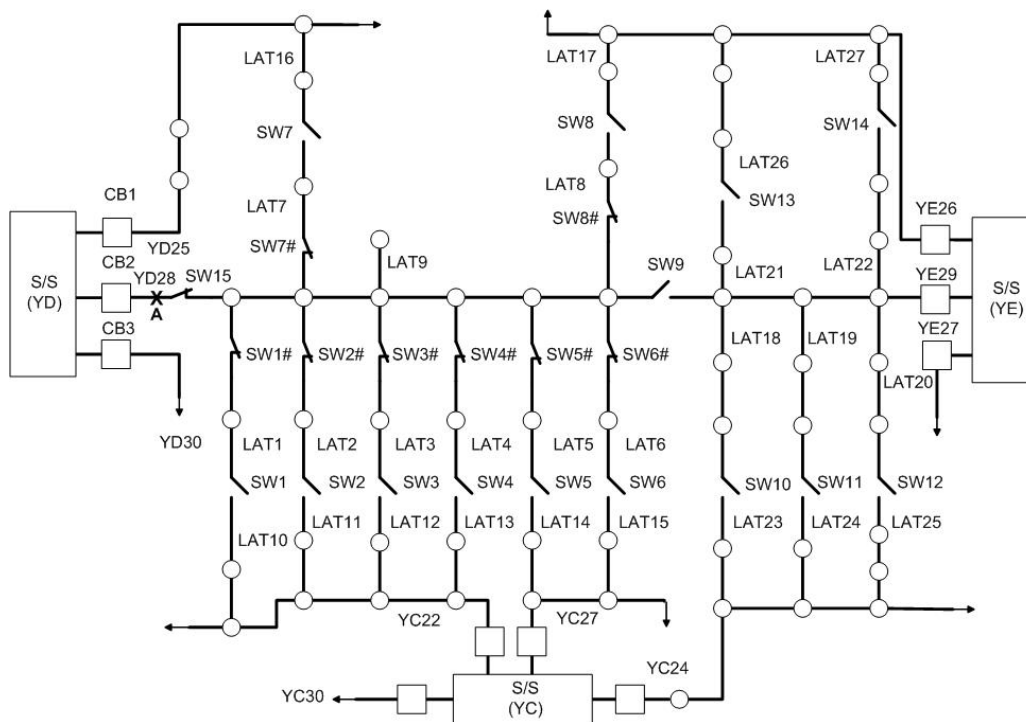
A Tabela 5.17 apresenta a comparação dos resultados obtidos, após 100 execuções, entre os dois métodos utilizados para restaurar o sistema 3 frente à falta da simulação 3.

**Tabela 5.17 - Resultados obtidos com os métodos para a falta da simulação 3 do sistema 3, após 100 execuções.**

MÉTODO	BARRAS ENERGIZADAS NA MELHOR SOLUÇÃO	MANOBRAS EXECUTADAS NA MELHOR SOLUÇÃO	BARRAS DESENERGIZADAS NA MELHOR SOLUÇÃO	PERCENTUAL DE OCORRÊNCIA DA MELHOR RESPOSTA	TEMPO MÉDIO DE EXECUÇÃO
Proposto	153	4	Nenhuma	100%	0,332 segundos
Baseado em AG	153	4	Nenhuma	99%	70,46 segundos

## 5.5 Sistema 4

O sistema 4, apresentado em (HSU E KUO, 1994), é um sistema típico da Taiwan Power Company (TPC) e possui 27 seções laterais, 10 alimentadores e 33 equipamentos, sendo 19 equipamentos NF e 14 equipamentos NA, conforme apresentado na Figura 5.27.



**Figura 5.27 - Sistema de distribuição típico da TPC. (HSU E KUO, 1994)**

O método baseado em busca por alimentadores adjacentes proposto, teve seus resultados comparados ao método baseado em redes neurais de função de base radial apresentado em (HUANG *et al.*, 2011), sendo exposto aos mesmos dados de carregamento utilizados pelos autores para o sistema da Figura 5.27. É importante ressaltar que devido ao fato do algoritmo proposto em (HUANG *et al.*, 2011) considerar somente os valores de corrente para cálculo das cargas, os valores de tensão e fator de potência, necessários ao algoritmo proposto nesse trabalho, foram estimados na inicialização. Além disso, devido à limitação de 450A de todos os alimentadores do sistema, com uma admissão de sobrecarga máxima de 10%, o limite de potência dos alimentadores inserido no algoritmo foi de 3,9MVA por fase.

Após a ocorrência de uma falta no ponto A, localizado no ramo principal do alimentador YD28, conforme pode ser visto na Figura 5.27, o relógio CB2 inicia as tentativas de religamento e vai a bloqueio, interrompendo a alimentação das cargas laterais LAT1 a LAT9.

Durante a etapa de identificação e isolamento da área afetada pelo curto, o algoritmo identificou que a falta ocorreu no trecho compreendido entre o relógio CB2 e a chave SW15, e promoveu a abertura e bloqueio dessa chave para isolar a área

afetada, além do bloqueio do religador CB2 que já se encontrava aberto. A partir desse ponto, as soluções para restauração irão se diferenciar de acordo com os dados de carregamento utilizados para as cargas laterais interrompidas, que são apresentados na Tabela 5.18.

**Tabela 5.18 - Valores de corrente pré-falta, em A, utilizados para as cargas sem energia.**

TESTE	LAT1	LAT2	LAT3	LAT4	LAT5	LAT6	LAT7	LAT8	LAT9
1	42	52	38	24	61	68	58	32	27
2	32	42	28	14	51	58	48	22	17
3	48	58	44	30	67	74	64	38	33

Os resultados obtidos pelos métodos utilizados, para os 3 diferentes níveis de carregamento, são apresentados na Tabela 5.19.

**Tabela 5.19 - Resultados obtidos pelos métodos utilizados.**

	MÉTODO	EQUIPAMENTOS MANOBRADOS	CARGA SEM ENERGIA	SOBRECARGA ALIMENTADOR
Teste 1	Proposto	<b>Abertos:</b> SW2# e SW7# <b>Fechados:</b> SW2, SW7 e SW9	Nenhuma	3,7% (YE29)
	Baseado em RN	<b>Abertos:</b> SW5# e SW7# <b>Fechados:</b> SW5, SW7 e SW9	Nenhuma	1,7% (YE29)
Teste 2	Proposto	<b>Fechados:</b> SW9	Nenhuma	8,2% (YE29)
	Baseado em RN	<b>Abertos:</b> SW6# <b>Fechados:</b> SW6 e SW9	Nenhuma	Nenhuma
Teste 3	Proposto	<b>Abertos:</b> SW1#, SW2# e SW7# <b>Fechados:</b> SW1, SW2, SW7 e SW9	Nenhuma	2,4% (YE29)
	Baseado em RN	<b>Abertos:</b> SW2#, SW5# e SW7# <b>Fechados:</b> SW2, SW5, SW7 e SW9	Nenhuma	Nenhuma

Conforme apresentado na Tabela 5.19, nos testes 1 e 3 os dois métodos conseguiram restaurar todas as cargas do sistema com o mesmo número de manobras, mantendo as cargas dos alimentadores dentro do limite operacional estipulado. Porém, no teste 2, o algoritmo proposto conseguiu restaurar o sistema com apenas uma manobra, enquanto o algoritmo baseado em redes neurais necessitou de três.

Por ser baseado em redes neurais, o método utilizado como comparação necessita de um treinamento prévio da rede com dados do sistema a ser utilizado. Para esse

exemplo, o tempo médio de convergência do método após 100 execuções foi de 9.05s (HUANG *et al.*, 2011).

O algoritmo desenvolvido não necessita de treinamento prévio. Os tempos de processamento para resolução do sistema, após 100 execuções para cada um dos casos apresentados, são apresentados na Tabela 5.20.

**Tabela 5.20 - Tempos de processamento do algoritmo proposto, após 100 execuções.**

TESTE	MÉDIA (s)	MÍNIMO (s)	MÁXIMO (s)
1	4,77	4,67	4,98
2	4,55	4,47	4,68
3	4,94	4,70	5,66

## **5.6 Conclusões do Capítulo**

Nesse capítulo foram apresentados os resultados do método baseado em busca por alimentadores adjacentes proposto, em quatro sistemas distintos, frente à faltas em diferentes pontos. Além disso, os resultados obtidos nos três primeiros sistemas foram comparados com os do método baseado em AG proposto, para todos os casos, enquanto que os resultados obtidos no sistema 4 foram comparados com os do método baseado em redes neurais de função de base radial proposto em (HUANG *et al.*, 2011).

Todos os testes foram realizados através do software MATLAB em um computador com as seguintes configurações: Processador Intel Core i5 com 4GB de memória RAM.

Durante o processo de testes, outros sistemas não apresentados nesse trabalho foram utilizados, a fim de reforçar o funcionamento do método proposto. Ao todo foram quatro sistemas distintos, além dos quatro apresentados nesse capítulo, nos quais os resultados obtidos com o método proposto também foram satisfatórios após várias simulações executadas de forma exaustiva.

## **Capítulo 6      Testes e Resultados com Equipamentos Reais**

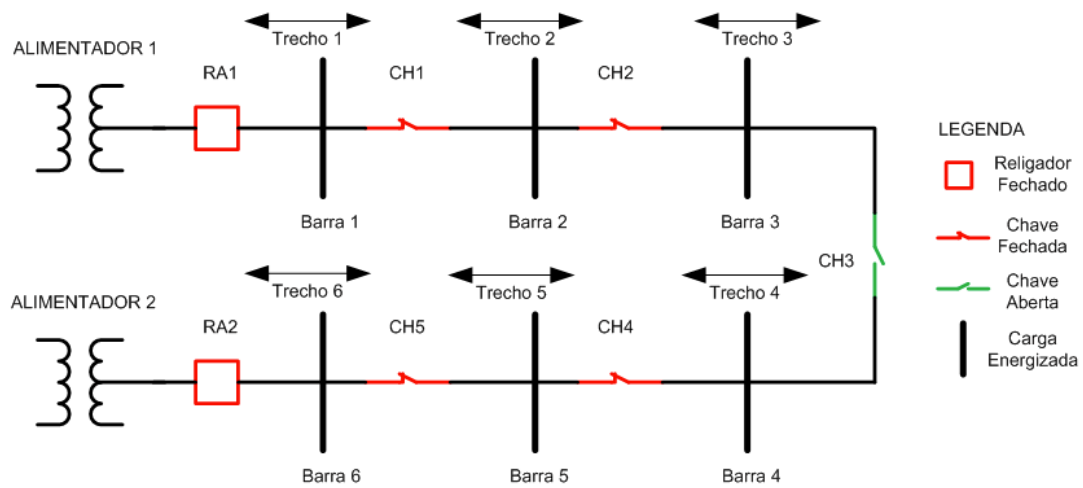
### **6.1 Introdução**

Para testar a aplicação prática do método baseado em busca por alimentadores adjacentes proposto, uma rede similar ao sistema 1 apresentado no capítulo 5, foi montada em laboratório com equipamentos reais, possibilitando a geração de faltas em diferentes trechos e utilizando modems de telecontrole baseados em tecnologia 3G para prover a comunicação dos equipamentos com o computador responsável por executar o algoritmo desenvolvido.

Nesse capítulo será apresentada a estrutura montada em laboratório para permitir os testes com equipamentos reais, bem como os resultados obtidos utilizando o método proposto.

### **6.2 Estrutura Montada em Laboratório**

A rede montada em laboratório é similar ao sistema 1 apresentado no capítulo 5, sendo composta por 2 controles de religador, um do modelo R14 da marca LUPA e outro do modelo FORM 6 da marca EATON, e 5 controles de chave do modelo C14 da marca LUPA. Esses equipamentos foram instalados seguindo a topologia apresentada na Figura 6.1.



**Figura 6.1 - Topologia do sistema montando em laboratório.**

Todos os equipamentos foram dispostos em uma estante, conforme pode ser observado na Figura 6.2.





**Figura 6.2 - Estrutura utilizada para os testes com equipamentos reais.**

Com a finalidade de simular as cargas dos trechos do sistema, foram instalados resistores em cada conexão entre dois equipamentos consecutivos. Além disso, foram instalados interruptores em cada trecho do sistema, que permitem realizar o fechamento

do ponto conectado para o neutro, possibilitando assim a simulação de uma falta. A Figura 6.3 apresenta o diagrama unifilar da estrutura.

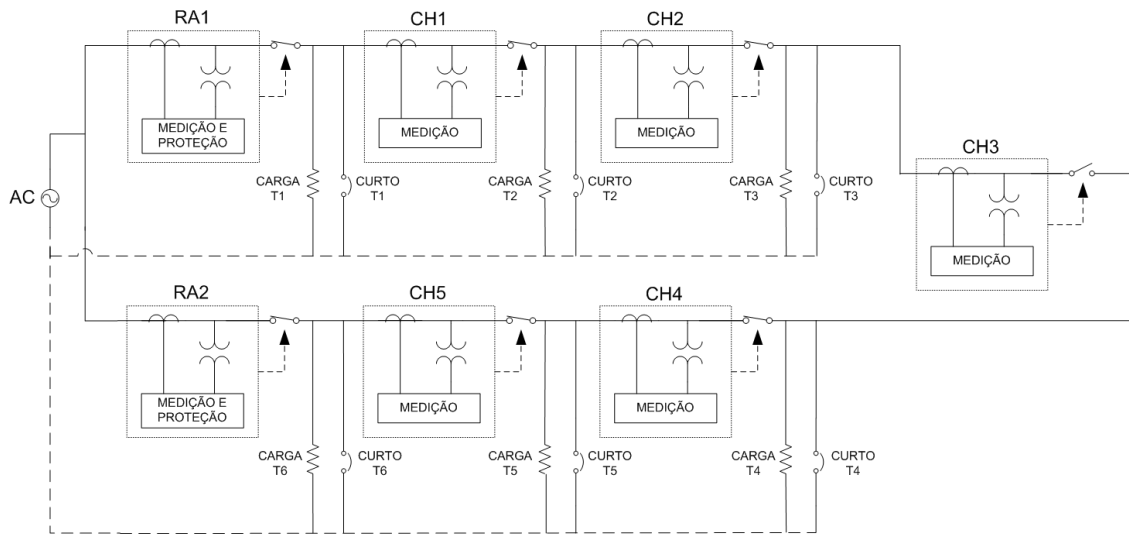


Figura 6.3 - Diagrama unifilar da estrutura de testes.

### 6.3 Comunicação do Sistema

Uma vez que todos os equipamentos da rede apresentada se comunicam através do protocolo DNP3, foi desenvolvido um software responsável por questionar os equipamentos periodicamente, simulando o papel do software SCADA da concessionária, interpretar o protocolo DNP3 e encaminhar os dados necessários ao método proposto para o algoritmo em execução no MATLAB.

A comunicação entre o software DNP3 e os equipamentos é realizada através de modems de telecontrole modelo HORUS V3 da marca LUPA, conectados a cada um dos equipamentos da rede através de cabo serial. Os modems se conectam ao servidor de telecontrole da empresa LUPA utilizando a rede de dados 3G, e este disponibiliza portas TCP que estão associadas a cada um dos equipamentos conectados.

O software desenvolvido promove então conexões TCP cliente em cada uma das portas disponibilizadas pelo servidor, fechando assim o laço de comunicação com os equipamentos. Do outro lado, o software disponibiliza uma porta para conexão do algoritmo desenvolvido em MATLAB, que promove uma conexão TCP cliente assim que executado, completando dessa forma todo o laço de comunicação. A Figura 6.4 ilustra a topologia de comunicação do sistema.

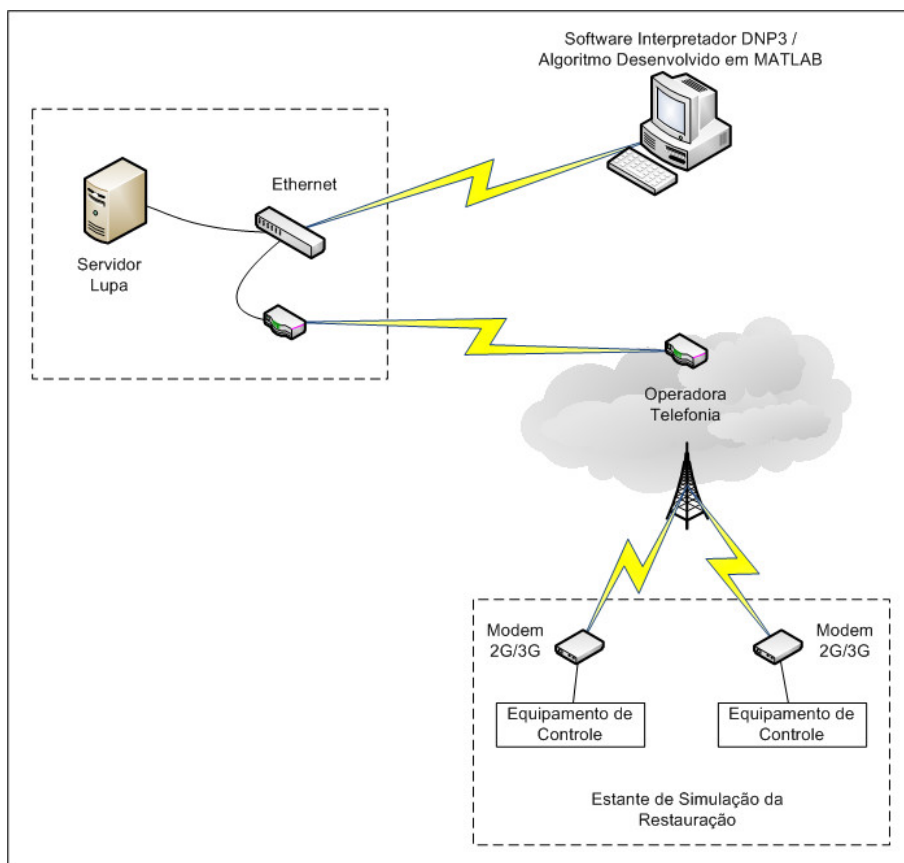


Figura 6.4 - Topologia de Comunicação do Sistema.

## 6.4 Resultados

Com todo o sistema em operação normal, o conector T6 foi fechado, ocasionando uma falta no trecho 6 do sistema. O religador RA2 entrou em ciclo de religamento e, após 3 tentativas, foi a bloqueio, interrompendo a alimentação das cargas 4, 5 e 6, conforme Figura 6.5.

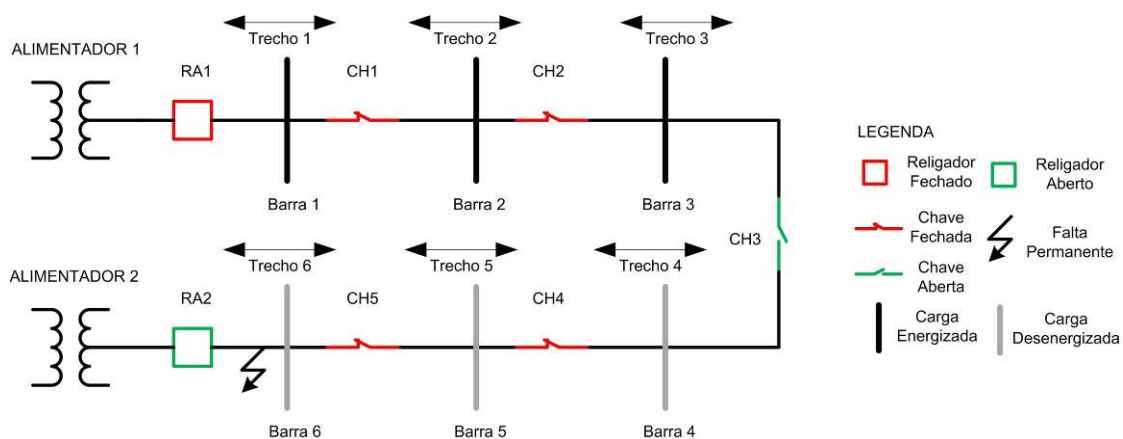
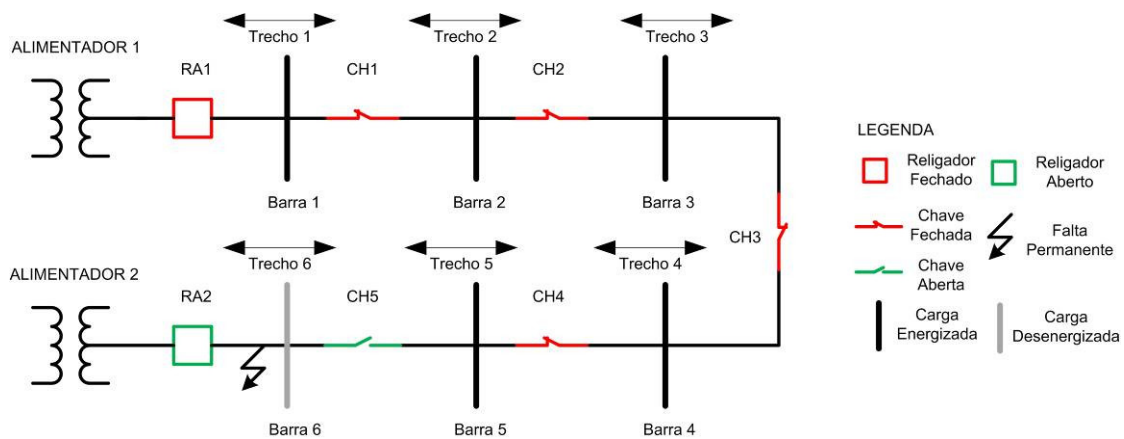


Figura 6.5 - Curto no trecho 6 do sistema.

Após 12 segundos, a informação de bloqueio do RA2 foi recebida pelo software DNP3 e imediatamente repassada ao algoritmo, que iniciou o processo de restauração. Em 0,250 segundos o algoritmo identificou todas as manobras necessárias para isolar a área afetada e restaurar o sistema, iniciando então a etapa de envio dos comandos de abertura e fechamento necessários para o software DNP3, responsável por repassar toda essa informação aos equipamentos do sistema.

Primeiro o algoritmo solicitou a abertura da chave CH5, para isolar a área afetada, e em seguida foi solicitado o fechamento da chave CH3, restaurando a alimentação das cargas 4 e 5. A configuração final do sistema após a restauração é apresentada na Figura 6.6.



**Figura 6.6 - Configuração do sistema após a restauração para a falta no trecho 6.**

Todo o processo, desde o bloqueio do religador até a restauração do sistema, teve a duração de aproximadamente 30 segundos, tempo esse devido ao intervalo de varredura de informações do software desenvolvido e à latência da comunicação 3G.

Após a normalização do sistema, uma nova falta foi simulada, mas dessa vez no trecho 5, através do fechamento do conector T5. Novamente o religador RA2 entrou em ciclo de religamento e, após 3 tentativas, foi a bloqueio, interrompendo a alimentação das cargas 4, 5 e 6, conforme Figura 6.7.

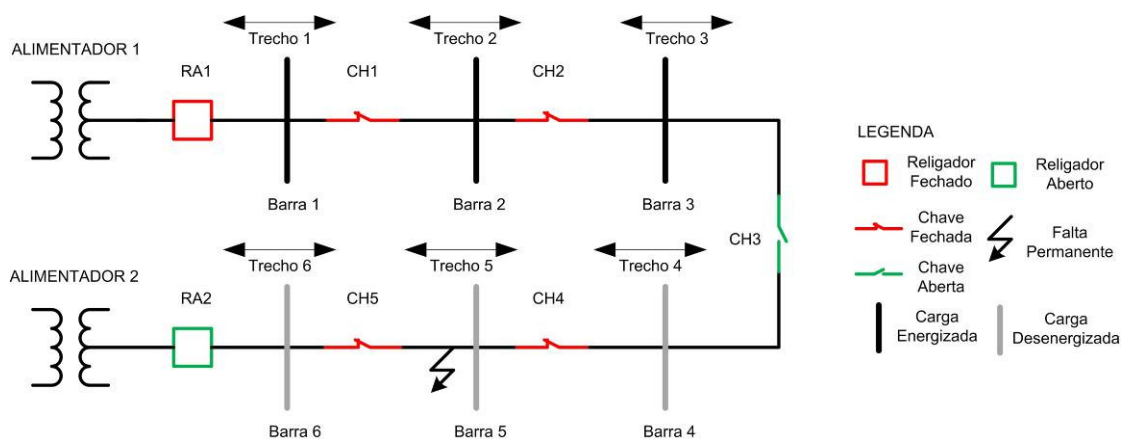


Figura 6.7 - Curto no trecho 5 do sistema.

Após 12 segundos, a informação de bloqueio do RA2 foi recebida pelo software DNP3 e imediatamente repassada ao algoritmo, que iniciou o processo de restauração. Em 0,250 segundos o algoritmo identificou todas as manobras necessárias para isolar a área afetada e restaurar o sistema, iniciando então a etapa de envio dos comandos de abertura e fechamento necessários para o software DNP3, responsável por repassar toda essa informação aos equipamentos do sistema.

Primeiro o algoritmo solicitou a abertura das chaves CH4 e CH5, para isolar a área afetada, e em seguida foi solicitado o fechamento da chave CH3 e posteriormente do religador RA2, restaurando a alimentação das cargas 4 e 6. A configuração final do sistema após a restauração é apresentada na Figura 6.8.

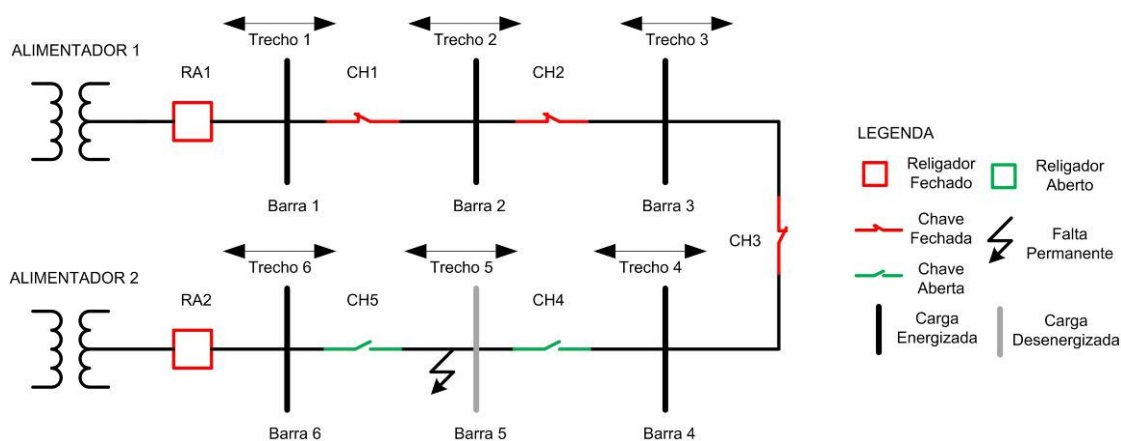


Figura 6.8 - Configuração do sistema após a restauração para a falta no trecho 5.

Todo o processo, desde o bloqueio do religador até a restauração do sistema, teve a duração de aproximadamente 38 segundos, tempo esse devido ao intervalo de varredura de informações do software desenvolvido e à latência da comunicação 3G.

## **6.5 Conclusões do Capítulo**

Nesse capítulo foi apresentada a estrutura com equipamentos reais montada em laboratório e os resultados obtidos com o método proposto nesse sistema.

Os testes foram realizados utilizando o software MATLAB para executar o algoritmo proposto e um software próprio, desenvolvido em C++, para servir de interface de comunicação entre os equipamentos e o algoritmo, interpretando as mensagens DNP3 e repassando as informações necessárias. Os dois softwares foram executados em um mesmo computador com as seguintes configurações: Processador Intel Core i5 com 4GB de memória RAM.

Durante todo o processo, foram realizados exaustivos testes no sistema, gerando inclusive faltas em outros pontos não apresentados nesse trabalho, todas com resultados satisfatórios por parte do algoritmo. Devido à comunicação 3G, que não é o foco do trabalho desenvolvido, algumas falhas foram notadas no momento de manobra dos equipamentos, ocasionando a falha na restauração do sistema por problemas de comunicação, ainda que o algoritmo tenha executado todos os comandos de manobra corretamente.

## Capítulo 7 Conclusões

### 7.1 Conclusões Gerais

Neste trabalho, dois métodos para restauração de sistemas de distribuição após a ocorrência de uma ou mais faltas permanentes, foram desenvolvidos e implementados computacionalmente.

O primeiro método proposto se baseia na busca por trechos pertencentes a alimentadores adjacentes à área afetada por uma falta. Trechos adjacentes que possuam equipamentos NA instalados ou que possuam um equipamento NF que faça ligação a ao menos uma barra com três ou mais conexões, são selecionados pelo algoritmo para participar do processo de análise. Esse processo realiza um teste exaustivo de todas as possibilidades de configuração dos equipamentos, a fim de encontrar a melhor solução para restaurar o sistema.

O segundo método proposto se baseia na utilização de Algoritmos Genéticos para restauração do sistema. O funcionamento do algoritmo desenvolvido é idêntico ao do método baseado em busca por alimentadores adjacentes, com exceção da etapa de análise para restauração, que nesse caso se baseia na utilização de Algoritmos Genéticos.

É importante ressaltar que, por ter o propósito de permitir a restauração automática do sistema após a ocorrência de um problema, apenas equipamentos telecontrolados são considerados. Além disso, os métodos somente fazem uso de dados facilmente fornecidos pelos equipamentos instalados na rede, tais como os dados de tensão, corrente, fator de potência e estado do equipamento.

Os métodos propostos foram expostos a três sistemas simulados distintos, sendo um deles baseado em um sistema real de uma concessionária brasileira, com faltas em diferentes pontos, considerando inclusive faltas simultâneas. Os dois métodos conseguiram restaurar os sistemas em questão em todos os casos testados, inclusive na situação de múltiplas faltas, em tempos inferiores a 3 minutos, atendendo dessa forma aos objetivos propostos.

Porém, o método baseado em busca por alimentadores adjacentes se mostrou mais eficiente nas simulações realizadas. Esse método conseguiu restaurar, na maioria dos casos, mais cargas dos sistemas apresentados do que o método baseado em Algoritmos Genéticos, além de realizar o processo em tempos bem inferiores.

Dada sua maior eficiência em relação ao método baseado em Algoritmos Genéticos, o método baseado em busca por alimentadores adjacentes foi exposto a um quarto sistema, da TPC, tendo seus resultados comparados a um método baseado em redes neurais proposto em (HUANG *et al.*, 2011). O método proposto superou o método baseado em redes neurais em um dos três testes realizados, onde conseguiu restaurar o sistema com apenas uma manobra frente às três necessárias pelo método baseado em redes neurais, e atingiu resultados equivalentes nos demais casos testados.

Além disso, o método baseado em busca por alimentadores adjacentes proposto foi aplicado em um sistema com equipamentos reais, montado em laboratório. Os resultados obtidos foram satisfatórios em todas as situações testadas, onde o método conseguiu realizar todo o processo de restauração, utilizando modems baseados em tecnologia 2G/3G para o telecontrole, frente às faltas simuladas, em tempos inferiores a 3 minutos, se mostrando viável para implementação prática em sistemas reais.

## **7.2 Trabalhos Futuros**

O método proposto pode ser melhorado incorporando características inerentes a sistemas reais, visando o aprimoramento do algoritmo para utilização prática. Algumas sugestões para trabalhos futuros relacionados ao tema são listadas a seguir:

- Desenvolver um método de proteção adaptativa, que realize a adequação dos ajustes de proteção dos equipamentos de acordo com a nova configuração imposta à rede pela restauração;
- Considerar a geração distribuída no processo de restauração do sistema;
- Considerar áreas que possuam banco de capacitores e reguladores de tensão no processo de restauração do sistema;
- Desenvolver um sistema para permitir a integração do algoritmo desenvolvido com o sistema SCADA da concessionária;
- Avaliar as possibilidades de comunicação do algoritmo desenvolvido com os equipamentos do sistema de distribuição;
- Considerar a ausência de tensão no barramento da subestação como indicação de falha, iniciando o processo de restauração do sistema;
- Desenvolver uma interface gráfica para inserção dos dados topológicos do sistema, facilitando a aplicação prática do método proposto.



## Bibliografia

- ANEEL, 2016, “Qualidade do Serviço” [Online]. Disponível: <http://www.aneel.gov.br/qualidade-do-servico2>
- AOKI, K., NARA, K., ITOH, M., SATOH, T., KUWABARA, H., 1989, “A New Algorithm for Service Restoration in Distribution Systems”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 4, n. 3, pp. 1832–1839, Julho.
- BORGES, T. T., CARNEIRO Jr., S., GARCIA, P. A. N., PEREIRA, J. L. R., OLIVEIRA, L. W. de, SILVA Jr., I. C. da, 2011, “Distribution Systems Restoration Using the Interior Point Method and Sensibility Analysis”, *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1–4, San Diego, California, EUA, Julho.
- BORGES, T. T., 2012, “Restabelecimento de Sistemas de Distribuição Utilizando Fluxo de Potência Ótimo”, Tese de D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Fevereiro.
- BRETAS, N. G., DELBEM, A. C. B., CARVALHO, A. de, 1998, “Optimal Energy Restoration for General Distribution Systems by Genetic Algorithms”, *1998 International Conference on Power System Technology*, v. 1, pp. 43–47, Pequim, China, Agosto.
- 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., HERNANDES Jr., L. J., 2013, “Advanced Network Reconfiguration System Applied to CEMIG-D System”, *IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LA)*, pp. 1–7, São Paulo, Brasil, Abril.
- CAVALCANTE, P. L., LOPEZ, J. C., FRANCO, J. F., RIDER, M. J., GARCIA, A. V., MALVEIRA, M. R. R., MARTINS, L. L., DIREITO, L. C. M., 2016, “Centralized Self-Healing Scheme for Electrical Distribution Systems”, *IEEE*

*Transactions on Smart Grid*, v. 7, n. 1, pp. 145–155, Janeiro.

FUKUYAMA, Y., CHIANG, H. –D., 1995, “A Parallel Genetic Algorithm for Service Restoration in Electric Power Distribution Systems”, *International Joint Conference of the Fourth IEEE International Conference on Fuzzy Systems and The Second International Fuzzy Engineering Symposium*, v. 1, pp. 275–282, Yokohama, Japão, Maio.

GOSWAMI, S. K., BASU, S. K., 1992, “A New Algorithm for the Reconfiguration of Distribution Feeders for Loss Minimization”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 7, n. 3, pp. 1484–1491, Julho.

GRANVILLE, S., MELLO, J. C. O., MELO, A. C. G., 1996, “Application of Interior Point Methods to Power Flow Unsolvability”, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 11, n. 2, pp. 1096–1103, Maio.

HSIAO, Y. –T., CHIEN, C. –Y., 2000, “Enhancement of Restoration Service in Distribution Systems Using a Combination Fuzzy–GA Method”, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 15, n. 4, pp. 1394–1400, Novembro.

HSU, Y. –Y., KUO, H. –C., 1994, “A Heuristic Based Fuzzy Reasoning Approach for Distribution System Service Restoration”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 9, n. 2, pp. 948–953, Abril.

HUANG, C. –M., 2003, “Multiobjective Service Restoration of Distribution Systems Using Fuzzy Cause-Effect Networks”, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 18, n. 2, pp. 867–874, Maio.

HUANG, Y. –C., CHEN, S. –J., HUANG, C. –M., 2011, “Evolving Radial Basic Function Neural Network for Fast Restoration of Distribution Systems”, *2011 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, pp. 401–406, Pequim, China, Junho.

INAGAKI, J., NAKAJIMA, J., HASEYAMA, M., 2006, “A Multi-objective Service

- Restoration Method for Power Distribution Systems”, *2006 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, pp. 1784–1787, Ilha de Kos, Grécia, Maio.
- KARMARKAR, N. K., RAMAKRISHNAN, K. G., 1991, “Computational Results of an Interior Point Algorithm for Large Scale Linear Programming”, *Mathematical Programming*, v. 52, n. 1, pp. 555–586.
- KLEINBERG, M., MIU, K., CHIANG, H. –D., 2009, “Service Restoration of Power Distribution Systems Incorporating Load Curtailment”, *IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 2009 (ISCAS 2009)*, pp. 1709–1712, Taipé, Taiwan, Maio.
- MARQUEZ, R. A. C., 2014, “Restabelecimento de Energia em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica com Priorização de Chaves Automáticas”, Dissertação de M. Sc., EESC/USP, São Carlos, SP, Brasil, Março.
- MIU, K. N., CHIANG, H. –D., YUAN, B., DARLING, G., 1998, “Fast Service Restoration for Large-Scale Distribution Systems with Priority Customers and Constraints”, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 13, n. 3, pp. 789–795, Agosto.
- MORELATO, A. L., MONTICELLI, A., 1989, “Heuristic Search Approach to Distribution System Restoration”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 4, n. 4, pp. 2235–2241, Outubro.
- MORI, H., MUROI, T., 2015, “Reduced-Neighborhood-Based Tabu Search for Distribution System Service Restoration”, *2015 18<sup>th</sup> International Conference on Intelligent System Application to Power System (ISAP)*, pp. 1–6, Porto, Portugal, Setembro.
- RODRIGUES, J. M., 2015, “Algoritmo para Restauração de Sistemas de Distribuição Considerando Medições e Reduzidas Informações de Parâmetros da Rede

Elétrica”, Dissertação de M. Sc., PPPE/UFJF, Juiz de Fora, MG, Brasil, Agosto.

SANCHES, D. S., 2013, “Algoritmos Evolutivos Multi-Objetivo para Reconfiguração de Redes em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica”, Tese de D. Sc., EESC/USP, São Carlos, SP, Brasil, Janeiro.

SATTY, T. L., 1980, “The Analytical Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation”, New York: McGraw-Hill.

SHIRMOHAMMADI, D., 1992, “Service Restoration in Distribution Networks via Network Reconfiguration”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 7, n. 2, pp. 952–958, Abril.

SOUZA, S. S. F. de, 2013, “Algoritmo GRASP Especializado Aplicado ao Problema de Reconfiguração de Alimentadores em Sistemas de Distribuição Radial”, Dissertação de M. Sc., UNESP, Ilha Solteira, SP, Brasil, Fevereiro.