



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CARLOS EDUARDO RODRIGUES NOGUEIRA

**Autorrestauração de Redes de Distribuição com Foco
na Operação da Distribuição - Ferramenta de Auxílio à
Tomada de Decisão**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Belo Horizonte
Julho de 2016

CARLOS EDUARDO RODRIGUES NOGUEIRA

**Autorrestauração de Redes de Distribuição com Foco
na Operação da Distribuição - Ferramenta de Auxílio à
Tomada de Decisão**

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Wallace do Couto Boaventura

Coorientador: Eduardo Gontijo Carrano

Belo Horizonte

Julho de 2016

N778a

Nogueira, Carlos Eduardo Rodrigues.
Autorrestauração de redes de distribuição com foco na operação da
distribuição - ferramenta de auxílio à tomada de decisão [manuscrito] /
Carlos Eduardo Rodrigues Nogueira. – 2016.
81 f., enc.: il.

Orientador: Wallace do Couto Boaventura.
Coorientador: Eduardo Gontijo Carrano.

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

Bibliografia: f. 78-81.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Energia elétrica - Distribuição -
Teses. 3. Redes elétricas - Teses. I. Boaventura, Wallace do Couto.
II. Carrano, Eduardo Gontijo. III. Universidade Federal de Minas Gerais.
Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621.3(043)

**"Autorrestauração de Redes de Distribuição com Foco na
Operação da Distribuição - Ferramenta de Auxílio à Tomada de
Decisão"**

CARLOS EDUARDO RODRIGUES NOGUEIRA

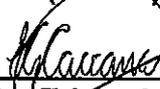
Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 28 de julho de 2016.

Por:



Prof. Dr. Wallace do Couto Boaventura
DEE (UFMG) - Orientador



Prof. Dr. Eduardo Gontijo Carrano
DEE (UFMG) - Coorientador



Prof. Dr. Eduardo Mazoni Andrade Marçal Mendes
DELT (UFMG)



Prof. Dr. Felipe Campelo França Pinto
DEE (UFMG)

Agradecimentos

A Deus, em primeiro lugar, por tudo que Ele tem proporcionado em minha vida.

À minha esposa Júnia, pelos momentos incondicionais de apoio, dedicação e carinho e, principalmente, pela compreensão e paciência nas horas difíceis.

Ao meu filho, Enzo, meu maior presente.

À minha mãe, Bárbara, por tudo que fez por mim, em especial pelo amor e pelas orações.

Ao meu avó Vicente, meu exemplo de vida, por ter assumido o papel de pai desde os meus primeiros anos de vida.

Aos meus orientadores, Wallace Boaventura e Eduardo Carrano, pela confiança em mim depositada e pelo tempo dedicado.

A todos os meus amigos de mestrado, pelas discussões e apoio mútuo.

Por fim, a todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

Resumo

A interrupção do fornecimento de energia tem se configurado como uma das ocorrências mais graves que afetam a qualidade da energia. A restauração de sistemas de distribuição de energia elétrica tem papel crucial no ambiente das concessionárias, tendo em vista a pressão sofrida pelos operadores do sistema de distribuição e as metas estabelecidas pelos órgãos de regulação, que contemplam, inclusive, a possibilidade de perda da concessão em casos de reincidência de descumprimento de metas de DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora). Nesse sentido, os sistemas *self-healing* se apresentam como alternativa, realizando a restauração de maneira mais rápida e automática, reduzindo os impactos causados por distúrbios acidentais ocorridos no sistema. Neste trabalho é proposta uma nova estratégia de restauração de sistemas de distribuição que tem como principal característica lidar com o problema da forma com que ele é enfrentado pelo operador, sem simplificações como em diversos trabalhos da literatura. Nesta proposta, um algoritmo mono-objetivo, baseado no ILS (do inglês, *Iterated Local Search*), foi utilizado com o objetivo de restabelecer, em tempo real, o máximo de cargas, sem depender do conhecimento à priori da localização da falha. Duas funções de mérito: (i) cargas não restauradas e, (ii) número de manobras, foram combinadas em uma função lexicográfica, em que o objetivo é minimizar a porcentagem de cargas não restauradas e, em caso de igualdades, a função de mérito (ii) é usada como critério de desempate. Para validar a metodologia proposta foram testados 2 sistemas reais de grande porte disponibilizados pela CEMIG-D, sendo um com 2 subestações, 5 alimentadores, 703 barras e 132 equipamentos e outro com 3 subestações, 7 alimentadores, 21.633 barras e 2.808 equipamentos. Esses sistemas foram submetidos a situações de falhas simples e múltiplas. Os resultados obtidos foram os esperados, sendo alcançados com tempo computacional muito baixo, da ordem de 10 segundos, atendendo todas as necessidades operativas.

Palavras-chave—Restauração. Autorrecuperação. Redes Elétricas Inteligentes. Otimização.

Abstract

The interruption of the power supply has been configured as one of the most serious incidents affecting power quality. The power distribution system restoration has a crucial role in the electric utilities environment, in view of the pressure experienced by the distribution system operators and the goals established by the regulatory agencies, which include even the possibility of concession loss in cases of recurrence of non-compliance with DEC and FEC's goals. In this sense, the self-healing systems may be an alternative, since they perform the restoration faster and automatically, reducing the impacts caused by accidental system disturbances. This work proposes a new distribution system restoration strategy, which has as main characteristic to deal with the problem from the operator's view, without simplifications that are used in most of the literature work. In this proposal, a mono-objective algorithm based on the ILS (*Iterated Local Search*) was used in order to restore, in real time, the maximum loads, without depending on a priori knowledge of the location of the fault. Two merit functions, (i) non-restored load and (ii) number of maneuvers, were combined in a lexicographical function, in which the goal is to minimize the percentage of non-restored loads and, in case of equalities, the merit function (ii) is used as a decisive criteria. To validate the proposed methodology, two large real systems provided by CEMIG-D were tested: one with two substations, 5 feeders, 703 buses and 132 equipment, and the other with three substations, 7 feeders, 21,633 buses and 2,808 equipment. These systems have been subjected to situations of single and multiple failures. The results obtained were as expected, being achieved with very low processing time, of the order of ten seconds, complying all the operating requirements.

Index Terms—Restoration. Self-Healing. Smart-Grid. Optimization.

Lista de ilustrações

| | |
|---|----|
| Figura 1 – DEC Anual - Concessionárias - Brasil | 16 |
| Figura 2 – FEC Anual - Concessionárias - Brasil | 16 |
| Figura 3 – Exemplo de um SEP | 20 |
| Figura 4 – Exemplo de um Sistema de Distribuição Primária | 21 |
| Figura 5 – Modelo Conceitual de REI | 27 |
| Figura 6 – Ilustração da Representação do ILS | 31 |
| Figura 7 – Fluxograma da Arquitetura Proposta | 46 |
| Figura 8 – Sistema Exemplo Completo | 47 |
| Figura 9 – Sistema Exemplo Equivalente - 16 Barras - Ramos Manobráveis . . | 48 |
| Figura 10 – Sistema Exemplo Equivalente - Equipamentos TLC | 49 |
| Figura 11 – Exemplo de Solução Incumbente | 53 |
| Figura 12 – Fluxograma do Esquema de Decodificação | 55 |
| Figura 13 – Sistema Exemplo Restaurado. | 57 |
| Figura 14 – Fluxograma do Procedimento de Mutação. | 60 |
| Figura 15 – Sistema CEMIG A - Equipamentos TLC. | 63 |
| Figura 16 – Sistema CEMIG A Após Atuação da Proteção do Alimentador AL-01. | 64 |
| Figura 17 – Restauração do Sistema CEMIG A Após Atuação da Proteção do Alimentador AL-01. Primeiro Estágio Implementado. | 65 |
| Figura 18 – Restauração do Sistema CEMIG A Após Atuação da Proteção do Alimentador AL-01. Segundo Estágio Implementado. | 65 |
| Figura 19 – Sistema CEMIG A - Caso II - Critério de Sobrecarga: 10% | 67 |
| Figura 20 – Sistema CEMIG A - Caso II - Critério de Sobrecarga Relaxado: 20%. | 68 |
| Figura 21 – Sistema CEMIG B - Equipamentos TLC. | 69 |
| Figura 22 – Sistema CEMIG B Após Atuação da Proteção do Alimentador AL-03. | 70 |
| Figura 23 – Restauração do Sistema CEMIG B Após Atuação da Proteção do Alimentador AL-03. | 71 |
| Figura 24 – Sistema CEMIG B Após Atuação da Proteção dos Alimentadores AL-02, AL-05 e AL-06 e dos Religadores TLC 216055 e 32574. | 72 |
| Figura 25 – Restauração do Sistema CEMIG B Após Atuação da Proteção dos Alimentadores AL-02, AL-05 e AL-06 e dos Religadores TLC 216055 e 32574. | 73 |
| Figura 26 – Restauração do Sistema CEMIG B Após Atuação da Proteção dos Alimentadores AL-02, AL-05 e AL-06 e dos Religadores TLC 216055 e 32574 com Relaxamento dos Critérios de Tensão e Corrente. | 75 |

Lista de tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Tensões Usuais em Sistemas de Potência | 20 |
| Tabela 2 – Faixas de Classificação de Tensões – Regime Permanente | 23 |
| Tabela 3 – Classificação dos Equipamentos | 52 |
| Tabela 4 – Classificação dos Equipamentos do Sistema Exemplo - Cenário Pré-Falta | 52 |
| Tabela 5 – Classificação dos Equipamentos do Sistema Exemplo - Cenário Pós-Falta | 53 |
| Tabela 6 – Classificação dos Equipamentos do Sistema Exemplo - Após a Primeira Iteração | 56 |

Lista de abreviaturas e siglas

| | |
|---------|---|
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica |
| BT | Baixa Tensão |
| COD | Centro de Operação da Distribuição |
| DEC | Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora |
| DIC | Duração de Interrupção Individual por unidade consumidora |
| DICRI | Duração da Interrupção Individual ocorrida em Dia Crítico por unidade consumidora |
| DMIC | Duração máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora |
| DOU | Diário Oficial da União |
| FEC | Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora |
| FIC | Frequência de Interrupção Individual por unidade consumidora |
| FLI | <i>Fault Location, Isolation</i> |
| FLISR | <i>Fault Location, Isolation, and Service Restoration</i> |
| GD | Geração Distribuída |
| GA | <i>Genetic Algorithm</i> |
| IEA | <i>International Energy Agency</i> |
| ILS | <i>Iterated Local Search</i> |
| LD | Linha de Distribuição |
| MT | Média Tensão |
| NIST | <i>National Institute of Standards and Technology</i> |
| PRODIST | Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional |
| QEE | Qualidade da Energia Elétrica |
| RA | Religamento Automático |

| | |
|-------|---|
| REI | Rede Elétrica Inteligente |
| SCADA | <i>Supervisory Control and Data Acquisition</i> |
| SD | Sistema de Distribuição |
| SE | Subestação |
| SEP | Sistema Elétrico de Potência |
| SR | <i>Service Restoration</i> |
| TLC | Telecomando / Telecontrole |
| TMAE | Tempo Médio de Atendimento a Emergências |
| TMD | Tempo Médio de Deslocamento |
| TME | Tempo Médio de Execução |
| TMP | Tempo Médio de Preparação |

Sumário

| | | |
|---------|---|----|
| 1 | Introdução | 14 |
| 1.1 | Contextualização | 14 |
| 1.2 | Descrição do Problema | 15 |
| 1.3 | Objetivos | 17 |
| 1.3.1 | Objetivo Geral | 17 |
| 1.3.2 | Objetivos Específicos | 17 |
| 1.4 | Justificativa | 18 |
| 1.5 | Estrutura da Dissertação | 18 |
| 2 | Fundamentação Teórica | 19 |
| 2.1 | Sistema Elétrico de Potência | 19 |
| 2.1.1 | Sistema de Distribuição | 21 |
| 2.2 | Normas e Indicadores | 22 |
| 2.3 | Reconfiguração e Restauração | 24 |
| 2.4 | <i>Self-Healing</i> | 25 |
| 2.4.1 | Automação | 25 |
| 2.4.2 | <i>Smart Grids</i> | 26 |
| 2.4.3 | <i>Self-Healing</i> | 28 |
| 2.5 | <i>Iterated Local Search</i> | 29 |
| 3 | Revisão de Literatura | 34 |
| 3.1 | Restauração de Redes | 34 |
| 3.2 | <i>Self-Healing</i> | 40 |
| 4 | Abordagem Proposta | 44 |
| 4.1 | Formulação Matemática | 44 |
| 4.2 | Algoritmo Proposto | 46 |
| 4.2.1 | Sistema Completo | 46 |
| 4.2.2 | Sistema Equivalente – Ramos Manobráveis | 48 |
| 4.2.3 | Sistema Equivalente – Equipamentos TLC | 49 |
| 4.2.4 | Processamento/Isolamento da Falha | 50 |
| 4.2.5 | Otimização | 50 |
| 4.2.5.1 | Classificação dos Setores de Carga | 51 |
| 4.2.5.2 | Classificação dos Equipamentos | 51 |
| 4.2.5.3 | Codificação e Decodificação | 53 |
| 4.2.5.4 | Algoritmo ILS | 57 |

| | | |
|-------|---|----|
| 5 | Resultados e Discussões | 62 |
| 5.1 | Sistema CEMIG A | 62 |
| 5.1.1 | Caso I - Atuação de Um Único Dispositivo de Proteção | 63 |
| 5.1.2 | Caso II - Atuação de Múltiplos Dispositivos de Proteção | 66 |
| 5.2 | Sistema CEMIG B | 69 |
| 5.2.1 | Caso I - Atuação de Um Único Dispositivo de Proteção | 69 |
| 5.2.2 | Caso II - Atuação de Múltiplos Dispositivos de Proteção | 72 |
| 5.2.3 | Caso III - Atuação de Múltiplos Dispositivos de Proteção - Relaxamento das Restrições | 74 |
| 6 | Considerações Finais | 76 |
| 6.1 | Conclusões | 76 |
| 6.2 | Sugestões para Trabalhos Futuros | 77 |
| 6.3 | Produção Bibliográfica | 77 |
| | REFERÊNCIAS | 78 |

1 Introdução

Desde o início do século XXI, um novo conceito começou a ser abordado no setor elétrico, as Redes Elétricas Inteligentes - REI - (do inglês, *Smart Grid*). Motivados pela necessidade de se melhorar a infraestrutura do sistema elétrico, tornando-o mais seguro, ágil, robusto e capaz de se adaptar a eventos inesperados, vários estudos começaram a ser realizados nesta área. Existem diversas definições de REI, sendo de maneira geral, definidas como um sistema que se utiliza de novas ferramentas tecnológicas para controlar, monitorar e gerenciar todo o sistema de potência, de forma eficiente, utilizando de técnicas de automação para transformar a rede de passiva para ativa, em todos os níveis de tensão (AMIN; WOLLENBERG, 2005) (FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION, 2008) (MINISTÉRIO DA CIÊNCIA TECNOLOGIA e INOVAÇÃO; JOINT RESEARCH CENTRE, 2014).

Uma das funcionalidades incorporadas ao conceito das REI é a Autorrecuperação (do inglês, *Self-Healing*). Descrita em Falcão (2010) como:

Define-se um sistema “*Self-healing*” (auto regenerável ou auto recuperável) como aquele capaz de detectar, analisar, responder e restaurar falhas na rede de energia elétrica de forma automática (e em alguns casos de forma instantânea).

Nesse contexto, pode-se observar a importância no estudo e desenvolvimento de sistemas *Self-Healing*, otimizando a operação da rede de distribuição.

1.1 Contextualização

Com o objetivo de estabelecer procedimentos relativos à Qualidade da Energia Elétrica - QEE, definir terminologia, caracterizar fenômenos, parâmetros e valores de referência relativos à conformidade de tensão em regime permanente e transitório, a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, através da Resolução Normativa nº 345/2008, elaborou os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica do Sistema Elétrico Nacional – PRODIST (ANEEL, 2015b). Neste procedimento, foram definidos indicadores de continuidade do serviço de distribuição de energia elétrica. Por meio do controle das interrupções, do cálculo e da divulgação dos indicadores de continuidade de serviço, as distribuidoras, os consumidores e a ANEEL passaram a avaliar a qualidade do serviço prestado e o desempenho do sistema elétrico.

Para o consumidor, tais índices expressam a qualidade da energia fornecida, medindo as falhas no fornecimento de energia e a demora para restabelecê-la. Pelo

lado da concessionária, há o impacto em compensações financeiras feitas aos clientes, as quais são calculadas a partir dos indicadores de continuidade coletivos DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e individuais DIC (Duração de Interrupção Individual por unidade consumidora), FIC (Frequência de Interrupção Individual por unidade consumidora) e DMIC (Duração máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora), conforme o Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST.

Além das compensações financeiras, que causam grande impacto às concessionárias, foi publicado no Diário Oficial da União - DOU - as condições de renovação dos contratos das concessões das distribuidoras de energia elétrica, por meio do Decreto 8.461/2015 (PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA - CASA CIVIL - SUBCHEFIA PARA ASSUNTOS JURÍDICOS, 2015). Este Decreto contempla a possibilidade de transferência do controle da companhia, caso a distribuidora não atinja as metas estipuladas pela ANEEL. As novas regras, que preveem renovação automática, afastam o risco da retomada das concessões pela União, no vencimento dos contratos, sendo então prorrogadas por mais 30 anos. Porém, as concessionárias que aderirem à renovação, deverão cumprir as metas anuais que serão definidas a cada 5 anos pela ANEEL.

De acordo com o texto do decreto, as metas seguirão parâmetros técnicos, econômicos e operacionais revisados que respeitarão o equilíbrio econômico-financeiro da concessão. Dentro dessas metas, a agência reguladora vai exigir maior eficiência com relação à gestão econômico-financeira do negócio e melhora dos indicadores de qualidade do serviço de distribuição, considerando os indicadores de frequência e a duração média das interrupções no fornecimento de energia.

Em resumo, as distribuidoras com contratos renovados poderão ser submetidas à intervenção da ANEEL, em caso de descumprimento das metas, ou à abertura de processo de extinção da concessão.

1.2 Descrição do Problema

Desde a elaboração do PRODIST, a ANEEL - visando à melhora da qualidade da energia elétrica distribuída - vem reduzindo, ano a ano, a meta dos indicadores de continuidade. Com isso, tais metas não estão sendo atingidas pelas concessionárias, conforme Figura 1 ¹ (ANEEL, 2015a). Observa-se que a média nacional do DEC apurado se manteve praticamente estável, em torno de 18h, frente a uma redução da média nacional anual do valor da meta, estipulada pela ANEEL, que no ano de 2014

¹ As barras representam o DEC realizado, enquanto os pontos representam a meta estabelecida pela ANEEL.

esteve em 14,58h, contra um DEC apurado de 17,62h.

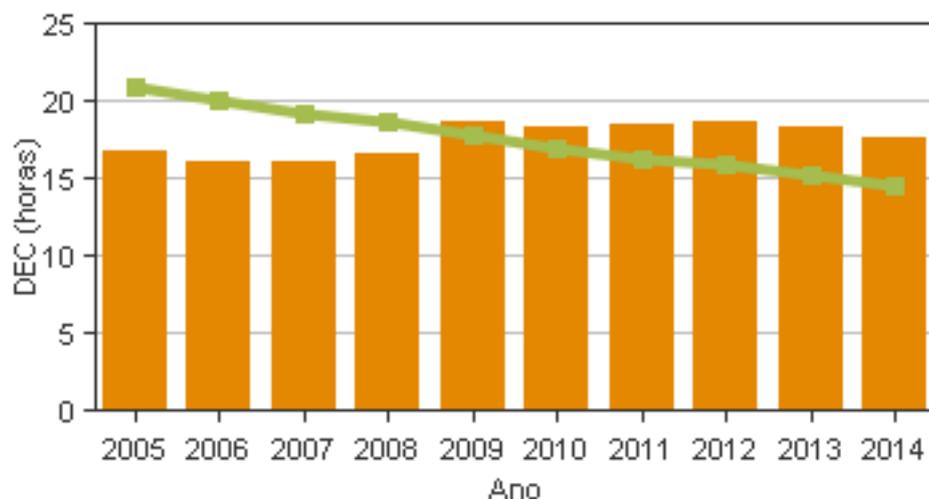


Figura 1 – DEC Anual - Concessionárias - Brasil (ANEEL, 2014).

A situação do indicador de Frequência de Interrupção, FEC, é mais adequada. Conforme pode ser observado na Figura 2² (ANEEL, 2015a), o indicador praticado se manteve abaixo da meta estipulada pela ANEEL, inclusive com redução no apurado nos últimos 3 anos. Porém, a diferença entre o valor apurado e a meta estabelecida pela ANEEL vem caindo a cada ano, não podendo ser desconsiderada.

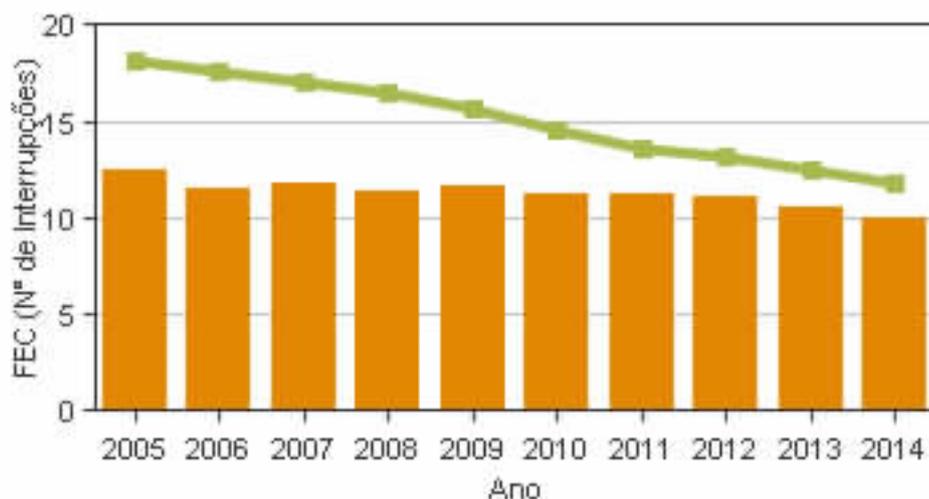


Figura 2 – FEC Anual - Concessionárias - Brasil (ANEEL, 2014).

Apenas no ano de 2013, consumidores de energia elétrica receberam R\$ 346 milhões em compensação por interrupções no fornecimento de energia elétrica (ANEEL, 2014).

² As barras representam o FEC realizado, enquanto os pontos representam a meta estabelecida pela ANEEL.

A fim de melhorar os indicadores de continuidade, as concessionárias de energia elétrica passaram a investir em automação de redes, aumentando consideravelmente o número de equipamentos telecomandados. Com o aumento do número de equipamentos telecomandados, as possibilidades de recuperação imediata de blocos de cargas atingidos por desligamentos aumentam consideravelmente, tornando-se factível atingir as metas estabelecidas pelos órgãos reguladores. Contudo, é necessário que a restauração seja realizada no menor tempo possível, exigindo ação rápida dos técnicos das salas de controle dos Centros de Operação da Distribuição - COD. Restabelecimentos efetuados em menos de 3 minutos não são computados nos índices DEC e FEC, tornando este tempo o limite desejável para a restauração do sistema. Assim, para efetuar a restauração, o técnico responsável deve analisar as configurações das Linhas de Distribuição - LD - identificando equipamentos telecomandados que possam isolar o trecho defeituoso e restabelecer energia aos trechos da LD que não possuam falha, considerando a possibilidade de transferência de cargas para outros alimentadores, respeitando os limites estabelecidos de tensão e de corrente nos cabos e dispositivos de proteção. Tal ação demanda tempo e conhecimento por parte do técnico de supervisão do sistema, podendo levar a tempos superiores ao desejado, implicando em pagamentos de valores elevados de compensações financeiras aos clientes.

1.3 Objetivos

Nesta seção são apresentados o objetivo geral, para que se possa ver a temática ao qual o trabalho proposto está relacionado, e os objetivos específicos, que detalham de forma sucinta o que o trabalho apresenta.

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral é reduzir o tempo de restauração do sistema elétrico, reduzindo o impacto de falhas de fornecimento de energia elétrica, através da utilização de técnicas de *Self-Healing*, privilegiando a visão cotidiana do operador dos centros de operação da distribuição.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver uma metodologia que possa realizar a restauração automática de linhas de distribuição, considerando falhas em múltiplos alimentadores interconectados;

- Testar e validar a metodologia desenvolvida com dados de sistemas reais de uma concessionária de energia elétrica;
- Implementar uma ferramenta de restauração com foco no operador do centro de operação da distribuição.

1.4 Justificativa

Para diminuir o impacto nos indicadores de continuidade e auxiliar na rotina dos técnicos das salas de controle dos COD, torna-se necessária a implantação de um sistema de restauração automática, ou autorrecuperação, proporcionando melhorias significativas para consumidores, com a redução dos tempos de interrupção de energia, e para as concessionárias, com a diminuição dos indicadores de continuidade, passando as redes de passiva para ativa, melhorando a qualidade de energia distribuída e a confiabilidade da distribuição.

1.5 Estrutura da Dissertação

O presente trabalho está dividido em seis capítulos, apresentados da seguinte forma: No primeiro capítulo em questão, uma breve introdução ao tema da dissertação é efetuada para contextualização, motivação e justificativas. No segundo capítulo, são apresentados os conceitos teóricos dos assuntos mais pertinentes deste trabalho. No próximo capítulo, é realizada a revisão de literatura de restauração de redes e de *self-healing*. No quarto capítulo é apresentada a elaboração da metodologia proposta e a estrutura geral do sistema computacional desenvolvido. Os resultados computacionais obtidos e as discussões pertinentes são apresentados no quinto capítulo. Finalmente, no sexto capítulo, são apresentadas as conclusões concernentes à aplicação do algoritmo proposto e as sugestões de possíveis trabalhos futuros.

2 Fundamentação Teórica

O presente capítulo apresenta os conceitos teóricos dos assuntos mais pertinentes deste trabalho, sejam eles, Sistema Elétrico de Distribuição, Normas e Indicadores, Reconfiguração e Restauração, *Self-Healing* e *Iterated Local Search*.

2.1 Sistema Elétrico de Potência

Os Sistemas Elétricos de Potência - SEP - podem ser definidos como um conjunto de equipamentos e elementos de circuitos elétricos conectados, atuando de modo coordenado, de forma a gerar, transmitir e distribuir energia elétrica aos consumidores. A operação do SEP tem como principal objetivo o suprimento de energia elétrica aos seus usuários, utilizando-se de recursos que buscam otimizar a continuidade e a qualidade da energia distribuída.

O SEP pode ser dividido em 3 grandes blocos (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010):

- Geração: Perfaz a função de converter alguma forma de energia (hidráulica, térmica, etc) em energia elétrica;
- Transmissão: Responsável pelo transporte de energia elétrica dos centros de produção aos centros de consumo, ou até outros sistemas elétricos, interligando-os;
- Distribuição: Distribui a energia elétrica recebida do sistema de transmissão aos grandes, médios e pequenos consumidores.

Um diagrama unifilar típico de um SEP é mostrado na Figura 3.

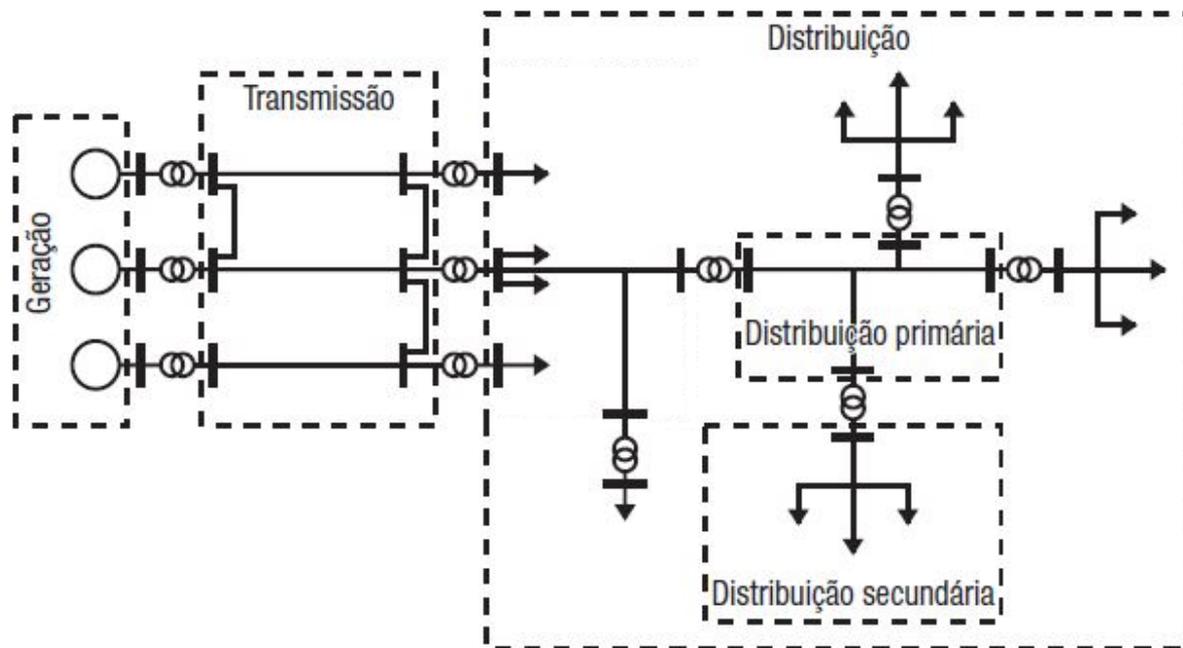


Figura 3 – Exemplo de um SEP (adaptada de Kagan et al.(2010)).

No Brasil, os níveis de tensão utilizados no SEP estão fixados por decreto do Ministério de Minas e Energia e são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Tensões usuais em sistemas de potência

| Tensão (kV) | | Campo de aplicação | Área do sistema |
|---------------|---------------|------------------------------|-----------------|
| Padronizada | Existente | | |
| 0,220 / 0,127 | 0,110 | Distribuição secundária (BT) | Distribuição |
| 0,380 / 0,220 | 0,230 / 0,115 | | |
| 13,8 | 11,9 | Distribuição primária (MT) | Distribuição |
| 34,5 | 22,5 | | |
| 34,5 | | | |
| 69 | 88 | Subtransmissão (AT) | Distribuição |
| 138 | | | |
| 138 | | | |
| 230 | 440 / 750 | Transmissão (AT) | Transmissão |
| 345 | | | |
| 500 | | | |

Fonte: Kagan et al., 2010.

2.1.1 Sistema de Distribuição

O Sistema de Distribuição - SD - é composto por subestações abaixadoras e linhas de distribuição que levam a energia até os consumidores. O SD pode ser dividido, conforme Figura 3, em Distribuição Primária e Distribuição Secundária.

Um SD primária, ou de Média Tensão - MT -, é normalmente projetado para operar de forma radial, com possibilidade de transferência de blocos de carga entre circuitos para a operação em condições de contingência, quer seja esta programada ou emergencial. É composto, basicamente, por barras de carga, linhas de distribuição e equipamentos de manobra e proteção. A Figura 4 apresenta um SD composto por 2 subestações. Uma subestação - SE - pode possuir vários alimentadores (linhas de distribuição). Chaves Normalmente Aberta - NA - e Normalmente Fechada - NF - existem no sistema para permitir a transferência de trechos de um alimentador para outro adjacente sendo, portanto, uma alternativa para o balanceamento de carga ou para viabilizar uma contramedida na ocorrência de uma falta com desligamentos (BARBOSA, 2012).

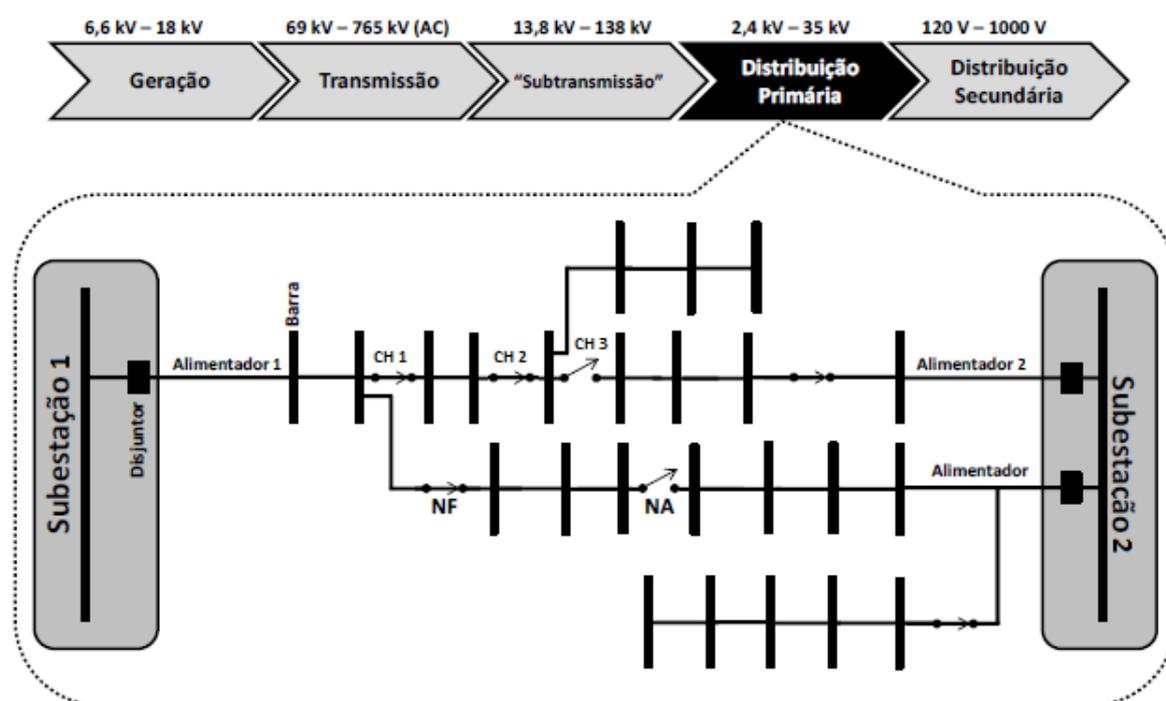


Figura 4 – Exemplo de um sistema de distribuição primária (adaptada de Barbosa (2012)).

Supondo-se a ocorrência de um defeito entre as chaves CH 1 e CH 2, Figura 4, haverá a atuação da proteção do alimentador 1 da SE 1, interrompendo-se a energia em todas as barras desta Linha de Distribuição - LD. Através da abertura das chaves CH 1 e CH 2, é possível isolar o trecho com defeito. Em seguida, restabelecer-se-á os trechos que não possuem defeito, através do fechamento do disjuntor do alimentador 1 da SE 1 e da chave CH 3, passando este último trecho a ser atendido pelo alimentador

2 da SE 2. No entanto, para que essa solução seja realmente factível, é necessário que algumas restrições operativas sejam atendidas, como, por exemplo: (i) não violar os limites de corrente nos cabos e equipamentos; (ii) atender a faixa de tensão admissível; e (iii) manter a radialidade do sistema.

Finalmente, as redes de distribuição secundária, operam em Baixa Tensão - BT -, com tensão de 220/127V ou 380/220V, e suprem consumidores de BT, como residências, comércios e pequenas indústrias. Este seguimento do SD não conta com recursos para atendimento de contingências devido ao montante de potência entregue.

Neste trabalho é tratado o problema de restauração em sistemas de distribuição primária.

2.2 Normas e Indicadores

O funcionamento do setor de energia, enquanto serviço público exercido sob concessão, autorização ou permissão do Governo Federal, é altamente regulamentado, com o objetivo fundamental de assegurar o suprimento de energia por uma tarifa justa no curto, médio e longo prazo. A ANEEL, vinculada ao Ministério de Minas e Energia, tem como finalidade regular e fiscalizar a produção, transmissão e comercialização de energia elétrica, em conformidade com as Políticas e Diretrizes do Governo Federal. Dentre outras atividades, a ANEEL deve gerir e fiscalizar as concessões; fixar critérios para cálculo de tarifas; estabelecer tarifas e controlar reajustes de preços e controlar os atos jurídicos celebrados entre concessionárias (ANEEL, 2016).

Visando à normatização e padronização das atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica, a ANEEL elaborou, a partir da Resolução Normativa N° 345 de 2008 - revogada pela Resolução Normativa N° 395 de 2009, os Procedimentos de Distribuição - PRODIST, sendo dividido em 9 módulos (ANEEL, 2016).

O Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, tem como objetivo estabelecer os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica - QEE, abordando a qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado (ANEEL, 2015b).

- Para a qualidade do produto, este módulo define a terminologia, caracteriza os fenômenos, parâmetros e valores de referência relativos à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão, estabelecendo mecanismos que possibilitem à ANEEL fixar padrões para os indicadores de QEE.
- Para a qualidade dos serviços prestados, este módulo estabelece a metodologia

para apuração dos indicadores de continuidade e dos tempos de atendimento a ocorrências emergenciais, definindo padrões e responsabilidades.

Ponto importante em relação à qualidade do produto, no contexto deste trabalho, são os limites de tensões estabelecidos nestes procedimentos. A Tabela 2 apresenta a faixa de classificação destas tensões, para conexão em tensão nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV.

Tabela 2 – Faixas de classificação de tensões – Regime permanente

| Tensão de Atendimento | Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR) |
|------------------------------|---|
| Adequada | $0,93TR \leq TL \leq 1,05TR$ |
| Precária | $0,90TR \leq TL < 0,93TR$ |
| Crítica | $TL < 0,90TR$ ou $TL > 1,05TR$ |

Fonte: Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica (ANEEL, 2015).

Em relação à qualidade dos serviços prestados, são listados a seguir os indicadores de tempo de atendimento às ocorrências emergenciais:

- TMP - Tempo Médio de Preparação;
- TMD - Tempo Médio de Deslocamento;
- TME - Tempo Médio de Execução;
- TMAE - Tempo Médio de Atendimento a Emergências;

e os indicadores de continuidade do serviço de distribuição de energia elétrica:

- DIC - Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão;
- FIC - Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão;
- DMIC - Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão;
- DICRI - Duração da Interrupção Individual ocorrida em Dia Crítico por unidade consumidora ou ponto de conexão;
- DEC - Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora;
- FEC - Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora.

Conforme visto anteriormente, os indicadores de continuidade de serviço permitem à ANEEL avaliar a qualidade do serviço prestado pelas companhias de energia. Em caso de descumprimento das metas anuais estabelecidas para os indicadores coletivos DEC e FEC, ilustradas nas Figuras 1 e 2, serão aplicadas multas às concessionárias de energia que não atingirem tais metas. Para o cálculo desses indicadores devem ser consideradas apenas as interrupções de longa duração, ou seja, tempos de interrupção maiores ou iguais a 3 minutos. No caso de violação do limite de continuidade individual - indicadores DIC, FIC, DMIC e DICRI-, a distribuidora deverá efetuar compensação ao consumidor acessante do sistema de distribuição através de crédito na fatura, em até dois meses após o período de apuração¹ (para os indicadores DIC, FIC e DMIC) ou mês de ocorrência da interrupção (para o indicador DICRI).

2.3 Reconfiguração e Restauração

A operação de chaves NA e NF permite modificar o fluxo de potência nos SD, através da alteração de sua configuração, possibilitando-se assim a transferência de cargas entre alimentadores adjacentes. A alteração da configuração das redes de distribuição em regime normal de operação usualmente tem como principal objetivo a redução de perdas (BARBOSA, 2012), sendo conhecida na literatura como reconfiguração. A reconfiguração pode ser entendida como o procedimento de manobras na rede com o objetivo de se alterar as configurações de um SD que opera em condições normais, porém não ótimas, de acordo com critérios preestabelecidos. Neste contexto, a reconfiguração é realizada de forma programada, normalmente sem interrupções aos consumidores. O procedimento de reconfiguração de redes tem maior aplicação nas etapas de projeto e planejamento da operação e de expansão dos sistemas de distribuição, visando a efetuar ajustes operacionais ou adequar melhor o sistema a situações de contingência.

Já o procedimento de execução emergencial de manobras de chaveamento, necessárias quando o sistema é afetado por alguma falta que gera desligamento total ou parcial de cargas, é referenciado na literatura como restauração de redes e deve atender aos seguintes requisitos (SUDHAKAR, 2012):

- Restaurar a maior quantidade de cargas possível, considerando simultaneamente clientes prioritários;
- Não violar restrições operacionais;

¹ O período de apuração das interrupções constitui o espaço de observação da ocorrência das interrupções, e corresponde aos períodos de definição civil mensal, trimestral ou anual.

- Delinear uma sequência possível de operações para alcançar a configuração final;
- Garantir o balanceamento de cargas;
- Ser executada em um curto espaço de tempo;
- Manter a estrutura de rede radial (este requisito tem como objetivo facilitar a localização de falhas, isolamento e coordenação dos dispositivos de proteção);

Tanto a restauração quanto a reconfiguração são procedimentos utilizados com o objetivo de tornar o SD mais resiliente às situações de contingência, resultando, desta forma, em maior confiabilidade no fornecimento de energia aos consumidores.

Neste trabalho será tratado o problema de restauração do SD.

2.4 *Self-Healing*

2.4.1 Automação

A contínua expansão do SD levou à necessidade de se automatizar equipamentos com o objetivo de se reduzir o tempo de restabelecimento de energia aos consumidores e também a mão de obra de equipes de campo, evitando-se, por exemplo, longos deslocamentos destas equipes para manobrar os diversos equipamentos do SD. Os religadores das SE's foram os primeiros equipamentos da LD a serem automatizados. Com essa ação, os operadores das salas de controle passaram a receber informações de bloqueio destes equipamentos no exato momento da ocorrência, inclusive podendo acompanhar o Religamento Automático - RA², através de sistemas de supervisão e controle conhecidos como SCADA (do inglês, *Supervisory Control and Data Acquisition*). Além da informação do estado do equipamento (aberto ou fechado), estes sistemas permitiram o telecomando (ou telecontrole) - TLC, sendo possível enviar, remotamente, comandos de abertura e fechamento, bem como comandos para bloqueio, normalização e alteração de ajustes de proteções de fase e de terra. Diante do ganho considerável com a automatização dos religadores de SE, as concessionárias de energia passaram a automatizar alguns equipamentos de linha (equipamentos instalados ao longo das LD's), a exemplo dos religadores e chaves de manobra, como as chaves SF6. Atualmente, diversos equipamentos têm sido automatizados, como seccionadores e reguladores de tensão.

² Religamento efetuado, automaticamente, após a abertura por atuação da proteção (fase ou terra). Os religadores podem ser parametrizados para um determinado número de RA's. Comumente este número é de 3 RA's, não excedendo 4.

2.4.2 *Smart Grids*

O processo de automação das LD's flexibilizou a operação do SD, permitindo aos operadores dos COD's a supervisão e o controle de equipamentos em tempo real. Contudo, esse foi apenas um primeiro passo da evolução dos SD. Atualmente, um tema amplamente discutido em todo o mundo propõe um modelo tecnológico com relativa complexidade conceitual, com aplicação de tecnologia digital avançada para monitorar e gerenciar o transporte de eletricidade em tempo real com fluxo de energia e de informações bidirecionais entre sistema de fornecimento de energia e o cliente final (Centro de Gestão e Estudos Estratégicos - Ministério da Ciência Tecnologia e Inovação, 2012), as chamadas Redes Elétricas Inteligentes. O conceito de REI foi introduzido por Amin Massoud, após ocorrências de apagões ocorridos nos Estados Unidos no final da década de 90, devido ao excesso de cargas ligadas ao SEP (AMIN, 2001). O conceito de REI é bastante abrangente, não havendo uma definição única adotada na literatura. Apesar disto, o termo REI possui uma série de valores e características que são universais. Entre esses valores estão um sistema mais confiável, seguro, econômico, eficiente e ambientalmente correto (Centro de Gestão e Estudos Estratégicos - Ministério da Ciência Tecnologia e Inovação, 2012). Essencialmente, o conceito de REI está relacionado à abordagem da rede de energia elétrica dotada de tecnologias digitais e recursos computacionais e de comunicação avançados, com o intuito de monitoramento e gerenciamento da eletricidade ao longo da estrutura de transporte e distribuição aos consumidores finais (IEA, 2011). As REI podem ser divididas em sete principais domínios interligados entre si: geração, transmissão, distribuição, consumidor, mercados, operadores de rede e provedores de serviço (NIST, 2010), esse modelo conceitual é mostrado na Figura 5.

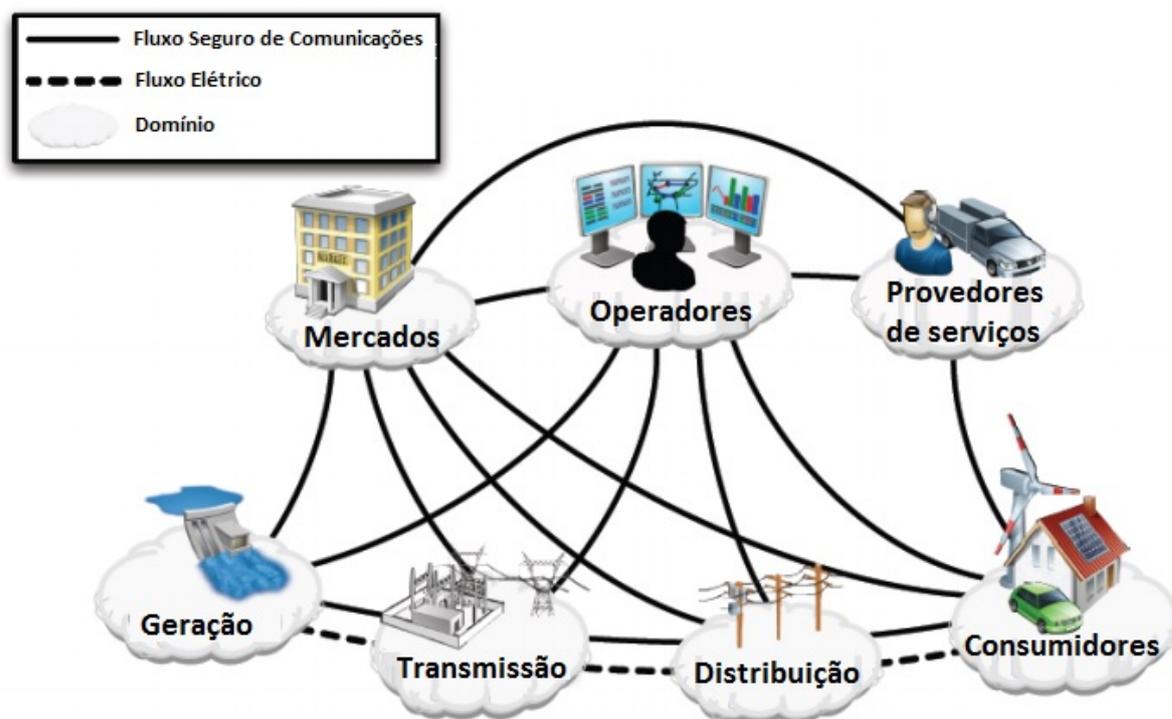


Figura 5 – Modelo conceitual de REI (adaptada de NIST (2010)).

Algumas funções geralmente atribuídas à REI são (IEA, 2011):

- Autorrecuperação: capacidade de detectar, analisar, processar e restaurar falhas na rede elétrica;
- Integração ativa de consumidores: habilidade para incluir equipamentos e comportamento dos consumidores nos processos de planejamento e operação da rede elétrica;
- Suportabilidade a ataques externos: capacidade de resistir a ataques físicos e cyber-ataques;
- Qualidade da energia: prover energia de boa qualidade, no nível exigido pela sociedade digital;
- Capacidade para acomodar uma grande variedade de fontes e demandas: integrar as diferentes fontes de energia de várias dimensões e tecnologias;
- Impacto ambiental: mitigar o impacto causado pelo sistema produtor de eletricidade, reduzindo perdas e utilizando fontes renováveis e de baixo impacto ambiental;
- Resposta em demanda: atuação remota em dispositivos dos consumidores;

2.4.3 *Self-Healing*

Dentre as diversas funções atribuídas ao conceito de uma REI, está a capacidade de se autodiagnosticar, ou se autocurar (do inglês, *Self-Healing*). Mesmo sendo apenas uma das várias funções de uma REI, o conceito de *self-healing* é amplo, podendo contemplar diversos objetivos em todo o SEP. A seguir são listados alguns destes objetivos, voltados para o SD.

- Autorrestauração;
- Supervisão e controle do nível de tensão;
- Redução de perdas elétricas;
- Balanceamento de cargas;
- Controle da coordenação da proteção;
- Detecção de falhas de comunicação;
- Supervisão e controle do nível de corrente nos cabos e dispositivos;
- Melhoramento dos níveis de confiabilidade dos serviços ofertados;
- Operação resiliente em situação de ataque ou de desastres naturais;
- Antecipação e resposta a perturbações no sistema de forma automática.

Os objetivos listados acima são interdependentes e, dependendo do contexto, pode ser necessário o relaxamento ou o não atendimento a algum objetivo em detrimento do objetivo desejado. Como exemplo, temos a restauração de uma LD em processo de contingência. Por vezes, pode ser necessário trabalhar no limite permissível de sobrecarga dos dispositivos e/ou cabos da LD que irá suprir as cargas desligadas. Contudo, vale ressaltar que situações como esta são de caráter temporário, permanecendo apenas por tempo suficiente para a execução de procedimentos corretivos.

A implantação da funcionalidade *self-healing* é extremamente dependente da automação de equipamentos, uma vez que um sistema *self-healing* é um sistema capaz de detectar, analisar, responder e restaurar falhas na rede de energia elétrica de forma automática (FALCÃO, 2010). Se por um lado o aumento significativo de equipamentos TLC torna mais complexo o problema de recuperação realizado por operadores do COD, que devem efetuar uma série de verificações, como análise das possibilidades de transferência de cargas, ajustes de proteção, mudanças de TAPs de Reguladores de Tensão, entre outras, a implantação de sistemas *self-healing* se mostra como uma alternativa necessária à operação do SD. Com a implantação de sistemas *self-healing*,

tornam-se mais factíveis as recuperações de cargas dentro do tempo desejável de 3 minutos, uma vez que interrupções inferiores a esse tempo podem ser expurgadas, não sendo contabilizadas para efeitos de cálculo dos indicadores de continuidade. Contudo, a implantação de sistemas com a funcionalidade *self-healing* exige, além de equipamentos TLC, meios de comunicação eficientes e um sistema SCADA com capacidade de execução de códigos e memória de massa, com drivers de entrada e de saída para supervisão e controle dos dispositivos TLC. Esses sistemas possuem custo elevado, sendo que algumas concessionárias ainda não investiram em sua compra, utilizando ainda sistemas SCADA ultrapassados, adquiridos no início do processo de automação dos sistemas de transmissão. Tais sistemas permitem apenas comandos restritos, conforme mencionado na seção 2.4.1. Nesse sentido, justifica-se a implementação de uma ferramenta de restauração capaz de auxiliar técnicos do COD na tomada de decisão em ocorrências no SD, indo além da proposta de desenvolvimento de um algoritmo de restauração automática para implementação em sistemas SCADA mais atuais.

2.5 *Iterated Local Search*

O problema de restauração do SD, ainda que intensamente pesquisado ao longo dos anos, continua sendo uma linha de pesquisa ativa, motivada pela dificuldade de se propor métodos que sejam eficientes quando aplicados a sistemas reais de distribuição de grande porte, atendendo a restrições do problema e com tempo computacional adequado para a tomada de decisão em tempo real (NETO, 2011). Dentre as diversas abordagens propostas para tratar o problema de restauração, o estado da arte dos métodos usados incluem técnicas heurísticas, métodos de enumeração implícita e meta-heurísticas/inteligência computacional.

A restauração do SD é um problema de otimização de natureza combinatória, o que, dependendo da técnica de otimização utilizada, pode levar a tempos elevados para obtenção da solução ótima. Por outro lado, a ferramenta proposta precisa ser rápida o bastante, a fim de fornecer soluções factíveis em tempo reduzido, permitindo que seja efetuada a recuperação dos blocos de cargas no tempo desejável, inferior a três minutos. Nesse sentido, as técnicas heurísticas, por geralmente possuírem baixa complexidade de execução, se apresentam como boa alternativa para resolver esse tipo de problema, ocupando pouco espaço de memória e encontrando soluções razoáveis em grandes ou infinitos espaços de estados. Entretanto, estas técnicas são comumente mono-objetivas, e o objetivo é sempre minimizado de forma heurística, o que, quase sempre, leva a ótimos locais.

A busca local (do inglês, *Local Search*) é uma técnica heurística utilizada em

problemas de otimização. Um algoritmo de busca local define, para cada solução, uma região composta por um conjunto de soluções com características similares. A partir de uma solução factível do problema, uma das formas de se implementar um algoritmo de busca local é percorrer a vizinhança desta solução em busca de uma solução melhor (menor valor da função objetivo, para um problema de minimização). Quando tal solução é encontrada, esta passa a ser a solução corrente e o algoritmo continua. O processo se repete até que nenhuma outra solução melhor seja encontrada e o algoritmo pare em um ótimo local. Uma desvantagem é que o algoritmo pode ficar preso em um ótimo local que seja significativamente pior que o ótimo global. Uma alternativa para se melhorar o desempenho seria aumentar o tamanho da vizinhança, assim haveria uma maior chance de se encontrar uma solução melhorada. Porém, com um caminho maior a ser percorrido, o tempo de processamento seria demasiadamente aumentado, perdendo-se a eficácia do método. Outra alternativa seria reiniciar o algoritmo, a partir de uma nova solução gerada aleatoriamente. Esse método é referenciado na literatura como busca com recomeços (do inglês, *Random Restart*). Contudo, estudos empíricos e argumentos gerais indicam que os algoritmos de busca local em grandes instâncias genéricas levam a custos que: (i) as soluções têm custo médio acima do ótimo (por um percentual fixo) e (ii) a distribuição dos custos das soluções tem um pico em torno da média que fica mais pronunciado à medida em que o problema cresce (LOURENÇO; MARTIN; STÜTZLE, 2003).

A Busca Local Iterada (do inglês, *Iterated Local Search* - ILS) é um método de otimização meta-heurístico que gera uma sequência de soluções obtidas por uma heurística de busca local, sendo aplicado, de forma mais geral, com o objetivo de encontrar ótimos globais em métodos de otimização local. É mais eficiente que a busca com recomeços (na qual escolhemos aleatoriamente vários pontos que pertencem ao espaço de soluções e aplicamos o algoritmo de busca local).

Supondo-se que uma solução ótima local seja encontrada por um algoritmo de busca local, o ILS, ao invés de reiniciar cada pesquisa local a partir de uma solução gerada aleatoriamente, aplica a busca local várias vezes para soluções iniciais obtidas por perturbações de uma solução localmente ótima visitada anteriormente (STÜTZLE, 1998). Na forma padrão de aplicação do ILS, estas perturbações são normalmente feitas a partir da melhor solução localmente ótima encontrada. Uma grande vantagem dos algoritmos ILS é que: (i) são conceitualmente simples; (ii) são fáceis de implementar; e (iii) são muito eficazes quando aplicados a diversos problemas de natureza combinatória.

Resumidamente, o ILS deve conter:

- Um método de busca local que inicie em s_0 e atinja s^* .
- Um método que saia de s^* e atinja outro mínimo local s'^* e que usa:
 - uma estratégia de perturbação para gerar s' a partir de s^* ;
 - O algoritmo de busca local para obter s'^* a partir de s' ;
 - Um teste para decidir se s'^* deve ou não ser aceito.

A Figura 6 ilustra esse processo.

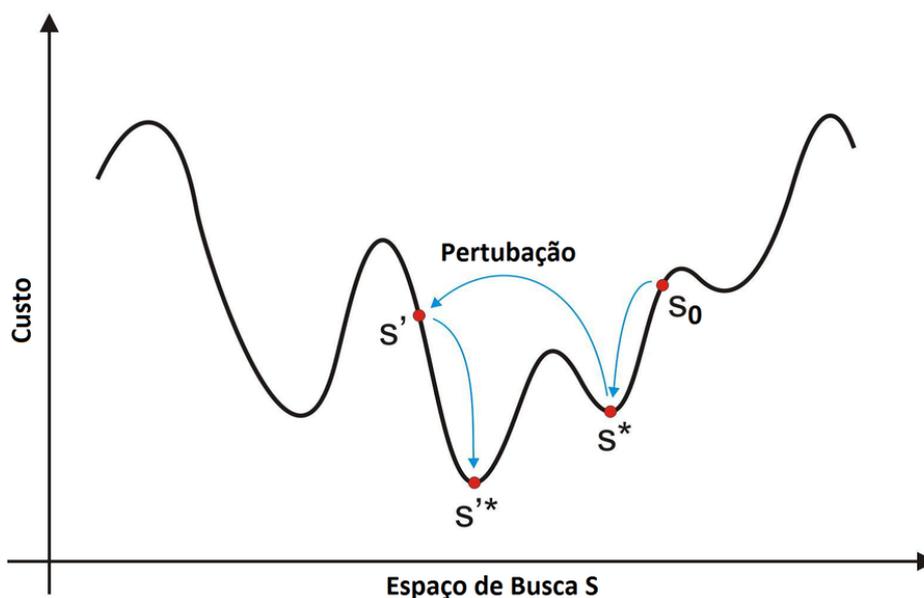


Figura 6 – Ilustração da representação do ILS (adaptada de Lourenço et al (2003))

O algoritmo ILS possui a seguinte arquitetura de alto nível:

Procedimento *Iterated Local Search*

$s_0 \leftarrow \text{Gera_Solução_Inicial};$

$s^* \leftarrow \text{Busca_Local}(s_0);$

Enquanto (não é atendido um critério de parada),

$s' \leftarrow \text{Perturbação}(s^*, \text{histórico});$

$s'^* \leftarrow \text{Busca_Local}(s');$

$s^* \leftarrow \text{Critério_de_Aceitação}(s^*, s'^*, \text{histórico});$

Fim-Enquanto;

End

Algumas questões devem ser abordadas ao implementar o ILS, a fim de alcançar uma alta performance do algoritmo: (i) Solução Inicial; (ii) Busca Local; (iii) Perturbação; e, (iv) Critério de Aceitação.

Solução Inicial: pode ser gerada aleatoriamente ou pode-se usar um algoritmo guloso ou heurística de construção. Melhores respostas são obtidas quando se tem uma boa solução inicial. Porém, a solução inicial perde importância quando o número de iterações é muito grande.

Busca local: pode ser usada qualquer heurística já existente para o problema a ser tratado. A única exigência é que o método utilizado seja capaz de melhorar a solução inicial. Podem ser utilizadas técnicas heurísticas ou meta-heurísticas, inclusive. Alguns dos algoritmos comumente utilizados são: Subida de Encosta (do inglês, *Hill Climbing*), VND (do inglês, *Variable Neighborhood Descent*), Têmpera Simulada (do inglês, *Simulated Annealing*), Feixe Local (do inglês, *Local Beam*), Busca Tabu (do inglês, *Tabu Search*) e Algoritmos Genéticos (do inglês, *Genetic Algorithm*). De maneira geral, quanto mais eficiente o algoritmo de busca, melhor. Entretanto, há casos em que um algoritmo barato e simples é preferível, em detrimento à estratégia de perturbação utilizada.

Perturbação: não pode ser muito grande, a ponto de fazer com que o ILS se torne uma busca local com recomeços; nem muito pequena, a ponto de fazer com que o espaço de busca não seja eficientemente explorado. Deve ser suficientemente robusta, para que a busca local não seja capaz de revertê-la. Tipicamente, encontrar a perturbação apropriada pode ser simples; para muitas aplicações a escolha de uma perturbação aleatória a partir de um ótimo local pode ser uma boa suposição inicial. Além disso, o algoritmo ILS possui poucos parâmetros e, portanto, estes são muito mais fáceis de ajustar para uma aplicação específica do que em muitos outros métodos. Contudo, existem alternativas mais complexas para a implementação da perturbação. Pode-se variar a perturbação ao longo das iterações, como no VNS, ou ainda, alterar dados do problema e aplicar o algoritmo de busca local para obter s' . A maioria das aplicações do ILS concentram-se em aspectos da escolha do algoritmo de busca local e da escolha da perturbação. Embora o ILS seja utilizado para melhorar o desempenho de um determinado algoritmo de busca local, é evidente que sua eficiência depende fortemente da escolha particular da busca local e da perturbação implementadas (LOURENÇO; MARTIN; STÜTZLE, 2003).

Critério de aceitação: determina se s^{**} é aceito ou não como a nova solução atual. O critério de aceitação tem uma forte influência sobre a natureza e eficácia do caminho percorrido no espaço de busca, S^* . Pode ser utilizado para controlar o equilíbrio entre a intensificação e a diversificação da busca. Tipicamente, exige-se que a solução melhore. Assim, s^{**} somente será aceito se $f(s^{**}) < f(s^*)$. No entanto, também

é possível: (i) aceitar uma solução s'^* pior que s^* , com uma certa probabilidade baixa ou (ii) usar uma regra de aceitação semelhante à utilizada na *Simulated Annealing*, definindo a probabilidade de aceitação em função da temperatura. Muitas vezes, essas estratégias de diversificação são aplicadas apenas quando a regra usual não é eficiente por muitas iterações. Quando o problema a ser otimizado é grande ou complexo, ou ainda, quando a busca local não permite uma diversificação adequada, o ILS pode estagnar. Nestes casos, pode-se adotar a estratégia de recomeços, sendo gerada uma solução aleatória sempre que a solução corrente permanecer inalterada por um certo número fixo de iterações.

Por ser uma meta-heurística simples, fácil de implementar, robusta, altamente eficaz, e principalmente, de resposta rápida, o algoritmo ILS apresenta-se como boa alternativa para aplicação em problemas de restauração automática de redes reais de grande porte.

3 Revisão de Literatura

O problema de restauração de redes de distribuição de energia elétrica tem sido amplamente estudado ao longo dos últimos anos. Com o advento das *Smart Grids*, a possibilidade de efetuar a restauração de forma automática se tornou factível, bem como necessária, a fim de auxiliar operadores dos centros de controle da distribuição. Assim, neste capítulo será efetuada uma breve revisão de literatura, abordando os principais temas que envolvem o problema de autorrecuperação - uma das funcionalidades do *Self-Healing*.

3.1 Restauração de Redes

O estado da arte dos métodos usados para tratar a restauração de sistemas de distribuição incluem técnicas heurísticas, métodos de enumeração implícita e meta-heurísticas/inteligência computacional.

Os métodos heurísticos são aqueles construídos com base nas características específicas do problema em questão. Estes são comumente mono-objetivo, e o objetivo é sempre minimizado de forma heurística, o que, quase sempre, leva a ótimos locais. No entanto estes métodos também se caracterizam por geralmente apresentar baixa complexidade de execução. Exemplos de abordagens que utilizam tais métodos podem ser encontrados em Boardman e Meckiff (1985), Civanlar et al. (1988) Dimitrijevic e Rajakovic (2011), Garcia e França (2008), Huang, Chen e Lin (2005), Ke (2004), Mantovani, Casari e Romero (2000), Morelato e Monticelli (1989), Miu et al. (1998), Singh et al. (2009).

Uma metodologia heurística relativamente simples, conhecida como “*branch-and-bound*”, foi proposta por Boardman e Meckiff (1985), dando início às pesquisas no ramo de otimização de SD. A técnica, proposta inicialmente para o planejamento do SD, foi intensamente pesquisada na década de 80, apresentando como motivadores seu fácil entendimento e programação, e a boa qualidade dos resultados fornecidos. Contudo, por ser essencialmente combinatorial, essa metodologia tem limitações para aplicação em sistemas reais de grande porte, devido ao seu elevado tempo de execução.

Um algoritmo com a capacidade de estimar, com esforço computacional reduzido, a variação nas perdas resultantes dos processos de reconfiguração e restauração foi proposto por Civanlar et al. (1988). Na metodologia proposta, conhecida como “*branch exchange*”, dois alimentadores são colocados em anel, desfazendo-se a radialidade

do sistema. Em seguida, uma outra chave é aberta, restabelecendo-se a configuração radial. Através de heurísticas e fórmulas aproximadas, verifica-se que a redução de perdas pode ser obtida apenas se existe uma diferença de tensão significativa através das chaves de interconexão e se as cargas são transferidas para outro alimentador, desenvolvendo assim um critério para eliminar operações de chaveamento indesejáveis e reduzir o número configurações candidatas.

Morelato e Monticelli (1989) propuseram uma metodologia de busca direcionada para tratar a restauração. Através de um processo de busca heurística em árvore de decisão binária, percorre-se o espaço de possibilidades do estado operacional do sistema. O conhecimento das características do problema e da topologia da rede são utilizados para reduzir a dimensão da árvore de decisão, evitando uma explosão combinatorial e mantendo o problema dentro de um espaço de busca de dimensão gerenciável. Também utilizando o conceito de árvore de decisão binária, um algoritmo heurístico para tratar o problema de reconfiguração do SD foi proposto por Mantovani, Casari e Romero (2000). A metodologia proposta apresenta como resultado final uma configuração ou um conjunto de configurações que permitem a operação da rede com perdas mínimas nos alimentadores. O limite de queda de tensão é utilizado como mecanismo de filtragem para eliminar as configurações menos promissoras, efetuando-se a poda na árvore de configurações, de modo a reduzir o número de configurações candidatas.

Miu et al. (1998) projetaram um método rápido para a restauração em larga escala com clientes prioritários. Os autores implementaram um método de pesquisa baseada em *ranking* que garante que os clientes prioritários sejam restaurados sempre que for possível. Os objetivos de restauração rápida de carga e número mínimo de operações de chaves foram combinados em um único objetivo, que é tratado através de técnicas heurísticas. Resultados em um sistema de 416 barras mostraram que o método pode encontrar soluções razoáveis em tempo reduzido.

Ke (2004) introduziu um modelo de inferência *G-Nets* para promover o equilíbrio de carga e restaurar os sistemas de distribuição após falha única. Inicialmente, o estado pré-falha do sistema é lido, sendo em seguida usado para prever a carga para as próximas horas. O método proposto tenta restaurar o sistema com duas sequências de manobras (uma manobra de isolamento e uma manobra de reconexão) e, se a solução obtida não é factível no que diz respeito à carga, o mecanismo de inferência *G-Nets* é ativado para corrigir a solução, executando a transferência e o equilíbrio de carga. Na prática, os *G-Nets* são usados para generalizar o conjunto de regras comumente utilizados por empresas de energia para tomar decisões durante processo de restauração. Bons resultados para um grande sistema de uma empresa de distribuição de Taiwan (Taipower) foram apresentados. O tempo requerido pelo método,

para a obtenção dos resultados, não foi relatado.

Em Huang, Chen e Lin (2005), os autores propuseram um sistema computacional para restaurar grandes redes de distribuição em tempo reduzido. Este sistema é composto por uma interface que lê o estado atual do sistema, um mecanismo que é empregado para realizar previsão de carga de curto prazo, e um método guloso que é utilizado para encontrar a topologia da rede após a restauração. O método guloso é composto por um conjunto de regras que são ativadas dependendo da situação que está sendo modelada, como restauração básica, alimentador bloqueado, transformador da subestação principal bloqueado, etc. O objetivo principal do sistema computacional é atenuar o impacto da falha no sistema, tanto quanto possível. Resultados para um grande sistema de Taiwan foram obtidos em menos de 6 segundos.

Um método baseado em busca local para a restauração de carga foi utilizado por Garcia e França (2008). A minimização da carga não restaurada e a minimização do número de manobras foram modeladas como objetivos em uma estrutura multiobjetiva. O algoritmo é composto por uma fase construtiva, em que um algoritmo de Prim aleatório é utilizado para gerar um conjunto inicial de soluções, e uma fase de busca local, em que um operador de busca local multiobjetiva é utilizado sequencialmente para melhorar a aproximação corrente do conjunto Pareto. O número de soluções no atual conjunto Pareto é limitado, a fim de controlar o custo computacional de cada iteração de busca local. Sistemas de distribuição de até 1.057 barras e 113 chaves foram considerados nos experimentos. Como esperado, o tempo de execução do método foi baixo. Os resultados apresentaram alguma variabilidade para o caso do maior sistema (cerca de 10% em média), o que é provavelmente devido à incapacidade do algoritmo de escapar de mínimos locais (o algoritmo não tem um mecanismo de diversificação).

Em Singh et al. (2009), é proposta uma técnica heurística de abertura sequencial de chaves para a reconfiguração e restauração de cargas. O método consiste em, primeiramente, fechar todas as chaves de interconexão e rodar o fluxo de carga do sistema malhado. Em seguida, a chave com menor fluxo é aberta e a rede é avaliada em relação a restrições de tensão e corrente. O processo é repetido até que cada alimentador se torne radial. O algoritmo foi avaliado em um pequeno sistema, com 3 alimentadores e 16 barras. As soluções obtidas superaram uma referência anterior, dos mesmos autores, no que diz respeito às perdas de energia.

Um método heurístico baseado no algoritmo de Prim foi proposto em Dimitrijevic e Rajakovic (2011), o qual pretende reduzir a carga não restaurada, tanto quanto possível. Os pesos dos coeficientes de arestas são definidos com o objetivo de agregar dois tipos de informações: a posição da chave antes da falha e o comprimento das arestas. Tal formulação tende a minimizar o número de manobras necessárias para

restaurar o sistema. Bons níveis de restauração foram alcançados para um sistema de 468 barras. No entanto, o algoritmo não prioriza o restabelecimento de clientes prioritários (ou grandes consumidores) e não explora os benefícios da disponibilidade de chaves TLC.

Nos métodos de enumeração implícita, o problema de restauração é modelado como um problema de programação inteira, que é resolvido por algum método exato, como programação dinâmica, *branch-and-bound*, planos de corte, etc. Estes métodos garantem a obtenção da solução ótima, mas podem gastar um tempo proibitivo para gerá-la, pois possuem complexidade computacional de pior caso exponencial ou fatorial. Alguns exemplos de trabalhos que empregam esta classe de métodos podem ser vistos em Hijazi e Thiébaux (2015), Pérez-Guerrero et al. (2008).

Pérez-Guerrero et al. (2008) introduziram uma abordagem para a restauração dos sistemas de distribuição, depois de um *blackout*, que utiliza o tempo e a seleção de alimentadores a serem energizados como estados em uma formulação de programação dinâmica (PD). O número de estados é reduzido pelo agrupamento de estados próximos. O método tenta minimizar uma única função objetivo, que é o produto da carga desconectada pelo tempo de desconexão. Embora seja utilizada uma aproximação para abordar a programação dinâmica, ainda há um rápido crescimento do tempo de processamento em função do tamanho do problema. Talvez, devido a isso, os exemplos considerados foram rodados em um sistema com apenas 32 barras.

Em Hijazi e Thiébaux (2015), os autores propuseram uma formulação quadrática inteira relaxada de equações de fluxo de carga para resolver a reconfiguração e restauração de sistemas de distribuição. A formulação relaxada é uma generalização discreta de modelos contínuos quadráticos de trabalhos anteriores. As soluções obtidas com a formulação relaxada são posteriormente analisadas, utilizando um fluxo de carga CA, a fim de avaliar a factibilidade. Se a solução é infactível, um otimizador não-linear de programação inteira é empregado, a fim de tentar corrigi-la. O algoritmo foi utilizado em redes de 32 a até 880 barras, considerando-se três diferentes problemas mono-objetivos: minimização de perdas, balanceamento de carga e restauração de carga. No problema de restauração, a função objetivo é uma combinação da carga desconectada e o número de manobras realizadas. O tempo total de otimização foi limitado a 1.800 segundos, mas o algoritmo pode alcançar soluções finais compreendidas entre 1 e 1.200 segundos. Algumas das soluções finais eram infactíveis.

Por fim, por serem mais eficazes que os métodos heurísticos e com flexibilidade suficiente para solucionar problemas com funções objetivo e restrições, os métodos meta-heurísticos têm sido uma tendência recente no tratamento de problemas de restauração. Outra vantagem é a possibilidade de controle do tempo de execução, encontrando soluções adequadas em tempo suficientemente curto. Exemplos de abor-

dagens dentro desta classe podem ser vistos em Carrano et al. (2016), Carvalho, Ferreira e Barruncho (2007), Delbem, Carvalho e Bretas (2003), Huang, Hsieh e Wang (2011), Irving, Luan e Daniel (2002), Kumar, Das e Sharma (2006), Luan, Irving e Daniel (2002), Sanches, Junior e Delbem (2014), Shin et al. (2004).

Irving, Luan e Daniel (2002) propuseram uma permutação baseada em GA para a restauração de energia em redes de distribuição. O mecanismo de decodificação utilizado é inspirado no algoritmo de Kruskal: (i) em primeiro lugar, todas as chaves são definidas como abertas; (ii) as chaves são fechadas na mesma sequência em que aparecem na permutação; (iii) se a operação no passo (ii) fecha um laço, então ela é cancelada, e o processo continua para a próxima chave; (iv) o processo de decodificação é interrompido quando todas as chaves são avaliadas. A função objetivo considerada é uma soma ponderada de cinco fatores: carga não atendida, perdas, sobrecarga de corrente, queda de tensão e esforço de restauração. O algoritmo proposto foi aplicado a um sistema real, considerando os cenários base e com 120% de carga, com bons níveis de restauração sendo alcançados. Uma abordagem semelhante é apresentada em Luan, Irving e Daniel (2002). Em tal referência, o GA proposto em Irving, Luan e Daniel (2002) é adaptado para incluir corte de carga. A mesma função objetivo ponderada é considerada. O emprego do algoritmo no primeiro cenário (carga base) levou a um melhor valor da função, mas um nível de restauração mais baixo. Os resultados para o segundo cenário (120% de carga) eram idênticos.

Uma representação por cadeias de grafo (do inglês, *Graph Chain Representation - GCR*) baseada em GA foi proposta por Delbem, Carvalho e Bretas (2003). A GCR garante que todas as soluções decodificadas sejam viáveis e demandem memória e complexidade de decodificação baixos. O sistema em estudo é simplificado como um sistema equivalente de uma fase e o fluxo de carga é avaliado usando um método DC, a fim de reduzir o tempo de execução. A função objetivo proposta é uma combinação linear de equilíbrio de carga entre alimentadores e o número de manobras. O nível de restauração não é considerado na formulação, uma vez que se assume que todos os blocos não defeituosos serão restabelecidos. Bons resultados em um sistema com 20 chaves foram obtidos em menos de 10 segundos.

Um algoritmo híbrido utilizando Algoritmo Genético / Busca Tabu (GA-TS) foi proposto em Shin et al. (2004) para reconfiguração e restauração. No caso da reconfiguração, a função objetivo é o custo incorrido por cargas ativas. Para a restauração, a função objetivo é a soma do custo da perda e custo da interrupção, sendo modelada com base em tempos de restauração, taxas de falha e durações. O tempo estimado para restaurar completamente o sistema (incluindo reparação de avarias) é dado a priori, como um parâmetro do método. Resultados sobre um sistema com 7 alimentadores mostrou que o algoritmo é mais eficiente do que o GA isolado. Tempos de convergência

não são relatados.

Em Kumar, Das e Sharma (2006), a restauração da rede de distribuição é realizada utilizando um GA com base no NSGA-II. O algoritmo foi adaptado para lidar com topologias de rede e um mecanismo é utilizado para verificar e, eventualmente, corrigir, a radialidade. Três objetivos são considerados na otimização: (i) minimização do número de barras desconectadas; (ii) minimização do número de manobras, e; (iii) minimização de perdas. Esta ordem de precedência dos objetivos é usada para tomar uma decisão entre as soluções candidatas. Sistemas que variam de 10 a 173 barras (10 a 75 chaves) foram considerados em experimentos e bons níveis de restauração foram alcançados. O algoritmo levou entre 1 e 320 segundos para obter tais resultados.

Em Carvalho, Ferreira e Barruncho (2007), um algoritmo de otimização de duas fases foi proposto. Na primeira fase, uma rede dedicada GA (do inglês, *Genetic Algorithm*) é empregada para encontrar uma topologia em que os clientes desconectados são restaurados. A função objetivo neste caso é a minimização do esforço de restauração, desde que o algoritmo assuma que todos os blocos não-defeituosos possam ser restaurados. Na segunda fase, um algoritmo de Programação Dinâmica é utilizado para encontrar a sequência ótima de manobras necessária para atingir a topologia encontrada na fase um, levando em conta uma função de mérito. O algoritmo foi utilizado para restaurar uma rede urbana de 633 barras, obtendo-se bons resultados. Nem o tempo de processamento, nem a complexidade computacional são discutidos.

Em Huang, Hsieh e Wang (2011), os autores utilizaram uma Função de Base Radial (FBR) e Redes Neurais Artificiais (RNA) para a restauração do sistema de distribuição. A abordagem é composta por três fases: na primeira fase, planos de restauração são gerados para diversos níveis de carga, levando em conta um conjunto razoável de possíveis falhas; na segunda fase, algoritmos evolutivos (AE) são empregados para formar a rede FRB no conjunto de dados gerados na fase um; finalmente, na terceira fase, a rede treinada é usada para identificar um plano de restauração quando ocorrer uma falha. Três funções objetivo são modeladas como funções de pertinência fuzzy: (i) Nível de restauração; (ii) número de chaves operadas, e; (iii) nível de sobrecarga de equipamentos de rede. Bons níveis de restauração foram alcançados em três estudos de caso de uma rede típica do TPC (Taipei West District Office). A ideia por trás da abordagem é treinar o FRB para simular o comportamento do algoritmo de otimização. Na prática, a utilização deste método tende a ser restrita, uma vez que o número de possíveis cenários iniciais (cargas e topologia de rede) aumenta exponencialmente com a dimensão da rede.

Em Sanches, Junior e Delbem (2014), os autores empregaram uma nova representação para árvores, a Representação Nó-Profundidade (RNP), e uma versão modificada do NSGA-II (do inglês, *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm*), con-

forme pode ser visto em Deb et al. (2002). A RNP lida facilmente com as restrições de topologia, o que reduz o tempo de processamento. O método foi testado em sistemas de grande escala, obtendo bons resultados com um reduzido número de manobras. Os dois objetivos considerados são: minimização do número de operações de chaves e a minimização de uma combinação ponderada de alguns índices operacionais do sistema. Cada solução é dividida em fases de restauração, que fornece ao operador a sequência na qual as manobras devem ser realizadas. No entanto, o conjunto pareto-ótimo é avaliado apenas na fase final, na qual toda a carga que poderia ser recuperada com um determinado número de operações já está reconectada. Isso significa que não há nenhuma preocupação sobre a qualidade das soluções parciais intermediárias.

Em Carrano et al. (2016), os autores utilizaram o algoritmo genético *Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2* (SPEA2) para formular um problema de otimização multi-objetivo, considerando o total de cargas restauradas e o tempo necessário para restaurá-las como critérios de projeto. Um novo esquema de codificação foi proposto, separando as chaves do sistema em seis grupos, de acordo com a função que exercem em relação à falta. Esses grupos foram usados para criar sub permutações, cuja união compõe uma solução candidata para o problema proposto. Os operadores de cruzamento, mutação e busca local empregados também exploram o mecanismo de sub permutações de forma eficiente. As estratégias propostas proporcionaram uma redução massiva do espaço de busca do algoritmo, tornando o processo de solução muito mais eficiente. Bons resultados foram obtidos em baixos tempos de processamento, inferiores a um minuto, para um sistema real de grande porte com 5 alimentadores, 714 barras e 121 equipamentos.

3.2 *Self-Healing*

O tema *Self-Healing* é relativamente recente na literatura, sendo muitas vezes abordado de forma conceitual devido a sua grande abrangência. Dentre os diversos objetivos do *Self-Healing*, a autorrecuperação merece destaque por seu importante papel na diminuição dos indicadores de continuidade, melhorando a confiabilidade do SD. Um sistema autorrecuperável deve ser capaz de minimizar o número de clientes desligados em decorrência de um distúrbio, no menor tempo possível e com pouca ou nenhuma intervenção humana. Assim, a autorrecuperação pode ser entendida como um processo de restauração de redes de forma automática, com tempo suficientemente reduzido de processamento e execução de manobras, visando a recuperação de cargas desligadas após a ocorrência de falhas no SD que provoquem a operação de um ou mais dispositivos de proteção. Para tanto, um sistema *self-healing* deve ser capaz de Localizar e Isolar a Falta e, posteriormente, efetuar o Serviço de Restauração de setores de carga não falhos (do inglês, *Fault Location, Isolation, and Service Restoration*

- FLISR). Neste sentido, trabalhos propostos para a restauração de redes podem ser utilizados na implementação da etapa SR (*Service Restoration*) do *Self-Healing*, desde que atendam ao critério de tempo de processamento reduzido.

Para implementação das etapas FLI do *self-healing*, variadas técnicas podem ser encontradas na literatura. Considerando que um alimentador possui diversas ramificações, perfis de carga desbalanceada variando no tempo e injeção de potência por GD em diferentes pontos, a localização de faltas no SD pode ser considerada uma tarefa desafiadora. Trabalhos sobre localização de falta estão baseados em três principais categorias: (i) impedância; (ii) transiente, e; (iii) sistemas inteligentes.

Métodos baseados em impedância utilizam algoritmos iterativos, são comumente lentos e tendem a estimar múltiplos pontos como sendo o local de uma mesma falta. Exemplos de abordagens que utilizam tais métodos podem ser encontrados em Salim et al. (2009), Ko et al. (2010).

Com custo computacional elevado e baixa confiabilidade, métodos para localização de falta baseados em transientes podem ser vistos em Salim et al. (2008), Michalik et al. (2006).

Ainda, métodos baseados em inteligência computacional, como Redes Neurais Artificiais e Sistemas Especialistas, possuem como desvantagens a necessidade de treinamento contínuo e o elevado tempo de resposta. Abordagens que utilizam esses métodos podem ser encontradas em Thukaram, Khincha e Vijaynarasimha (2005), Huang (2002).

Diante da dificuldade em se obter métodos eficientes de localização de faltas, abordagens alternativas têm sido consideradas por alguns autores. Equipamentos comerciais com a funcionalidade FLI, como sistemas *IntelliTeam* (OHARA, 2009) e detectores de falta, que indicam a passagem de corrente de curto, são considerados como solução para o problema. No entanto, essas alternativas trazem consigo altos valores de investimento por parte das concessionárias.

Assim, faz-se necessário o estudo de alternativas eficazes para a solução do problema de FLI. A seguir, é feita uma breve descrição de alguns trabalhos sobre autorrestauração.

Nos primeiros trabalhos encontrados na literatura sobre restauração automática do SD, as restrições elétricas do sistema eram ignoradas ou consideradas de forma muito simplificada (CASTRO; BUNCH; TOPKA, 1980), (MCCALL; CHAMBERS, 1983), (STADLIN; D., 1982).

Buscando aumentar a confiabilidade dos sistemas de restauração automática, Castro (1985) apresentou um algoritmo para restauração automática de redes de distribuição considerando como restrições limites de corrente e tensão, verifica-

dos através do método de fluxo de carga desacoplado rápido. Na metodologia proposta são utilizados uma tabela das chaves do sistema e um mapa do circuito. Cada zona do sistema é dotada de um dispositivo de detecção de passagem de corrente de curto. Identificado o bloqueio de um religador da subestação, o algoritmo percorre todos os dispositivos de detecção em busca daquele que identificou a passagem da corrente de curto e a chave a montante é então aberta, possibilitando o fechamento do religador da subestação. Zonas desligadas, localizadas a jusante da zona defeituosa, são restabelecidas obedecendo-se o seguinte critério: (i) respeitar os limites de corrente e tensão; (ii) energizar zonas com maior número de cargas; e, (iii) em caso de duas ou mais opções de chaves de transferência de uma mesma zona desligada, escolher a chave de transferência do alimentador menos carregado. O sistema foi testado em uma rede contendo 204 pontos de carga agrupados em 37 zonas interconectadas por 62 chaves seccionadoras, apresentando resultados satisfatórios. A limitação do método proposto reside, principalmente, na necessidade de instalação de dispositivos de detecção de faltas em cada uma das zonas de carga do sistema.

Em Neto (2011), o problema de restauração de redes de distribuição é abordado como um problema não linear inteiro misto multiobjetivo em que os objetivos são minimizar o número de cargas não restauradas e o número de chaveamentos. A metodologia proposta considera a inserção de geradores distribuídos. Para a solução do problema, foi proposto um algoritmo baseado na meta-heurística GRASP (do inglês, *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*), formulado em duas fases: procedimento de construção e procedimento de busca local. Bons resultados foram alcançados com baixo tempo computacional em sua execução, em um sistema real com 9 alimentadores e mais de 7.000 barras. O critério de parada adotado foi de 60 segundos ou 10 iterações.

Cavalcante et al. (2016) apresentaram uma abordagem matemática para implementação de um esquema *self-healing*. A metodologia proposta visa evitar o uso de heurística, meta-heurística, ou algoritmos de busca exaustiva, estando dividida em dois estágios. O primeiro estágio do procedimento usa linearização por partes para transformar o problema original não linear em um modelo de programação não linear inteira mista. Este modelo é utilizado para gerar as variáveis de decisão binárias do esquema proposto. No segundo estágio, as variáveis de decisão binárias, encontradas no estágio anterior, são utilizadas para equacionar um problema de programação não linear que calcula o ponto de operação estável da topologia encontrada como solução do problema. Os dois estágios foram implementados usando linguagem de programação matemática (AMPL) através de ferramentas de otimização comerciais. A função objetivo busca minimizar o total de cargas não energizadas, o número de chaves operadas e as perdas de energia. Cortes de cargas não prioritárias podem ser efetuados, se necessário. Foram efetuados testes em um sistema real com 964 barras e 136 chaves,

obtendo-se bons resultados em tempos da ordem de 400 segundos.

Em Ghorbani, Choudhry e Feliachi (2016), um sistema multiagente é proposto para implementação de um sistema *self-healing*, em que são executados processos de localização e isolamento da falta, e restauração das cargas desligadas - FLISR. O sistema multiagente proposto é composto por agentes de zona - ZA (do inglês, *Zone Agent*), agentes de alimentadores - FA (do inglês, *Feeder Agent*) e agentes de subestações - SA (do inglês, *Substation Agent*). As etapas FLI são executadas pelos ZAs, podendo ser realizadas de forma descentralizada. A zona em falta é estimada através de informações trocadas entre os agentes ZA antes e imediatamente após a ocorrência de eventos de religamento. Estes agentes recebem informações de chaves SF6 com capacidade de leitura de correntes com taxas de amostragem de 16 amostras por segundo. A restauração foi formulada com base no problema da mochila, utilizando *toolbox* do MATLAB para resolver o problema de otimização com base em GA. Estudos de caso de FLISR foram efetuados em um circuito real da Virgínia, com apenas 16 chaves e 2 religadores de SE. Tempos de convergência não são relatados.

Todos os trabalhos acima citados, além de vários outros da literatura, compartilham de uma mesma dificuldade: encontrar uma metodologia que seja eficiente no tratamento das etapas FLI. A grande maioria destes trabalhos parte do pressuposto de que o local da falta já é conhecido, enquanto aqueles que consideram a falta como desconhecida utilizam metodologias que têm se mostrado ineficientes em relação ao tempo de execução e confiabilidade ou em relação a custos de implantação devido à necessidade de instalação de novos equipamentos.

O algoritmo proposto aqui tem como objetivo viabilizar a transferência imediata de cargas que não dependem do conhecimento à priori do local da falha, por meio da utilização de equipamentos TLC que já se encontram instalados em campo. Esta ferramenta se enquadra perfeitamente no paradigma de autorrestauração (ou *self-healing*), que vem sendo difundido como um dos pontos-chaves das *Smart Grids*.

Por ser uma referência recente e ter obtido bons resultados em aplicações reais de grande porte, o esquema de codificação e decodificação proposto em Carrano et al. (2016) foi utilizado no algoritmo de otimização da ferramenta proposta nesta dissertação.

4 Abordagem Proposta

A metodologia proposta tem como objetivo tratar o problema de autorrestauração do SD da forma com que ele é enfrentado pelo operador, sem simplificações ou necessidade de instalação de novos equipamentos, como a maioria dos trabalhos da literatura. O diferencial deste trabalho está na elaboração de uma nova metodologia de processamento da falha, utilizando como informação para determinação dos setores em falta dados obtidos do sistema SCADA em tempo real. No presente capítulo será apresentada, inicialmente, a formulação matemática do problema de autorrestauração a ser tratado. Em seguida, serão apresentadas as alterações efetuadas no algoritmo base tomado como referência para o desenvolvimento da metodologia proposta. No decorrer da discussão é ilustrada a aplicação da metodologia proposta para um problema simples de autorrestauração.

4.1 Formulação Matemática

O problema de restauração do sistema de distribuição de energia elétrica proposto foi modelado como um problema de otimização mono-objetivo. Foram consideradas duas funções de mérito: (i) cargas não restauradas – Equação (4.1) e, (ii) número de manobras – Equação (4.2). Essas duas funções de mérito foram combinadas em uma função lexicográfica, em que o objetivo é minimizar a porcentagem de cargas não restauradas e, em caso de igualdades, a função de mérito (ii) é usada como critério de desempate.

$$f_1 = \sum \frac{Nu}{Nl} \times 100\% \quad (4.1)$$

$$f_2 = \sum |E_i - E_i^0| \quad (4.2)$$

Sujeito às seguintes restrições:

- limite máximo de corrente nos elementos do sistema (cabos, chaves, reguladores de tensão, dentre outros):

$$I_i \leq I_{imax} \cdot \left(1 + \frac{F_{sobrecarga}}{100}\right) \quad (4.3)$$

- limite de ajuste de proteção:

$$I_i \leq I_{Protj} \quad (4.4)$$

- faixa de tensão admissível nas redes de distribuição:

$$V_{jmin} \leq V_j \leq V_{jmax} \quad (4.5)$$

- radialidade.

onde:

Nu : número de cargas não religadas;

Nl : número total de cargas desligadas devido a contingência;

$Fsobrecarga$: fator de sobrecarga permitido (em %);

I_i : corrente no ramo i ;

I_{Protj} : corrente de atuação do dispositivo de proteção j ;

I_{imax} : corrente máxima admissível no ramo i ;

V_j : módulo da tensão no nó j ;

V_{jmin} : módulo da tensão mínima aceitável no nó j ;

V_{jmax} : módulo da tensão máxima aceitável no nó j ;

E_i^0 : estado inicial do equipamento i ;

E_i : estado atual do equipamento i .

A porcentagem de cargas não restauradas se refere somente aos blocos onde não ocorreram falhas. Dessa forma, é possível atingir 100% de cargas restauradas. No entanto, essa taxa nem sempre é alcançável, pois podem não haver rotas entre a parte ativa do sistema e uma carga potencialmente restaurável ou ainda devido a alguma restrição do sistema.

Conforme abordado anteriormente e apresentado na Tabela 2, a tensão de atendimento em regime permanente pode ser classificada em: Adequada, Precária e Crítica. Em situações normais de operação, é desejável que o sistema opere dentro da faixa de tensão adequada. Porém, ao operar em processo de contingência, após ocorrência de distúrbios que provoquem a atuação de dispositivos de proteção, é normal e, perfeitamente admissível, que o sistema opere na faixa crítica. Assim, as soluções que estejam nessa faixa de tensão têm seus valores de função penalizadas, mas são aceitas. Soluções que se encontrem abaixo desse limite são consideradas infactíveis e desconsideradas pelo algoritmo. Contudo, por se tratar de uma situação de caráter temporário, que persistirá apenas até que sejam identificadas e corrigidas as falhas, normalmente são toleradas condições de operação onde certos limites da rede são relaxados. Essa consideração “mais tolerável” também é válida para o limite

de corrente nos cabos e equipamentos do sistema. Desta forma, tais parâmetros são configuráveis, sendo possível o operador ajustar o limite desejável.

4.2 Algoritmo Proposto

O algoritmo proposto apresenta uma nova metodologia de processamento da falha, utilizando como informação para determinação dos setores em falta dados obtidos do sistema SCADA em tempo real. Inicialmente, o sistema completo, obtido da base de dados da concessionária, é processado, obtendo-se a topologia completa do sistema. Após o processamento, são efetuadas reduções. O processo de redução tem por objetivo remover informações que não serão consideradas pelo algoritmo de otimização, tais como linhas não manobráveis e equipamentos sem telecomando (TLC). Isso reduz o espaço de busca do problema, o que proporciona um processamento mais rápido do algoritmo, permitindo a obtenção de respostas de forma rápida mesmo em sistemas de grande porte. O fluxo do algoritmo proposto é apresentado na Figura 7.

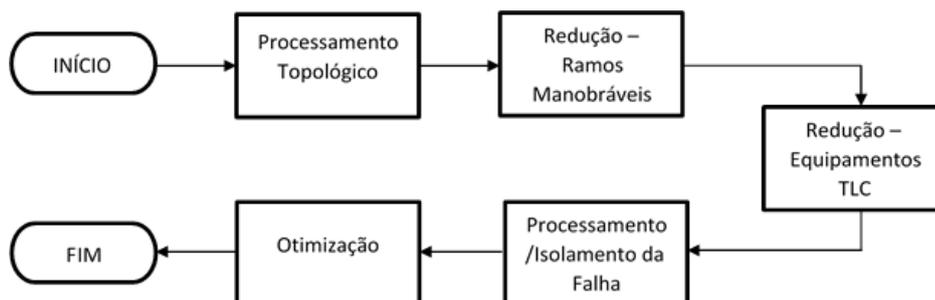


Figura 7 – Fluxograma da arquitetura proposta.

A seguir são detalhadas cada uma das etapas do algoritmo proposto.

4.2.1 Sistema Completo

Um sistema de distribuição completo é composto por barramentos interligados por linhas (ramos) manobráveis e linhas não manobráveis. Linhas manobráveis são equipamentos¹ (NF² e NA³) que interligam barramentos, como chaves e religadores. Um conjunto de barramentos pode ser denominado setor de carga. Um exemplo de sistema de distribuição é mostrado na Figura 8. Este sistema apresenta uma subestação que possui 3 alimentadores (Linha de Distribuição - LD). Os retângulos 1, 2 e 3 representam as fontes destes alimentadores, enquanto os círculos representam

¹ Chaves seccionadoras, religadores e seccionalizadores são alguns dos equipamentos utilizados nos sistemas de distribuição das concessionárias de energia elétrica.

² Equipamentos que na configuração original trabalham no estado fechado recebem a denominação NF (Normalmente Fechado).

³ Equipamentos que na configuração original trabalham no estado aberto recebem a denominação NA (Normalmente Aberto).

O alimentador 3 contém os blocos 13, 14, 15, 16 (barramentos que possuem cargas ligadas) e 53, 41, 42, 43, 44 e 45 (barramentos que não possuem cargas ligadas). As linhas manobráveis do alimentador 3 são: SEU-03, CH Faca 3002, CH Faca 3003, CH SF6 TLC 3004 e Religador 5003.

4.2.2 Sistema Equivalente – Ramos Manobráveis

Para reduzir o sistema, com o objetivo de retirar informações desnecessárias ao problema de restauração, os barramentos interligados por linhas não manobráveis são agrupados, formando setores de carga. Desta forma, o sistema equivalente obtido é composto por setores de carga interligados por equipamentos (Figura 9). Esses equipamentos podem ser de manobra e proteção, somente manobra ou somente proteção.

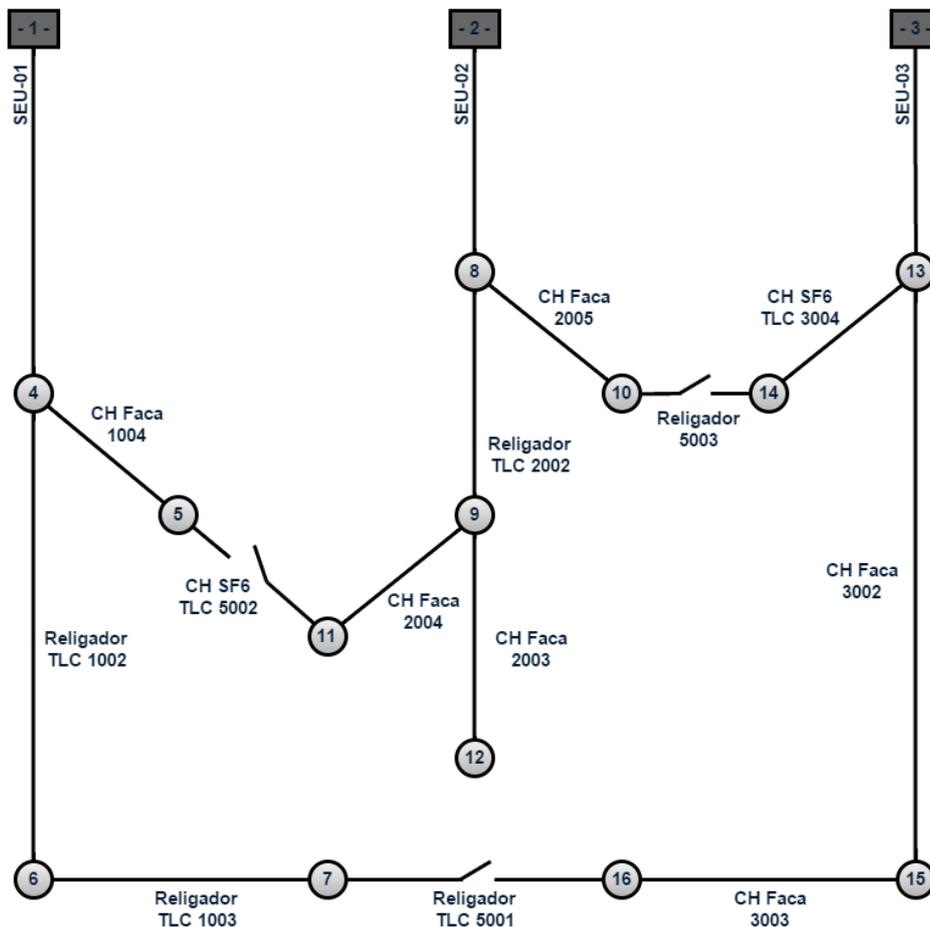


Figura 9 – Sistema exemplo equivalente - 16 Barras - Ramos manobráveis.

4.2.3 Sistema Equivalente – Equipamentos TLC

Como os equipamentos podem ser de operação local ou por TLC, uma nova redução é efetuada. Nessa nova representação, os equipamentos sem TLC são agrupados, formando setores de carga ainda maiores. Nesse novo sistema reduzido, um bloco é a unidade mínima do problema de restauração, não sendo possível desconectar ou reconectar partes deste bloco remotamente. Todavia, mediante envio de equipes a campo, um bloco poderá ser dividido, desde que possua chaves manuais em seu interior. Nesta última redução, os blocos do sistema reduzido final são conectados um ao outro por equipamentos TLC, tais como religadores, seccionadores ou chaves SF6, que são as variáveis do problema de restauração. A Figura 10 apresenta o sistema completo.

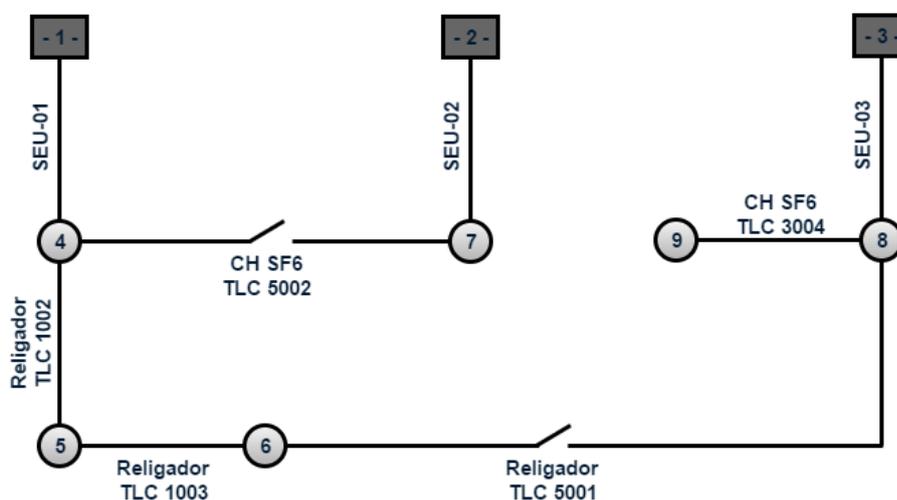


Figura 10 – Sistema exemplo equivalente - Apenas equipamentos TLC.

Na configuração original, o sistema é composto por 31 barras e 31 linhas. Após a primeira redução, o sistema passa a ser composto por 16 barras e 16 linhas. Finalmente, após a segunda redução, o sistema é simplificado a 9 barras e 8 linhas.

Como as linhas são os equipamentos que podem ser manobrados e, sabendo-se que estes podem assumir os estados aberto ou fechado, o número de combinações possíveis é drasticamente reduzido. Um limitante superior para este número pode ser calculado por 2^N , onde N é o número de equipamentos. Desta forma, para o sistema completo, são possíveis 65.536 (2^{16}) combinações, enquanto que para o sistema reduzido TLC o número de combinações é reduzido para 256 (2^8). Logicamente, nem todas essas combinações são factíveis. Com um número menor de combinações, os algoritmos de otimização tornam-se mais rápidos. Isso é fundamental para a implementação da autorrestauração, uma vez que essa depende fortemente da velocidade de execução para minimizar o tempo em que os clientes são afetados.

4.2.4 Processamento/Isolamento da Falha

Na ocorrência de uma falha, o dispositivo de proteção imediatamente a montante do bloco atingido irá operar, a fim de proteger o sistema, equipes de operação e manutenção e terceiros. Uma vez que os sistemas de distribuição são radiais, a interrupção no fornecimento de energia não se dará apenas para o bloco que falhou, mas também para todos os blocos à jusante do dispositivo de proteção operado. O bloco em falha somente poderá ser restabelecido após correção da falha. Contudo, alguns blocos desligados, que não apresentam falha, poderão ser restabelecidos antes da correção. Consideremos, como exemplo, o bloqueio do alimentador 1, Figura 8. O sistema SCADA irá sinalizar para o operador a atuação da proteção do alimentador 1, em tempo real. Com a abertura do dispositivo de proteção, ocorrerá o desligamento dos blocos de carga 4, 5, 6 e 7, bem como dos blocos 51, 21, 22, 23, 24 e 25. Estando a proteção devidamente coordenada, é conveniente afirmar que o setor com defeito está à montante do religador TLC 1002, sendo possível restabelecer os blocos 6, 7, 24 e 25 por meio da abertura do religador TLC 1002 e posterior fechamento do religador TLC 5001. Este procedimento, além de reduzir o tempo de desligamento para o conjunto de cargas ligadas nos barramentos restabelecidos, reduz o valor a ser pago a título de compensações financeiras, uma vez que, conforme a legislação vigente (ANEEL, 2015b), os blocos desligados por menos de 3 minutos não geram multas. Em seguida, equipes de operação deverão ser enviadas a campo para inspeção e correção da falha, que, dependendo do local em que ocorreu, permitirá novas manobras de transferência de carga, antes de sua correção. Importante ressaltar que, para efetuar o restabelecimento dos setores de carga após o religador TLC 1002, o local exato da falha não precisa ser conhecido à priori, situação a qual técnicos e engenheiros de operação do sistema lidam diariamente. A metodologia apresentada para localização e isolamento da falha (FLI) não depende de métodos ainda sem garantia de eficiência, conforme relatado na seção 3.2, tampouco da instalação de novos equipamentos em campo, com função dedicada à FLI. Dessa forma, o método utilizado para processamento e isolamento da falha, determinando os setores que podem conter o local do defeito, no instante em que ocorre o bloqueio de um equipamento de proteção, constitui uma inovação, como forma de disparar os algoritmos de recuperação.

4.2.5 Otimização

Para lidar com o problema da restauração foi proposto um algoritmo baseado no esquema geral do ILS, por este ser uma meta-heurística simples, fácil de implementar, robusta, altamente eficaz, e principalmente, de resposta rápida. O esquema de classificação e codificação de chaves proposto em Carrano et al. (2016), separando as chaves do sistema em grupos, de acordo com a função que exercem em relação à

falta, foi utilizado a fim de proporcionar uma redução massiva do espaço de busca do algoritmo, tornando o processo de solução muito mais eficiente. Esses esquemas, bem como o processo de otimização proposto, são detalhados a seguir.

4.2.5.1 Classificação dos Setores de Carga

No cenário pré-falta, cada setor de carga é associado a um grupo, que corresponde ao alimentador ao qual está conectado. Para o sistema exemplo da Figura 8, que após reduções é apresentado na Figura 10, temos:

Grupo 1: 1, 4, 5 e 6.

Grupo 2: 2 e 7.

Grupo 3: 3, 8 e 9.

Após a inclusão de informações de falta no sistema, os setores de carga são reagrupados, conforme segue:

- Setores que contenham a falta são associados a um novo grupo, denominado **Grupo 0**.
- Setores que foram desconectados de um grupo g são associados a um novo grupo, denominado **Grupo -g**.

Importante ressaltar que as informações de falta são alimentadas pelo SCADA, o qual indica qual equipamento operou. Assim, se novamente considerarmos que o alimentador 1 - SEU-01 - operou, o algoritmo de Processamento/Isolamento da Falha irá receber tal informação do SCADA, determinará qual o setor em falha e, em seguida, entregará para o algoritmo de Otimização a informação de falha no setor 4. Diante disso, teremos o seguinte reagrupamento:

Grupo -1: 5 e 6.

Grupo 0: 4.

Grupo 1: 1.

Grupo 2: 2 e 7.

Grupo 3: 3, 8 e 9.

4.2.5.2 Classificação dos Equipamentos

Neste esquema, os equipamentos são classificados em 6 grupos distintos, de acordo com a função que exercem em relação à falta. A Tabela 3 apresenta esses grupos.

Tabela 3 – Classificação dos equipamentos

| Tipo | Descrição da função | Posição |
|-------------|--|----------------|
| 1 | Proteção – Equipamento que atuou devido à falha | N.F. |
| 2 | Isolamento – Isola o setor com defeito | N.F. |
| 3 | Trecho – Conecta dois setores (sem defeito) de uma mesma LD | N.F. |
| 4 | Anel Ativo – Conecta LD's diferentes e energizadas | N.A. |
| 5 | Anel Inativo – Conecta LD's diferentes e desenergizadas | N.A. |
| 6 | Restauração – Conecta uma LD energizada a uma LD desenergizada | N.A. |

Um equipamento que atuou (abriu) devido à falha é classificado como tipo 1. Estes equipamentos conectam um grupo positivo a um grupo 0. Como não poderá ser fechado até que a falha seja corrigida, este equipamento poderá ser ignorado pelo processo de otimização. Equipamentos tipo 2 têm a função de isolar a falha, devendo ser abertos para permitir que blocos à jusante da falha possam ser re-energizados. Tais equipamentos conectam um grupo 0 a um grupo negativo. Equipamentos tipo 3 interligam dois setores de um mesmo grupo. São usados para separar um grupo em duas partes. Equipamentos tipo 4 conectam dois grupos positivos distintos, enquanto que equipamentos tipo 5 conectam dois grupos negativos distintos. Equipamentos 4 e 5 são usados para mover setores de um grupo para outro. Tais equipamentos devem ser usados em conjunto com equipamentos tipo 3 a fim de manter a radialidade do sistema. Finalmente, equipamentos tipo 6 são os mais importantes no processo de restauração, uma vez que são responsáveis por reconectar setores de carga recuperáveis. Estes equipamentos conectam um grupo negativo a um grupo positivo. A operação de um equipamento tipo 6 é precedida da operação de equipamento do tipo 2 ou 3.

As Tabelas 4 e 5 apresentam a classificação dos equipamentos do sistema exemplo da figura 10, nos cenários pré-falta e pós-falta, respectivamente, considerando atuação da proteção do alimentador SEU-01.

Tabela 4 – Classificação dos equipamentos do sistema exemplo - Cenário pré-falta

| Tipo | Equipamento |
|-------------|--|
| 1 | - |
| 2 | - |
| 3 | 1002, SEU-03, 1003, SEU-01, SEU-02, 3004 |
| 4 | 5001, 5002 |
| 5 | - |
| 6 | - |

Tabela 5 – Classificação dos equipamentos do sistema exemplo - Cenário pós-falta

| Tipo | Equipamento |
|------|----------------------------|
| 1 | SEU-01 |
| 2 | 1002, 5002 |
| 3 | SEU-03, 1003, SEU-02, 3004 |
| 4 | - |
| 5 | - |
| 6 | 5001 |

4.2.5.3 Codificação e Decodificação

A classificação de equipamentos, descrita na seção anterior, é utilizada para construir o procedimento de decodificação, responsável por reduzir substancialmente a dimensão do espaço de busca. Neste procedimento, uma solução incumbente é codificada como uma permutação de NE equipamentos, sendo NE o número de equipamentos disponíveis para manobra. Essa permutação define uma sequência na qual cada tipo de equipamento deve ser testado. Uma possível solução incumbente para o sistema da Figura 10 é mostrada na Figura 11.

| X1 | X2 | X3 | X4 | X5 | X6 | X7 | X8 |
|------|--------|------|------|--------|------|--------|------|
| 1002 | SEU-03 | 5002 | 1003 | SEU-01 | 5001 | SEU-02 | 3004 |

Figura 11 – Exemplo de solução incumbente para o sistema da Figura 10

Essas soluções incumbentes são, então, decodificadas conforme fluxograma apresentado na Figura 12.

Inicialmente, uma chave de restauração, Tipo 6, é fechada. Comumente essa ação irá realimentar o setor em falta e, assim, uma chave Tipo 2 será aberta, isolando o ponto de falha. Em seguida, é rodado o fluxo de carga. Havendo restrições, o primeiro equipamento Tipo 3, na ordem em que aparece na solução incumbente, é aberto. Tal ação visa efetuar corte de cargas a serem restauradas, a fim de encontrar uma solução que atenda às restrições técnicas. Este ciclo é repetido até que seja encontrada uma configuração que atenda às restrições, caso contrário, todas as operações da iteração corrente deverão ser canceladas e uma nova iteração, com o próximo equipamento Tipo 6, deverá ser iniciada. Manobras redundantes podem ser geradas para o caso de cortes de cargas e, portanto, devem ser canceladas. Em seguida, a solução parcial é salva e o Tipo de operação dos equipamentos é atualizado. Equipamentos manobrados são retirados da lista de equipamentos manobráveis. Esse ciclo será repetido até que todas os equipamentos Tipo 6 sejam verificados. Vale ressaltar que um equipamento pode, e deverá mudar de Tipo durante uma iteração do esquema de decodificação. Consideremos, por exemplo, que no início de uma iteração existam dois equipamentos Tipo 6 e ambos possibilitem religar um mesmo trecho. Ao ser fechado o primeiro

equipamento, o segundo ficará conectado entre duas LD's energizadas (uma que já se encontrava ligada e outra que passará a ficar ligada após o fechamento do primeiro equipamento Tipo 6). Dessa forma, ao serem atualizados, esses equipamentos Tipo 6 passarão a ser equipamentos Tipo 3 (aquele que fora fechado) e Tipo 4 (aquele que continuou aberto). Finalmente, após não restarem mais equipamentos Tipo 6, a solução parcial é avaliada utilizando-se a função objetivo. Deve ser notado que o conjunto de soluções decodificados para uma mesma solução incumbente constitui os estágios a serem executados em sequência, até que o plano de restauração seja concluído. Em cada um desses estágios, normalmente compostos por um equipamento Tipo 2 e outro Tipo 6, um nível de restauração será alcançado.

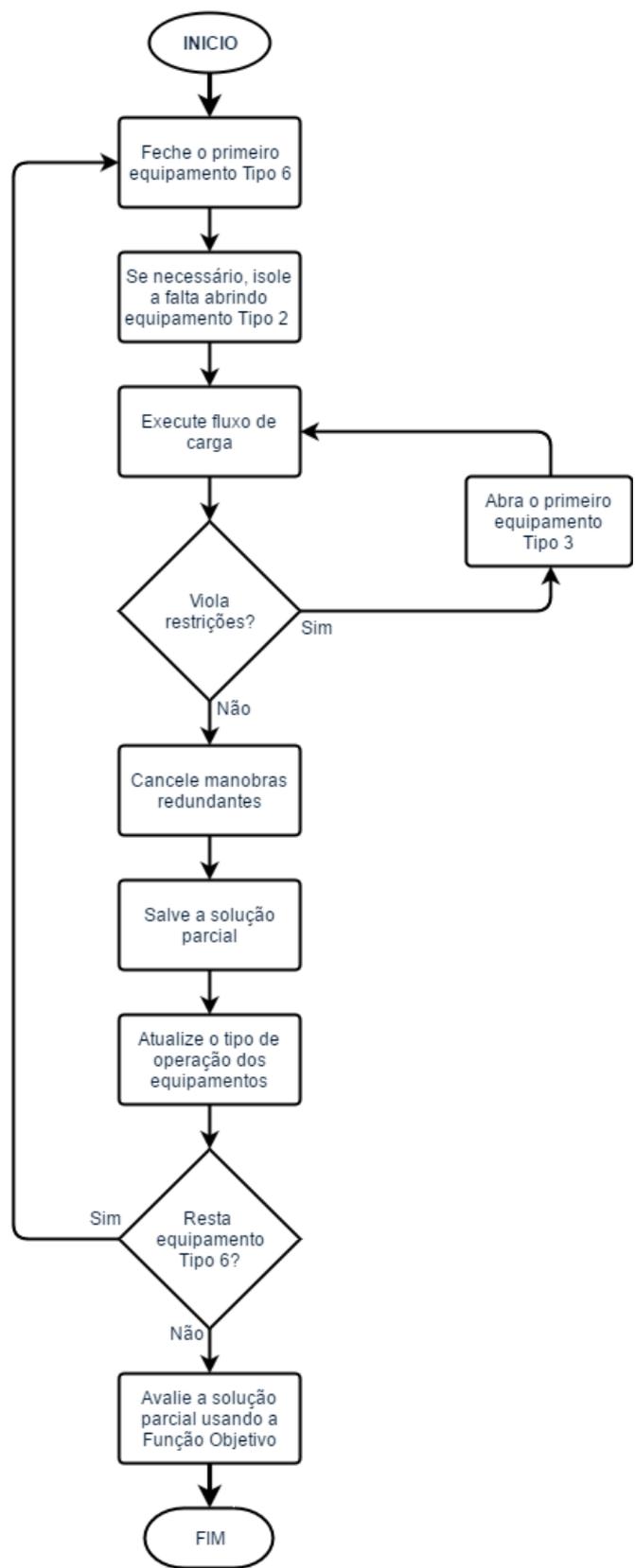


Figura 12 – Fluxograma do Esquema de Decodificação

O esquema de decodificação proposto em Carrano et al. (2016) descarta automaticamente as soluções não factíveis, gerando apenas soluções que são viáveis, respeitando todas as restrições do problema e reduzindo drasticamente a dimensão do espaço de busca.

Para exemplificar o esquema de decodificação, recorreremos, mais uma vez, ao sistema exemplo da Figura 10 e à solução incumbente da Figura 11. Considerando novamente que o SEU-01 tenha atuado, a classificação dos equipamentos, conforme explicado anteriormente, é a mesma apresentada nas Tabelas 4 e 5. Assim, na primeira iteração do decodificador deverá ser fechado o religador 5001 (primeiro, e neste caso o único, equipamento Tipo 6). O religador 1002 (equipamento Tipo 2) deverá ser aberto, a fim de isolar o ponto da falha. Em seguida, o fluxo de carga é executado e, como não há restrições técnicas e nem manobra redundante, a solução parcial é salva e os equipamentos são atualizados quanto ao Tipo de operação, conforme apresentado na Tabela 6. Como o sistema exemplo possui apenas um equipamento Tipo 6, a solução é então avaliada utilizando a função objetivo ao final da primeira iteração.

Tabela 6 – Classificação dos equipamentos do sistema exemplo - Após a primeira iteração

| Tipo | Equipamento |
|-------------|--|
| 1 | 1002 |
| 2 | 5002, SEU-01 |
| 3 | SEU-03, 1003, 5001 , SEU-02, 3004 |
| 4 | - |
| 5 | - |
| 6 | - |

Na Tabela 6, os equipamentos manobrados foram colocados em destaque. Importante ressaltar alguns pontos: (i) o religador 1002 passa a ser classificado como equipamento Tipo 1 devido ao fato deste equipamento, após a primeira iteração, estar conectando um setor ligado (bloco 3) a um setor em falha (bloco 2) e, ainda, ser uma possível fonte para o setor em falha; (ii) religador SEU-01 passa a ser classificado como equipamento Tipo 2, devido ao fato deste equipamento conectar um setor ligado (bloco 3) a um setor em falha (bloco 2) e; (iii) o religador 5001 passa a ser classificado como equipamento Tipo 3, por conectar dois setores ligados de um mesmo grupo.

O sistema exemplo, após manobras de restauração, é apresentado na Figura 13. Deve ser observado que 100% das cargas passíveis de recuperação foram restauradas.

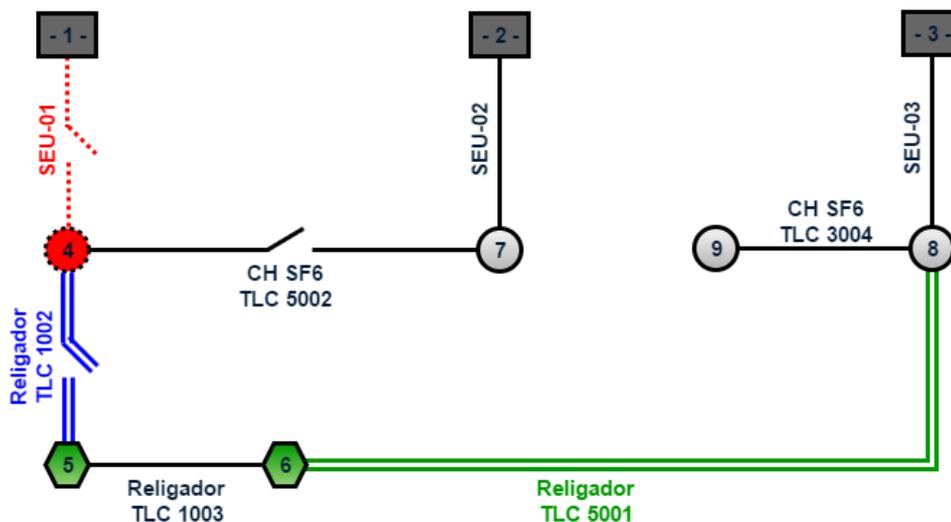


Figura 13 – Sistema exemplo restaurado.

Na Figura 13, a linha pontilhada vermelha indica o equipamento aberto por atuação da proteção, a linha dupla contínua azul interrompida indica o equipamento aberto para isolar a falha e, a linha dupla contínua verde indica o equipamento fechado para restaurar os setores de carga. O círculo vermelho - circunferência pontilhada - representa o setor em falha, enquanto os hexágonos verdes representam os setores restaurados.

4.2.5.4 Algoritmo ILS

O algoritmo ILS foi utilizado para tratar o problema de otimização e segue a mesma estrutura apresentada na seção 2.5. As particularidades do algoritmo proposto concentram-se nas etapas de geração da solução inicial, geração da perturbação e a realização da busca local. Cada uma dessas etapas será discutida a seguir.

Solução inicial: a solução inicial é gerada a partir de uma permutação aleatória dos NE equipamentos. O esquema de decodificação é responsável por processar essa solução inicial e entregar para o algoritmo de busca local uma solução de boa qualidade.

Perturbação: O processo de perturbação é efetuado através da mutação da solução incumbente. O número de vezes que a mutação é aplicada será determinado pelo número inteiro (arredondado para cima), calculado através do produto do raio de permutação pelo número de equipamentos – Equação (4.6). O raio de perturbação (R_p) utilizado é igual a 0,1, implementando um número de mutações igual a 10% do número de equipamentos disponíveis para a manobra⁴.

⁴ Parâmetro definido com base na experimentação empírica.

$$\text{Número de mutações} = [Rp * NE] \quad (4.6)$$

onde:

Rp: raio de permutação;

NE: número de equipamentos.

Assim, para o exemplo da Figura 10, cada processo de perturbação será composto por 1 procedimento de mutação.

O procedimento de mutação é efetuado mediante realização de *swaps* entre variáveis pertencentes a um mesmo grupo de subpermutações. Conforme proposto em Carrano et al. (2016), uma permutação original pode ser dividida em subpermutações menores, separando os equipamentos em grupos de Tipos, a fim de proporcionar uma redução do espaço de busca. Quatro diferentes subpermutações são propostas:

- (i) Subpermutação A: Equipamentos Tipo 1 e 4;
- (ii) Subpermutação B: Equipamentos Tipo 2 e 3;
- (iii) Subpermutação C: Equipamentos Tipo 5;
- (iv) Subpermutação D: Equipamentos Tipo 6;

Esses grupos foram estrategicamente divididos observando-se as similaridades dos tipos de equipamentos. Desta forma, equipamentos 1 e 4 são agrupados por apresentarem características semelhantes quanto ao processo de restauração. Um equipamento Tipo 1 não poderá ser fechado até que seja efetuada a correção da falha, pois seu fechamento voltaria a energizar o ponto de falha. Por sua vez, um equipamento Tipo 4, por se tratar de N.A. entre duas LD's energizadas, também não participará do processo de restauração. Assim, esses equipamentos não são utilizados no processo de otimização. Seguindo a mesma analogia, equipamentos Tipo 2 e 3 podem ser agrupados em uma mesma subpermutação. Equipamentos Tipo 2 são abertos para isolar a falha, enquanto equipamentos Tipo 3 são utilizados para cortar um setor de carga (desligado) devido a restrições técnicas. Ambos eram equipamentos Tipo 2 no cenário pré-falta. As subpermutações são baseadas nos grupos originais dos equipamentos, assim, equipamentos que pertencem ao Grupo 1 deverão compor a subpermutação B/G1, equipamentos que pertencem ao Grupo 2 deverão compor a subpermutação B/G2, e assim por diante. Equipamentos Tipo 5 e 6 não são agrupados por não possuírem características em comum, apesar do fato de um equipamento Tipo 5 poder se tornar Tipo 6 durante o estágio de decodificação. Contudo, equipamentos Tipo 5 não são operados durante o estágio de decodificação. Equipamentos Tipo 5 formam subpermutações C. Finalmente, equipamentos Tipo 6 são os equipamentos de restauração, responsáveis por reconectar os setores desligados do sistema. Esses

equipamentos compõem subpermutações D.

O sistema exemplo da Figura 10 e a solução incumbente da Figura 11 são usados para demonstrar o processo de construção das subpermutações. Considerando o equipamento SEU-01 atuado e, baseado na ordem em que os equipamentos aparecem na solução incumbente, temos:

Subpermutação A: {SEU-01}

Subpermutação B:

G1: {1002; 5002; 1003}

G2: {SEU-02}

G3: {SEU-03; 3004}

Subpermutação C: nenhum equipamento

Subpermutação D: {5001}

Essas subpermutações são utilizadas para reduzir o espaço de busca explorado pelo algoritmo de otimização. As soluções iniciais são geradas por permutações aleatórias completas, ou seja, considerando todos os equipamentos do sistema (NE), enquanto que o operador de mutação irá realizar *swaps* somente dentro das subpermutações.

O procedimento de mutação proposto em Carrano et al. (2016) foi usado como operador de mutação no algoritmo proposto, conforme fluxograma apresentado na Figura 14.

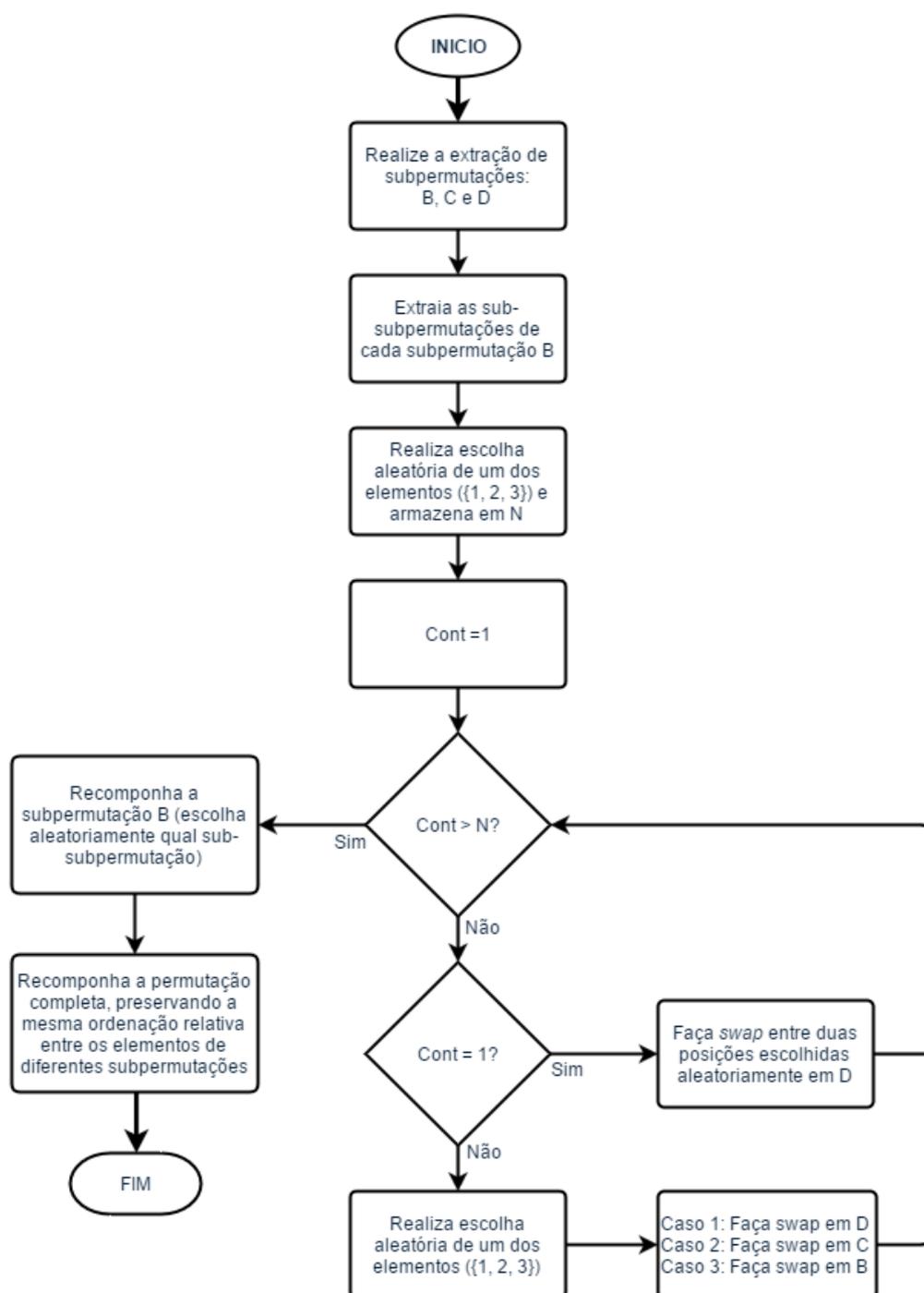


Figura 14 – Fluxograma do procedimento de mutação.

No procedimento de mutação, as subpermutações são extraídas da solução incumbente. Importante ressaltar que subpermutações B são divididas em grupos (de acordo com o grupo ao qual o equipamento pertence), sendo uma subdivisão dessas subpermutações denominada sub-subpermutação. As mutações são efetuadas através de *swaps* efetuados nas subpermutações, sendo que o número de mutações é escolhido aleatoriamente entre 1 e 3. A primeira operação de mutação sempre é realizada na subpermutação D, uma vez que equipamentos Tipo 6 são responsáveis por proporcionar as mudanças mais significativas nas soluções decodificadas. Caso o número de operações de mutação seja maior que 1, as próximas operações de mutação serão realizadas através de escolha aleatória da subpermutação. Ao final das operações de mutação, a permutação completa é recomposta, preservando-se a mesma ordenação relativa entre os elementos de diferentes subpermutações.

Busca local: O procedimento de busca local implementado é baseado em funções de vizinhança de *swap*, que é aplicada aos equipamentos Tipo 6. Assim, são testados todos os *swaps* possíveis entre todos os equipamentos Tipo 6. Uma estratégia de *first improvement* é aplicada à busca local, com o objetivo de acelerar o processo de obtenção do ótimo local. Para tanto, a sequência em que os *swaps* são realizados é determinada de forma aleatória, garantindo a eficiência do processo. Com a estratégia aplicada, ao ocorrer uma melhoria da solução corrente, a iteração atual é interrompida antes que a sequência completa de *swaps* seja executada. Em seguida, a busca local é reiniciada a partir do novo ótimo local. Como critério de convergência foram utilizados: (i) número máximo de avaliações; (ii) tempo máximo do ILS; e, (iii) sequência completa de *swaps* entre equipamentos Tipo 6.

5 Resultados e Discussões

Para validação da metodologia proposta, foram realizados estudos de casos com dados reais da concessionária de energia CEMIG-D. Para tanto, diversos cenários de contingência, considerando atuação de um único e de múltiplos dispositivos de proteção, foram testados em dois sistemas reais de grande porte. Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados da aplicação da ferramenta proposta em cada um desses sistemas e cenários.

Em todos os sistemas testados, as cargas foram estimadas com base no histórico de consumo no horário de ponta nos dias úteis. Os parâmetros exatos dos sistemas não são fornecidos aqui devido a um acordo de confidencialidade.

O algoritmo implementado foi definido com os seguintes parâmetros: (i) tensão crítica: 0,95 pu; (ii) tensão mínima admissível: 0,90 pu; (iii) sobrecorrente máxima admissível: 10% da corrente nominal; (iv) raio de perturbação: 0,1. O critério de parada foi definido para 5 segundos de execução do algoritmo ILS.

As simulações foram realizadas em um PC com processador Intel(R) Core(TM) i7-3630QM CPU @ 2.40GHz, memória 6,00 GB, utilizando Windows 10 Home Single Language e Matlab R2012a. Em todas as simulações, para cada um dos cenários, a solução ótima foi encontrada em tempo inferior a dez segundos, se repetindo após 20 execuções independentes do algoritmo.

As características dos sistemas reais testados são:

- Cemig A: 2 subestações, 5 alimentadores, 703 barras, 15 setores, 132 equipamentos (116 NF e 16 NA), dos quais 117 são manuais e 15 são TLC (CARRANO et al., 2016);
- Cemig B: 3 subestações, 7 alimentadores, 21.633 barras, 42 setores, 2.808 equipamentos (2.757 NF e 51 NA), dos quais 2.768 são manuais e 40 são TLC.

5.1 Sistema CEMIG A

O sistema equivalente CEMIG A, considerando apenas equipamentos TLC, é apresentado na Figura 15. Os setores 1, 16, 9, 13 e 15 são os alimentadores, com nomeação fictícia de AL-01 a AL-05, respectivamente. Importante ressaltar que a ordenação dos setores na figura não guarda relação com suas posições em campo, sendo assim representados apenas para facilitar a visualização.

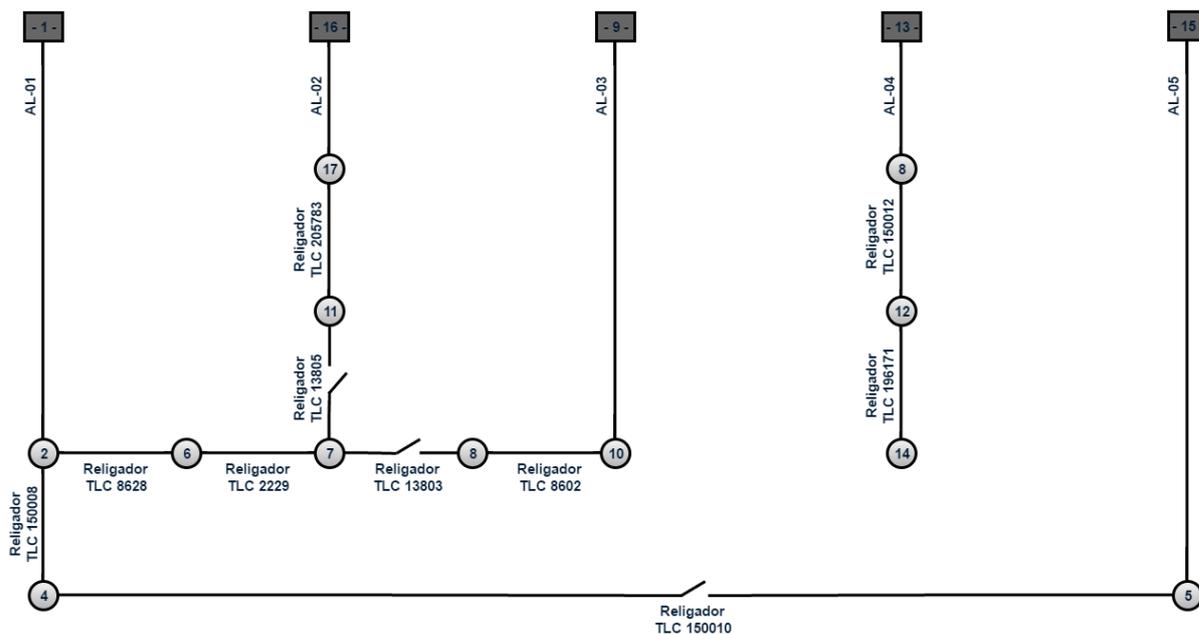


Figura 15 – Sistema CEMIG A - Apenas equipamentos TLC.

5.1.1 Caso I - Atuação de Um Único Dispositivo de Proteção

No primeiro caso, foi considerada uma falta que forçou a atuação da proteção na saída do alimentador AL-01 do sistema CEMIG A, Figura 16. Na prática, este tipo de falta é denominado bloqueio da LD, sendo muito comum na operação do sistema. Com o bloqueio do alimentador AL-01, todas as cargas desta LD têm o fornecimento interrompido, ou seja, os setores 2, 4, 6 e 7. Como as proteções são coordenadas, a falha estará localizada entre a proteção operada e os religadores 150008 e 8628: Setor 2.

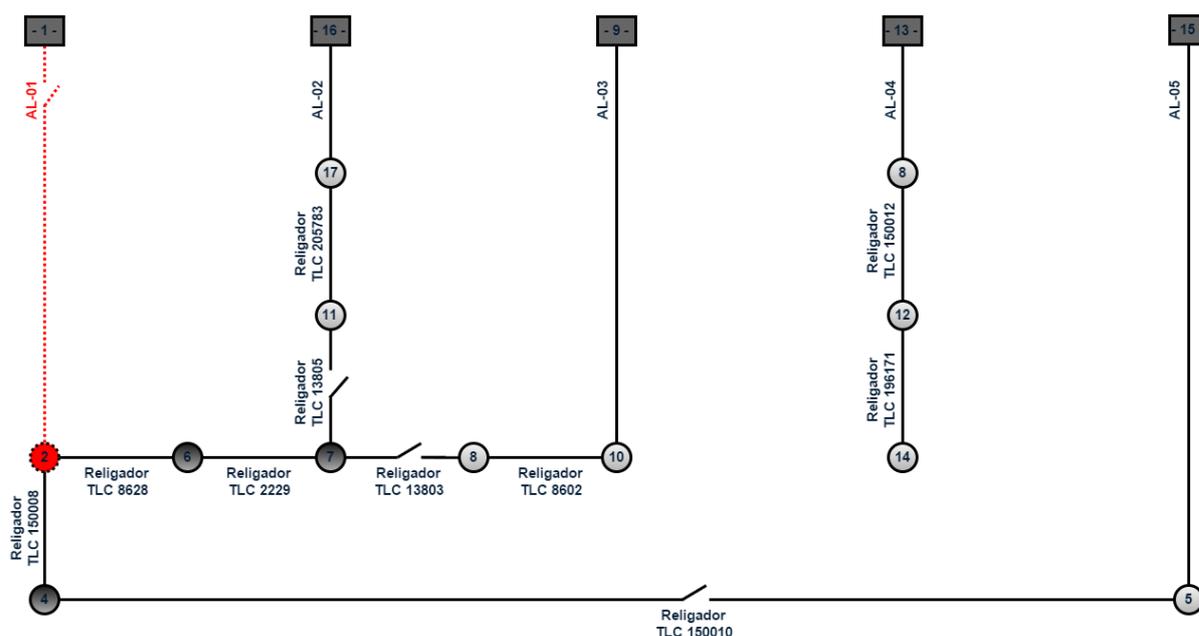


Figura 16 – Sistema CEMIG A após atuação da proteção do alimentador AL-01.

Como solução, o algoritmo retornou a seguinte sequência de manobras:

1. Abrir religador TLC 8628
2. Fechar religador TLC 13805
3. Abrir religador TLC 150008
4. Fechar religador TLC 150010

No primeiro estágio, etapas 1 e 2, são restaurados aproximadamente 72% das cargas desligadas. A implementação dessas ações é ilustrada na Figura 17. A execução do segundo estágio, etapas 3 e 4 (totalizando quatro manobras), reduz a 0% o total de cargas não restauradas. Vale ressaltar que neste caso os estágios poderiam ter sido invertidos, com o mesmo resultado final. Contudo, a sequência obtida pela ferramenta de restauração apresentada é mais interessante do ponto de vista prático, por recuperar primeiramente o maior bloco de cargas. A Figura 18 apresenta a configuração final do processo de restauração, após execução dos dois estágios da solução.

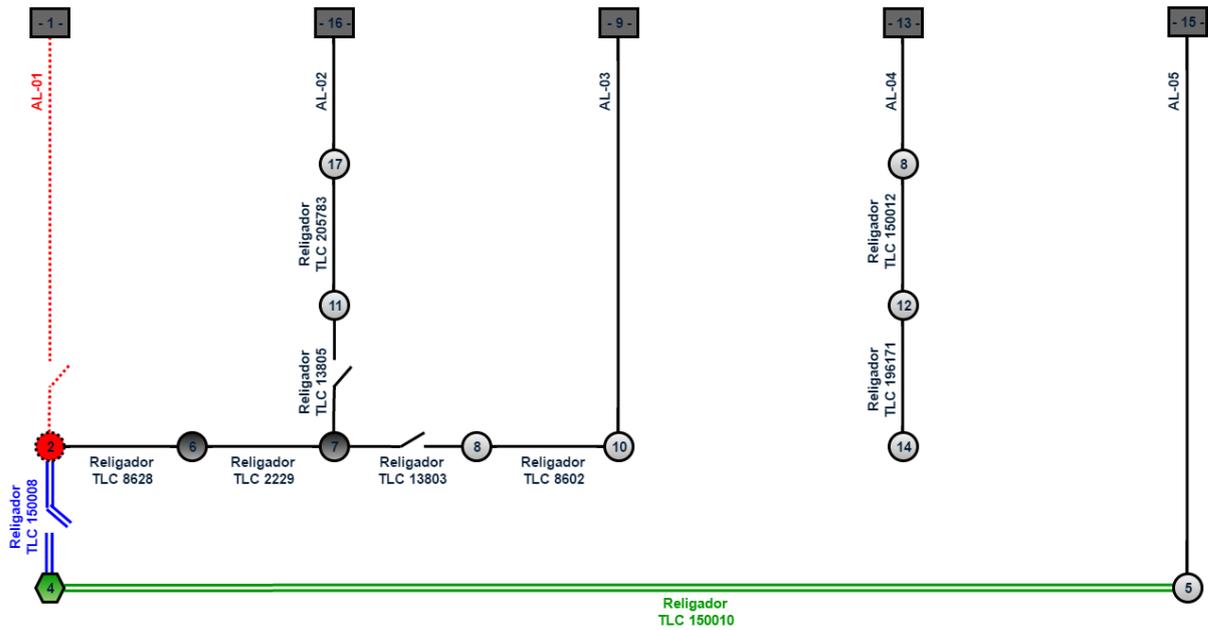


Figura 17 – Restauração do sistema CEMIG A após atuação da proteção do alimentador AL-01. Primeiro estágio implementado.

Na Figura 17, e nas demais figuras ao longo deste capítulo, linhas pontilhadas vermelhas indicam equipamento aberto por atuação da proteção, linhas contínuas duplas azuis interrompidas indicam equipamento aberto para isolar falha e, linhas contínuas duplas verdes indicam equipamento fechado para restaurar setores de carga. Círculos vermelhos - circunferência pontilhada - representam setor em falha, círculos escurecidos setores desligados, enquanto hexágonos verdes representam setores restaurados.

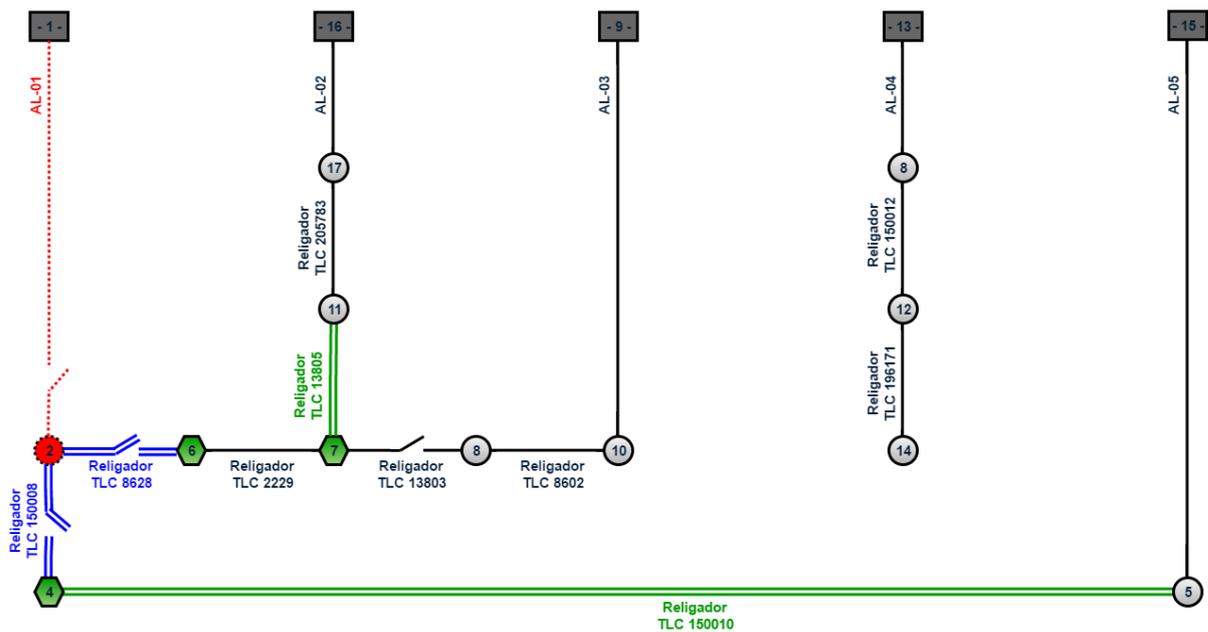


Figura 18 – Restauração do sistema CEMIG A após atuação da proteção do alimentador AL-01. Segundo estágio implementado.

Vale destacar a opção de transferência dos setores de carga 6 e 7 para o alimentador AL-02, via religador TLC 13805, em detrimento à opção de transferência para o alimentador AL-03, via TLC 13803. A princípio, a restauração desses setores via religador 13803 pode parecer factível. Contudo, restrições de limite de corrente nos cabos são violadas ao se utilizar o alimentador AL-03 como opção de contingência para restabelecimento dos setores 6 e 7. Se para o caso citado não houvesse restrições, poderia ser apresentada ao operador a opção de escolha do alimentador a receber as cargas dos setores 6 e 7, ou ainda, poderia ser implementado um critério de decisão automática do algoritmo, como, por exemplo, optar por: (i) alimentador menos carregado; (ii) melhores níveis de tensão nos barramentos; ou (iii) menores perdas de potência no sistema.

5.1.2 Caso II - Atuação de Múltiplos Dispositivos de Proteção

No segundo caso, foram consideradas as atuações das proteções dos alimentadores AL-01 e AL-03, e do religador TLC 150008.

Como resposta, o algoritmo retornou a seguinte sequência de manobras:

1. Abrir religador TLC 8628
2. Fechar religador TLC 13805

Para esse caso, a solução encontrada é composta por apenas um estágio, restaurando apenas 61% das cargas desligadas. A Figura 19 ilustra essa solução. Isso é devido ao fato do alimentador AL-02 não possuir capacidade para alimentar os setores 6, 7 e 8 simultaneamente, devido à restrição de corrente nos cabos. Analisando as possibilidades de poda, é possível concluir que para restaurar os setores 6 ou 8 é preciso, necessariamente, que o setor 7 seja restaurado. Assim, temos as possibilidade de restaurar o conjunto de setores 7-6 ou 7-8. Porém, o conjunto 7-8 também viola o critério de limite de corrente. Caso contrário, o algoritmo teria apresentado como solução o trecho que recuperasse o maior número de cargas, mesmo sendo necessário realizar um maior número de manobras. Também deve ser notado que o bloqueio do religador TLC 150008 não oferece opção para restabelecimento de cargas.

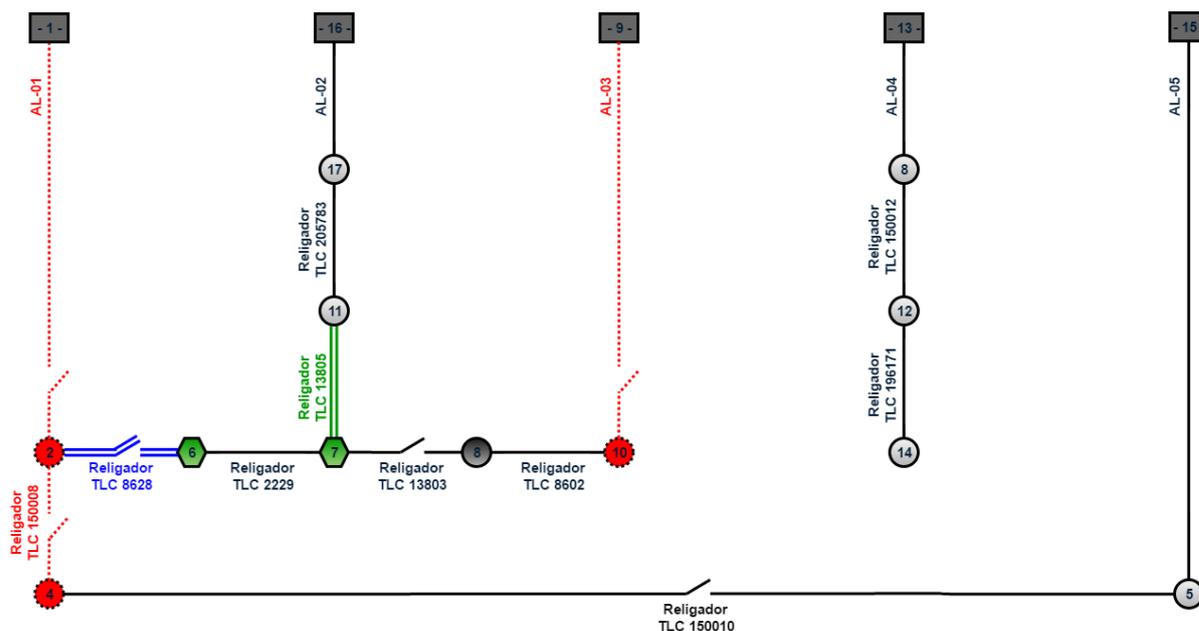


Figura 19 – Sistema CEMIG A - Atuação de múltiplos equipamentos. Caso II - Critério de sobrecarga: 10%.

A fim de comprovar a eficiência do método proposto, o critério de corrente foi relaxado para 20%, sendo, em seguida, realizado um novo teste com as mesmas considerações do teste anterior. Vale ressaltar que essa consideração é perfeitamente viável, tendo em vista que está sendo considerado o carregamento no horário de ponta dos alimentadores. Com o critério de sobrecorrente relaxado, o algoritmo encontrou uma solução composta por dois estágios, sendo restauradas aproximadamente 61% das cargas no primeiro estágio e os outros 39% no segundo estágio. A sequência de manobras dessa solução é apresentada a seguir, e ilustrada na Figura 20.

1. Abrir religador TLC 8628
2. Fechar religador TLC 13805
3. Abrir religador TLC 8602
4. Fechar religador TLC 13803

Mais uma vez, a ordem dos estágios pode ser alterada. Contudo, para o caso de alteração dessa ordem, os setores desligados seriam restaurados ao mesmo tempo, totalizando os mesmos 100% das cargas restauradas, porém, somente após a execução da sequência completa. Dessa forma, a sequência obtida pela ferramenta de restauração é, mais vez, a melhor opção para a restauração do sistema.

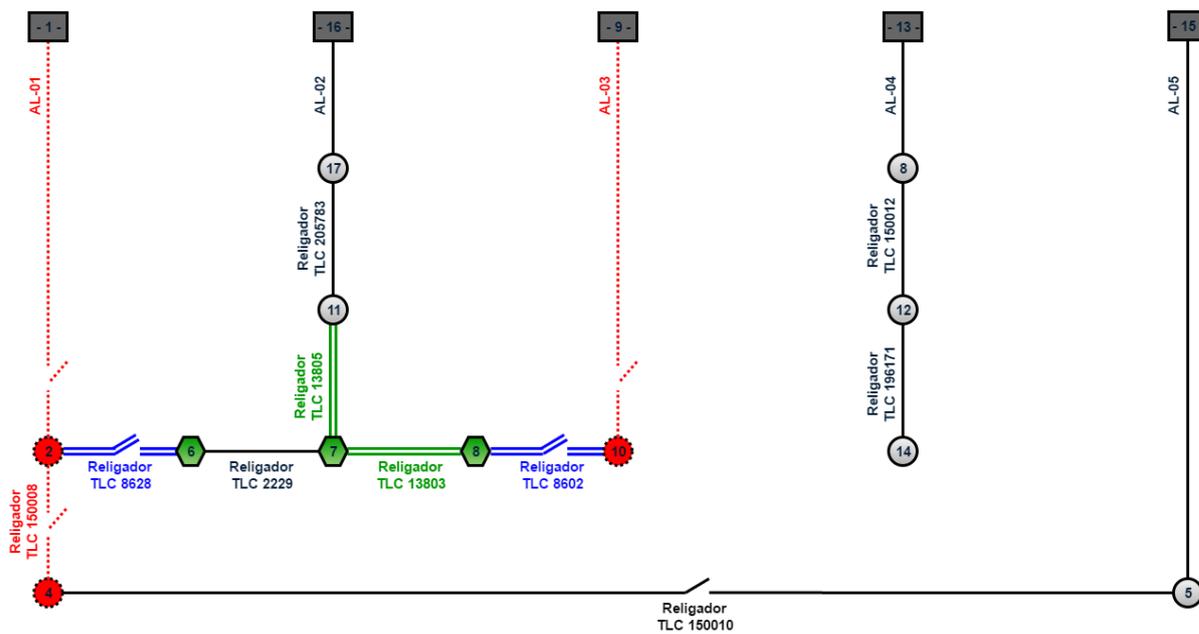


Figura 20 – Sistema CEMIG A - Atuação de múltiplos equipamentos. Caso II - Critério de sobrecarga relaxado: 20%.

5.2 Sistema CEMIG B

O sistema equivalente CEMIG B, considerando apenas equipamentos TLC, é apresentado na Figura 21. Os setores 1, 15, 19, 30, 40, 33 e 38 são as fontes dos alimentadores, com nomeação fictícia de AL-01 a AL-07, respectivamente. Novamente, a ordenação dos setores na figura não guarda relação com suas posições em campo.

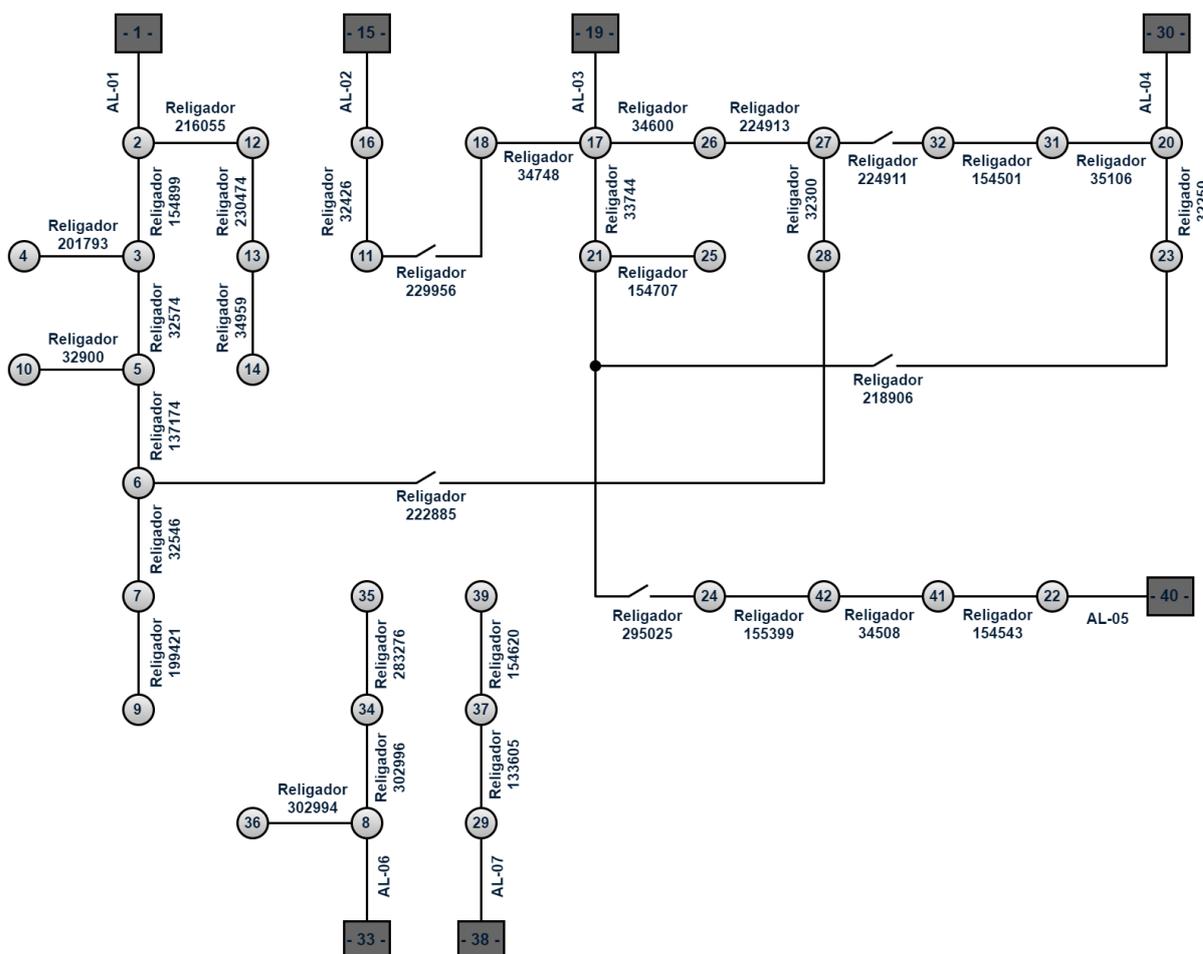


Figura 21 – Sistema CEMIG B - Apenas equipamentos TLC.

5.2.1 Caso I - Atuação de Um Único Dispositivo de Proteção

No primeiro caso, o sistema CEMIG B foi submetido à uma falha que provocou a atuação da proteção na saída do alimentador AL-03, Figura 22. Com essa falha, os setores 17, 18, 21, 25, 26, 27 e 28 foram desenergizados. Com exceção ao setor 17, no qual se encontra localizada a falha, os demais setores podem ser restaurados, observadas as restrições técnicas consideradas no problema.

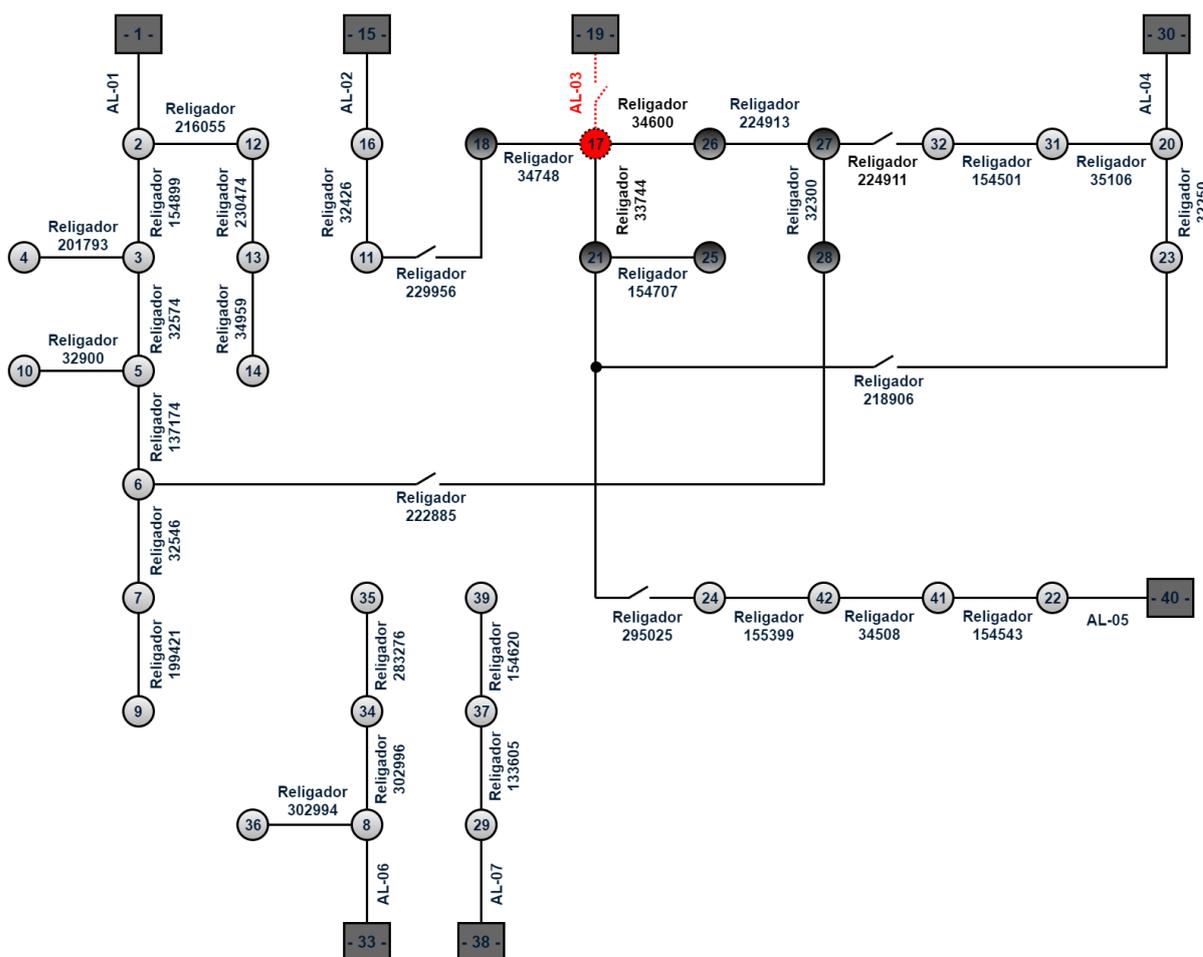


Figura 22 – Sistema CEMIG B após atuação da proteção do alimentador AL-03.

Como resposta, o algoritmo retornou a seguinte sequência de manobras:

1. Abrir religador TLC 33744
2. Fechar religador TLC 218906
3. Abrir religador TLC 34600
4. Fechar religador TLC 224911 (ou 222885)

No primeiro estágio, etapas 1 e 2, são restauradas aproximadamente 23% das cargas desligadas. A execução do segundo estágio, etapas 3 e 4, restabelece mais 19% das cargas desligadas, permanecendo desligados os outros 58% do total de cargas interrompidas.

A etapa 4 apresenta variação de resposta em diferentes execuções do algoritmo. Em algumas simulações, a solução apresenta como opção de manobra o religador TLC 224911 e, em outras, o religador 222885. Conforme mencionado anteriormente, essas situações ocorrem em casos de igualdades nas avaliações das funções de mérito f_1 e

f_2 , Equações (4.1) e (4.2), simultaneamente. Tal fato pode ser constatado verificando-se que, em ambas as opções, ocorre igualdade do número de cargas restauradas (setores 26, 27 e 28) e do número de manobras (2 manobras - etapas 3 e 4). Essa situação não deve ser considerada como erro, uma vez que as duas opções são igualmente ótimas.

Outro ponto importante, é o fato do setor 18 não ter sido restaurado. Apesar de ser uma configuração passível de ser executada, ocorre, nesta situação, a violação da restrição de sobrecorrente. Vale ressaltar que fora do horário de ponta, no qual as correntes nos alimentadores deste sistema são consideravelmente menores, essa configuração se apresenta como factível.

A Figura 23 ilustra o processo de restauração obtido como resposta, considerando o caso de utilização do religador TLC 224911 na etapa 4.

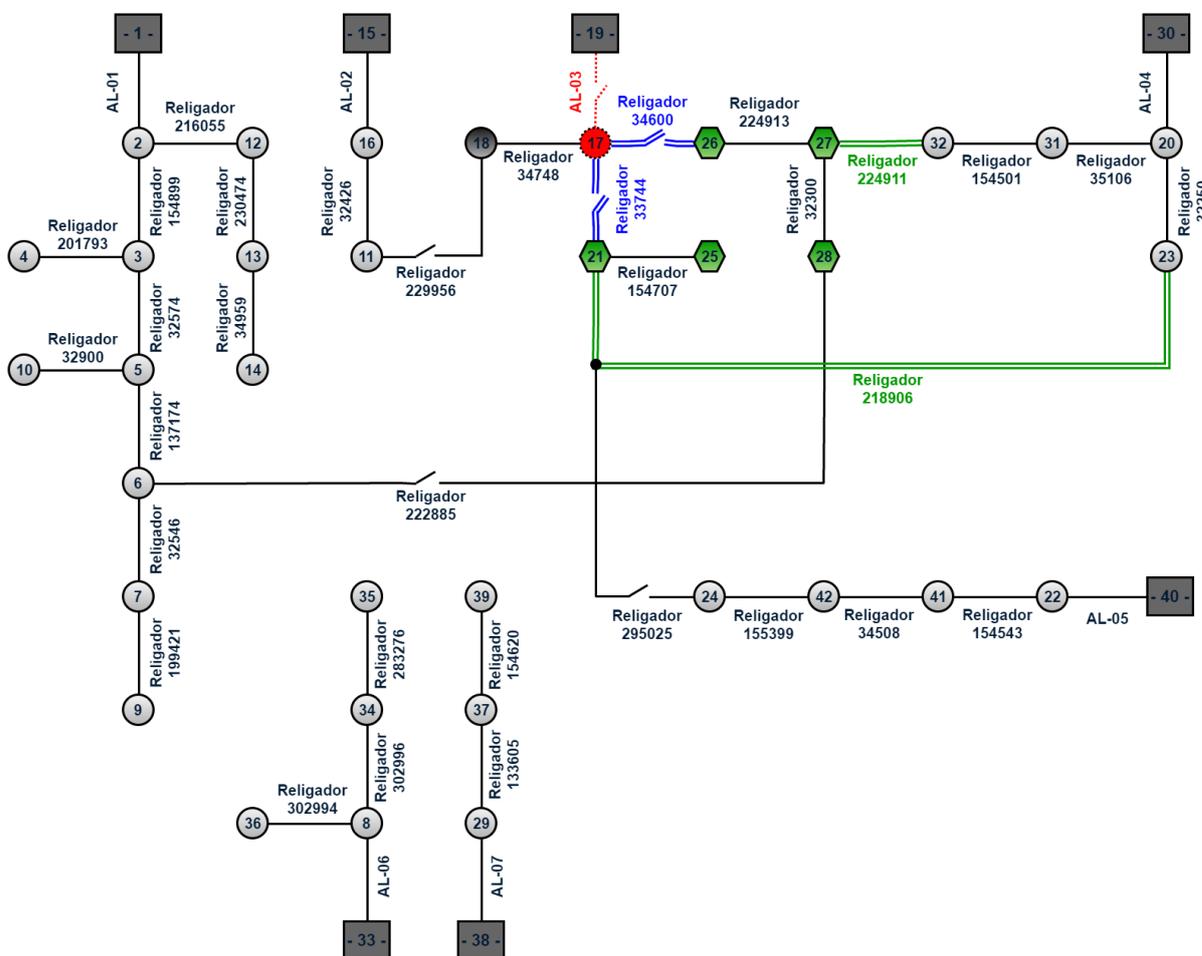


Figura 23 – Restauração do sistema CEMIG B após atuação da proteção do alimentador AL-03.

5.2.2 Caso II - Atuação de Múltiplos Dispositivos de Proteção

No segundo caso, foram consideradas atuadas as proteções dos alimentadores AL-02, AL-05 e AL-06 e dos religadores TLC 216055 e 32574. Essa situação de contingência pode ser visualizada na Figura 24. As cargas desligadas do alimentador AL-06 e dos religadores TLC 216055 e 32900 não são passíveis de restauração, uma vez que não existem equipamentos TLC N.A. como opção de transferência. Os demais setores de carga têm opções de restauração, bastando para tanto que as restrições sejam satisfeitas. Contudo, é importante notar que o alimentador AL-03 é a opção de transferência para todos os setores que possuem possibilidade de transferência.

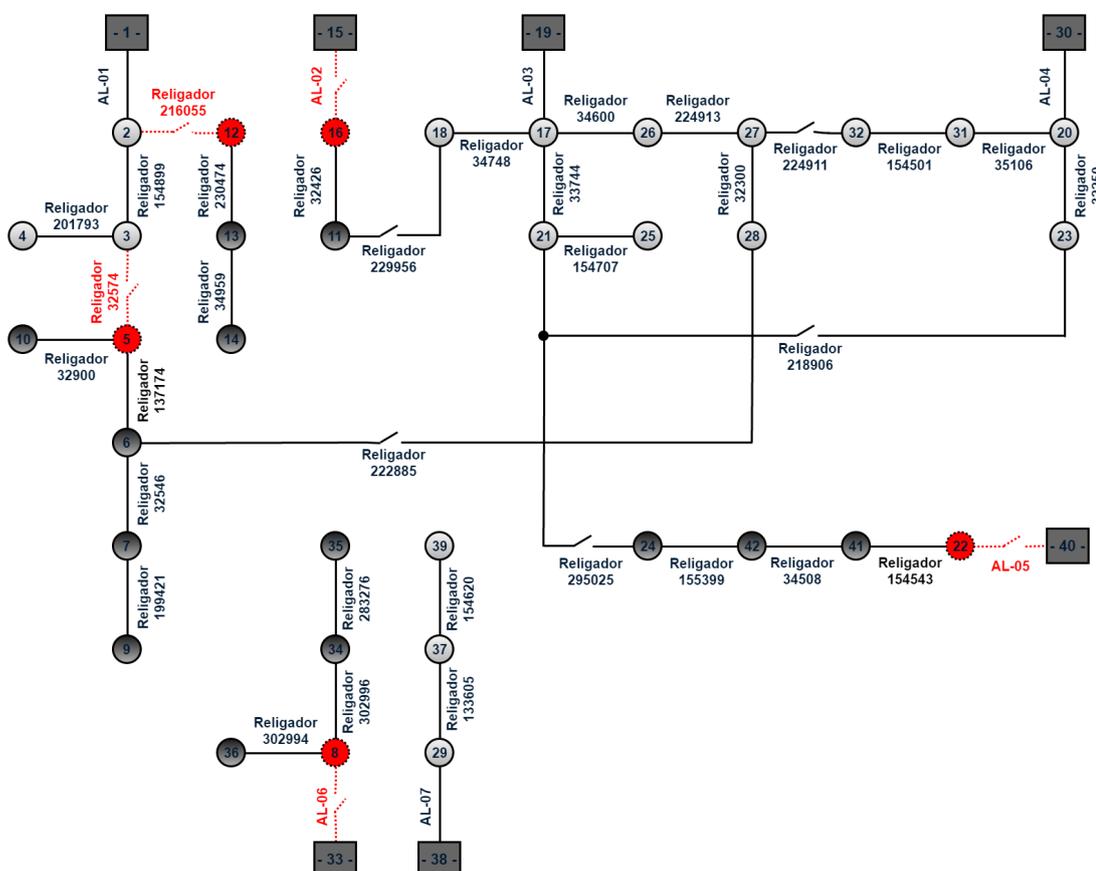


Figura 24 – Sistema CEMIG B após atuação da proteção dos alimentadores AL-02, AL-05 e AL-06 e dos religadores TLC 216055 e 32574.

Após simulações, o algoritmo retornou a seguinte sequência de manobras:

1. Abrir religador TLC 154543
2. Fechar religador TLC 295025
3. Abrir religador TLC 137174
4. Fechar religador TLC 222885

Essa sequência de manobras está ilustrada na Figura 25. No primeiro estágio são recuperados 31% das cargas desligadas, através da transferência dos setores 24, 41 e 42. Os setores 6, 7 e 9, que representam 8% das cargas interrompidas, são restaurados no segundo estágio, permanecendo desligados os outros 61%.

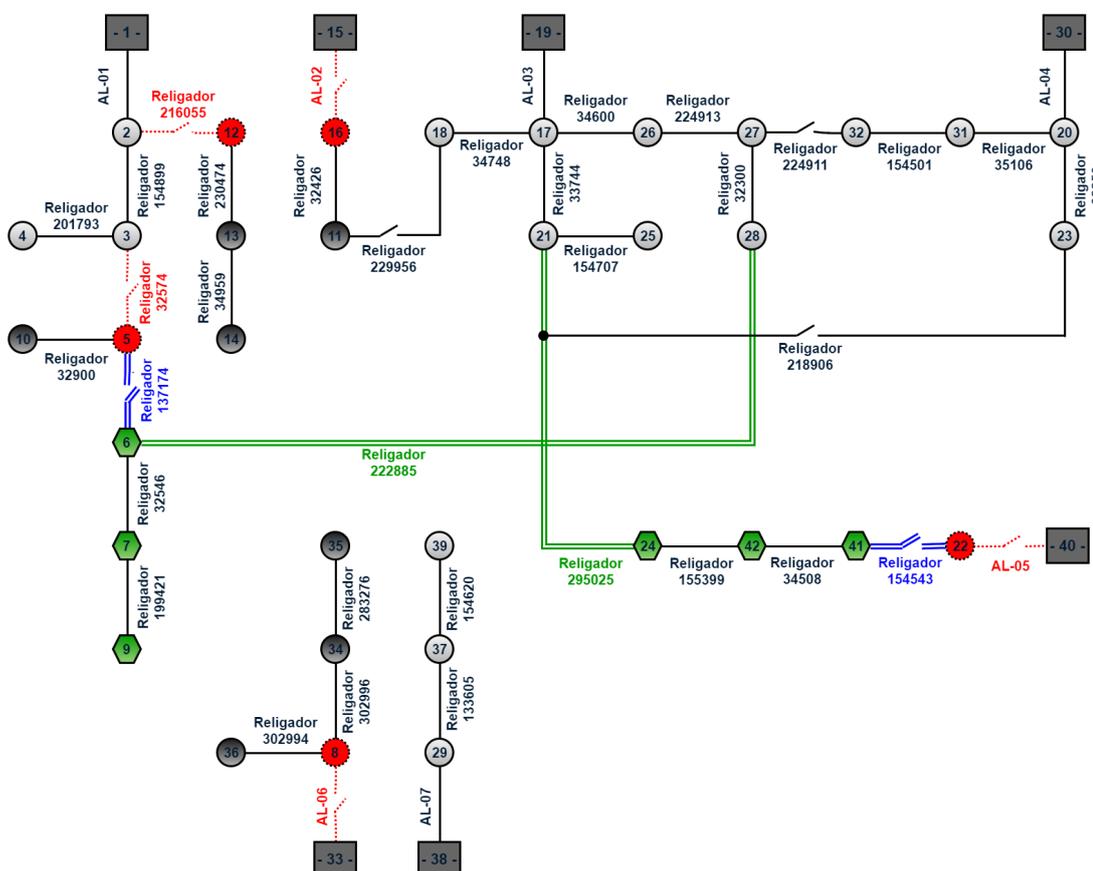


Figura 25 – Restauração do sistema CEMIG B após atuação da proteção dos alimentadores AL-02, AL-05 e AL-06 e dos religadores TLC 216055 e 32574.

Dentre os blocos a serem restaurados, o maior conjunto de cargas é formado pelos setores 24, 41 e 42, restabelecidos no primeiro estágio. O setor 11 apresenta o segundo maior conjunto de cargas, seguido pelo conjunto formado pelos setores 6, 7 e 9. Contudo, não é possível restabelecer todos os setores desligados devido a restrições de corrente e tensão no alimentador AL-03. O maior número de cargas restauradas, respeitando as restrições do sistema, é verificado com a configuração obtida como resposta do algoritmo, apresentada anteriormente e ilustrada na Figura 25.

A fim de comprovar a eficiência da metodologia proposta, os critérios de tensão e corrente foram relaxados, calculados de forma a permitirem que o setor 11 fosse restaurado, porém, com necessidade de corte de carga. Essa situação é apresentada como caso III.

5.2.3 Caso III - Atuação de Múltiplos Dispositivos de Proteção - Relaxamento das Restrições

No caso III, as restrições de sobrecorrente e limite mínimo de tensão admissível foram suficientemente relaxados a ponto de permitir que o alimentador AL-03 absorvesse cargas suficientes para restabelecer o setor 11, mas com necessidade de corte de carga. Esses critérios foram ajustados para 40% de sobrecarga e tensão mínima admissível igual a 0,6 p.u.. Com essa ação, uma nova solução tornou-se factível. Tal solução efetua corte das cargas dos blocos 7 e 9, que representam 4% das cargas desligadas, quantidade suficiente para permitir o restabelecimento do setor 11.

A sequência de manobras dessa solução é apresentada a seguir, e ilustrada na Figura 26.

1. Abrir religador TLC 154543
2. Fechar religador TLC 295025
3. Abrir religador TLC 32426
4. Fechar religador TLC 229956
5. Abrir religador TLC 137174
6. Abrir religador TLC 32546 (corte de carga)
7. Fechar religador TLC 222885

Nessa situação, a restauração do sistema é efetuada em três estágios, sendo o terceiro estágio composto por 3 manobras, etapas 5 a 7, totalizando 7 manobras. No primeiro estágio, etapas 1 e 2, são restauradas 31% das cargas, assim como no caso II. No segundo estágio, etapas 3 e 4, é feita a restauração do setor 11, que representa 18% das cargas desligadas. Finalmente, no terceiro estágio, conforme esperado, é restabelecido apenas o setor 6, sendo efetuado corte de carga através da abertura do equipamento 32546 na etapa 6, representando 3% das cargas desligadas. Ao final, 48% das cargas atingidas pelos desligamentos permanecem desligadas, porcentagem inferior aos 61% do caso II.

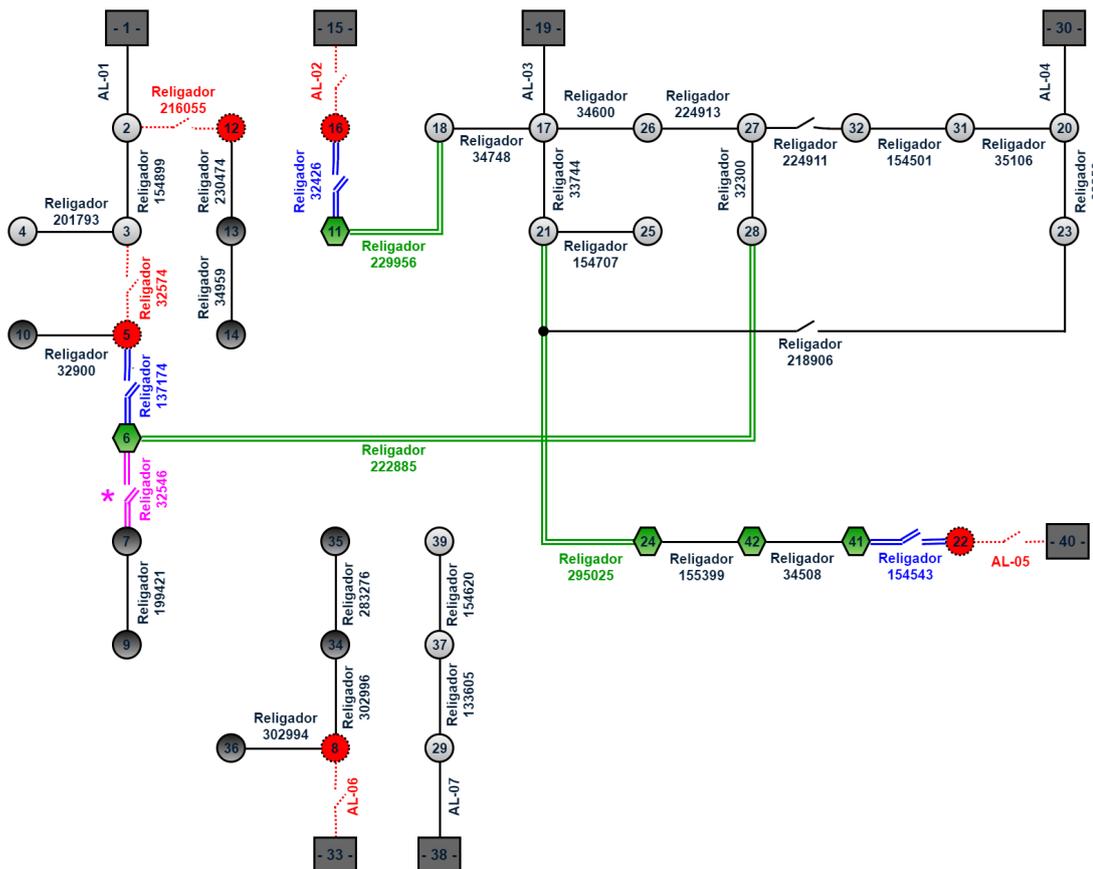


Figura 26 – Restauração do sistema CEMIG B após atuação da proteção dos alimentadores AL-02, AL-05 e AL-06 e dos relatores TLC 216055 e 32574 com relaxamento dos critérios de tensão e corrente. A linha dupla magenta interrompida (*) indica o equipamento aberto para efetuar corte de carga.

A solução apresentada no caso III, apesar de não ser implementável do ponto de vista prático, pois os critérios de relaxamento foram ajustados para além do limite aceitável, foi aqui considerada apenas para provar a eficiência da técnica proposta.

Todavia, a inclusão de Geração Distribuída - GD - no SD tem se tornado cada vez mais comum. Neste sentido, a inclusão de uma GD, estrategicamente localizada ao longo da LD neste exemplo, poderia tornar a solução factível mesmo em horário de ponta, elevando o perfil de tensão, aqui ajustado como limite de restrição para 0,6 p.u.. Contudo, a inclusão de GD também implicará em questões desfavoráveis, que merecem tratamento adequado, como, por exemplo, necessidade de alterações em ajustes de proteções, em tempo real, e mecanismos de controle mais inteligentes. Outras alternativas, como a utilização de banco de capacitores ou de reguladores de tensão, comumente utilizados pelas concessionárias de energia, também proporcionariam a elevação do perfil de tensão.

6 Considerações Finais

6.1 Conclusões

A exigência do cumprimento de metas de indicadores de continuidade, pelo lado da concessionária, e a pressão a que são expostos os técnicos dos COD, em situação de contingência, demandam o desenvolvimento de ferramentas que possam auxiliar a tomada de decisão em tempo reduzido.

A metodologia proposta neste trabalho objetiva atender às necessidades atuais das concessionárias e dos operadores das salas de controle da distribuição, auxiliando-os na tomada de decisão para restauração de sistemas de distribuição. Assim, foi apresentada uma nova metodologia para a restauração do sistema em tempo real. A partir do uso de equipamentos telecomandados e sem a necessidade do conhecimento à priori do local da falha, o que caracteriza a inovação da metodologia, o algoritmo indica qual a melhor opção para transferência imediata de cargas, respeitando a função objetivo e as restrições definidas.

Em comparação com as metodologias convencionais, destacam-se as seguintes vantagens: modelagem eficiente e adequada dos equipamentos e das redes de distribuição, considerando os diferentes tipos de equipamentos utilizados nas redes de distribuição e suas características de operação, sejam elas: (i) somente proteção, (ii) somente manobra, ou (iii) proteção e manobra; algoritmo que representa a topologia da rede considerando somente equipamentos TLC, visando a transferências imediatas, eliminando informações desnecessárias ao processo de otimização; determinação do setor em falha através de informações em tempo real disponíveis no SCADA, sem a necessidade do conhecimento à priori do local exato da falha, alterando o cenário de entrada do algoritmo de otimização e permitindo sua aplicação em uma situação que é condizente com a enfrentada pela equipe de operação nos Centros de Operação da Distribuição; modelagem do problema de restauração considerando uma função lexicográfica, combinando duas funções de mérito: (i) cargas não restauradas; e, (ii) número de manobras.

A fim de obter uma avaliação real do desempenho da ferramenta desenvolvida, foram utilizados 2 sistemas reais de grande porte da concessionária de energia CEMIG-D. O sistema CEMIG A, com 2 subestações, 5 alimentadores, 703 barras e 132 equipamentos, e o sistema CEMIG B, com 3 subestações, 7 alimentadores, 21.633 barras e 2.808 equipamentos, foram submetidos à operação de um único e de múltiplos equipamentos. Apesar de todos os dispositivos TLC presentes nos sistemas

disponibilizados serem religadores, o algoritmo foi desenvolvido para qualquer tipo de equipamento, como chaves SF6, seccionadores, entre outros.

Em todas as simulações, o algoritmo gerou as soluções esperadas no tempo inferior a 10 segundos e repetiu os resultados ao longo de 20 execuções. Os resultados obtidos comprovaram a eficiência da estratégia aqui apresentada.

Assim, a ferramenta implementada se mostrou apta a lidar com situações mais realistas, em um cenário de autorrestauração, se enquadrando perfeitamente no paradigma de *self-healing*, que vem sendo difundido como um dos pontos-chaves das *Smart Grids*.

6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Algumas possibilidades de continuidade do trabalho são sugeridas:

- considerar a inserção de geração distribuída no SD como benefício de melhoramento de perfil de tensão e injeção de potência, avaliando seus impactos, como, por exemplo, a necessidade de controle em tempo real da coordenação da proteção;
- adaptar o algoritmo para outras funcionalidades dos sistemas *self-healing*, como por exemplo supervisão e controle dos níveis de tensão nos barramentos e de corrente nos cabos e dispositivos, redução de perdas elétricas, entre outros;
- considerar a possibilidade de alívio de carga em alimentadores não atingidos por desligamentos, passando a considerar equipamentos Tipo 4 como opção de transferência de cargas em anel (sem interrupção aos setores de carga que serão aliviados).

6.3 Produção Bibliográfica

1. NOGUEIRA, C.E.R.; BOAVENTURA, W.C.; CARRANO, E.G. Ferramenta de Restauração de Redes de Distribuição com Foco no Operador do Centro de Operação da Distribuição. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*, Natal-RN, maio 2016.

Referências

- AMIN, M. Toward self-healing energy infrastructure systems. *IEEE Computer Applications in Power*, p. 20 – 28, January 2001. ISSN 0895-0156/01.
- AMIN, S. M.; WOLLENBERG, B. F. Toward a smart grid: power delivery for the 21st century. *IEEE Power and Energy Magazine*, vol: 3, n. fasc: 5, p. 34 – 41, Sept.-Oct. 2005.
- ANEEL. *Falta de energia gera R\$ 346 milhões de compensações aos consumidores em 2013*. 2014. Acesso em 16 de setembro de 2015. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticias.cfm?Identidade=7903&id_area=0>.
- ANEEL. *Indicadores de Qualidade*. 2015. Acesso em 17 de setembro de 2015. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/indicadores_de_qualidade/pesquisaGeral.cfm>.
- ANEEL. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: módulo 8 – qualidade da energia elétrica*. Brasília, 2015. Acesso em 14 de setembro de 2015. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=82>>.
- ANEEL. *Competências da ANEEL*. 2016. Acesso em 12 maio de 2016. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=710&idPerfil=3>>.
- ANEEL. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST*. 2016. Acesso em 12 maio de 2016. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/prodist>>.
- BARBOSA, C. H. N. R. *Reconfiguração e Restauração Ótima de Sistemas de Distribuição Primária de Energia Elétrica*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, dezembro 2012.
- BOARDMAN, J. T.; MECKIFF, C. C. A Branch And Bound Formulation To An Electricity Distribution Planning Problem. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 104, n. 8, p. 2112 – 2118, 1985.
- CARRANO, E. G. et al. Sub-permutation Based Evolutionary Multiobjective Algorithm for Load Restoration in Power Distribution Networks. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2016.
- CARVALHO, P. M. S.; FERREIRA, L. A. F. M.; BARRUNCHO, L. M. F. Optimization approach to dynamic restoration of distribution systems. *Electrical Power and Energy Systems*, n. 29, p. 222 – 229, 2007.
- CASTRO, C. A. *Reconfiguração automática de redes de distribuição de energia elétrica*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP, Set. 1985.
- CASTRO, C. H.; BUNCH, J. B.; TOPKA, T. M. Generalized algorithms for distribution feeder deployment and sectionalizing. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 2, p. 549 – 557, 1980.

- CAVALCANTE, P. L. et al. Centralized Self-Healing Scheme for Electrical Distribution Systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 7, n. 1, p. 145 – 155, Jan 2016.
- Centro de Gestão e Estudos Estratégicos - Ministério da Ciência Tecnologia e Inovação. *Redes Elétricas Inteligentes: contexto nacional*. 2012.
- CIVANLAR, S. et al. Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 3, n. 3, p. 1217 – 1223, 1988.
- DEB, K. et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, v. 6, n. 2, p. 182 – 197, 2002.
- DELBEM, A. C. B.; CARVALHO, A.; BRETAS, N. G. Optimal energy restoration in radial distribution systems using a genetic approach and graph chain representation. *Electric Power Systems Research*, v. 67, p. 197 – 205, 2003.
- DIMITRIJEVICA, S.; RAJAKOVIC, N. An innovative approach for solving the restoration problem in distribution networks. *Electric Power Systems Research*, v. 81, p. 1961 – 1972, 2011.
- FALCÃO, D. M. Integração de Tecnologias para Viabilização da Smart Grid. *Anais do III Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*, Belém-PA, maio 2010. Acesso em 20 de setembro de 2015. Disponível em: <http://www.eletrica.ufpr.br/odilon/te061/artigo_SMART_GRID_SBSE2010_DjalmaFalcao.PDF>.
- Federal Energy Regulatory Commission. *Assessment of Demand Response and Advanced Metering*. 2008. Disponível em: <<http://www.ferc.gov/legal/staff-reports/12-08-demand-response.pdf>>.
- GARCIA, V. J.; FRANÇA, P. M. Multiobjective service restoration in electric distribution networks using a local search based heuristic. *European Journal of Operational Research*, n. 189, p. 694 – 705, 2008.
- GHORBANI, M. J.; CHOUDHRY, M. A.; FELIACHI, A. A Multiagent Design for Power Distribution Systems Automation. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 7, n. 1, p. 329 – 339, 2016.
- HIJAZI, H.; THIÉBAUX, S. Optimal distribution systems reconfiguration for radial and meshed grids. *Electrical Power and Energy Systems*, n. 72, p. 136 – 143, 2015.
- HUANG, C.; HSIEH, C.; WANG, Y. Evolution of radial basic function neural network for fast restoration of distribution systems with load variations. *Electrical Power and Energy Systems*, n. 33, p. 961 – 968, 2011.
- HUANG, M.; CHEN, C.; LIN, C. Innovative service restoration of distribution systems by considering short-term load forecasting of service zones. *Electrical Power and Energy Systems*, v. 27, p. 417 – 427, 2005.
- HUANG, Y. C. Fault section estimation in power systems using a novel decision support system. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 17, n. 2, p. 439 – 444, 2002.
- IEA. *Technology roadmaps smart grids*. Paris, 2011. Acesso em 25 maio de 2016. Disponível em: <http://www.iea.org/papers/2011/smartgrids_roadmap.pdf>.

- IRVING, M. R.; LUAN, W. P.; DANIEL, J. S. Supply restoration in distribution networks using a genetic algorithm. *Electrical Power and Energy Systems*, v. 24, p. 447 – 457, 2002.
- KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B.; ROBBA, E. J. *Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*. Blucher, 2010. ISBN 9788521205395.
- KE, Y. Distribution feeder reconfiguration for load balancing and service restoration by using G-Nets inference mechanism. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 19, n. 3, p. 1426 – 1433, 2004.
- KO, Y. S. et al. The FRTU-based fault-zone isolation method in the distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 25, n. 2, p. 1001 – 1009, 2010.
- KUMAR, Y.; DAS, B.; SHARMA, J. Service restoration in distribution system using non-dominated sorting genetic algorithm. *Electric Power Systems Research*, v. 76, p. 768 – 777, 2006.
- LOURENÇO, H. R.; MARTIN, O. C.; STÜTZLE, T. Iterated Local Search. In: _____. *Handbook of Metaheuristics*: Kluwer Academic Publishers, 2003. v. 57, cap. 11, p. 320 – 353.
- LUAN, W. P.; IRVING, M. R.; DANIEL, J. S. Genetic algorithm for supply restoration and optimal load shedding in power system distribution networks. *IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution*, v. 149, n. 2, p. 145 – 151, 2002.
- MANTOVANI, J. ; CASARI, F. ; ROMERO, R. A. Reconfiguração de sistemas de distribuição radiais utilizando o critério de queda de tensão. *Controle and Automação*, p. 150 – 159, 2000.
- MCCALL, L. V.; CHAMBERS, B. J. Defining A Distribution System for Computer-Controlled Distribution Automation. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, n. 8, p. 2665 – 2669, 1983.
- MICHALIK, M. et al. High-impedance fault detection in distribution networks with use of wavelet-based algorithm. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 21, n. 4, p. 1793 – 1802, 2006.
- Ministério da Ciência Tecnologia e Inovação; Joint Research Centre. *Redes Elétricas Inteligentes - Diálogo Setorial Brasil-União Europeia (2014)*. [S.l.], 2014. Disponível em: <<http://www.mcti.gov.br/documents/10179/35540/Redes+El%C3%83%C2%A9tricas+Inteligentes+-+Di%C3%83%C2%A1logos+Setoriais+Brasil-Uni%C3%83%C2%A3o+Europeia/1928a060-91ff-48e2-8479-ae590f0fd9a9>>.
- MIU, K. N. et al. Fast service restoration for large-scale distribution systems with priority customers and constraints. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 13, n. 3, p. 789 – 795, 1998.
- MORELATO, A. L.; MONTICELLI, A. J. Heuristic search approach to distribution system restoration. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 4, n. 4, p. 2235 – 2241, 1989.
- NETO, W. P. M. *Restauração Automática de Redes de Distribuição de Energia Elétrica de Grande Porte com Geração Distribuída*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista - UNESP, Fevereiro 2011.

NIST. *Framework and Report the Smart Grid Interoperability Standards*. EUA, 2010. Acesso em 24 maio de 2016. Disponível em: <http://www.nist.gov/public_affairs/releases/upload/smartgrid_interoperability_final.pdf>.

OHARA, A. T. Sistema de recomposição automática de redes de distribuição – A aplicação do conceito de Self-Healing. *Anais do VI CIERTEC 2009 – Seminário Internacional sobre Smart Grid em Sistemas de Distribuição e Transmissão de Energia Elétrica*, Belo Horizonte, Out. 2009.

Presidência da República - Casa Civil - Subchefia para Assuntos Jurídicos. *DECRETO Nº 8.461*. Brasília: [s.n.], 2015. DOU. Acesso em 15 de setembro de 2015. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2015/Decreto/D8461.htm>.

PÉREZ-GUERRERO, R. et al. Optimal restoration of distribution systems using dynamic programming. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 23, n. 3, p. 1589 – 1596, 2008.

SALIM, R. H. et al. Hybrid fault diagnosis scheme implementation for power distribution systems automation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 23, n. 4, p. 1846 – 1856, 2008.

SALIM, R. H. et al. Extended fault-location formulation for power distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 24, n. 2, p. 508 – 516, 2009.

SANCHES, D. S.; JUNIOR, J. B. A. L.; DELBEM, A. C. B. Multi-objective evolutionary algorithm for single and multiple fault service restoration in large-scale distribution systems. *Electric Power Systems Research*, n. 110, p. 144 – 153, 2014.

SHIN, D. et al. Optimal service restoration and reconfiguration of network using genetic tabu algorithm. *Electric Power Systems Research*, v. 71, p. 145 – 152, 2004.

SINGH, S. P. et al. A heuristic method for feeder reconfiguration and service restoration in distribution networks. *Electrical Power and Energy Systems*, v. 31, p. 309 – 314, 2009.

STADLIN, W. O.; D., M. A. Computational Techniques for an Electrical Distribution and Information Control System. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, n. 2, p. 356 – 362, 1982.

STÜTZLE, T. G. *Local Search Algorithms for Combinatorial Problems - Analysis, Improvements, and New Applications*. Tese (Doutorado) — Technischen Universität Darmstadt, Darmstadt, Dezember 1998.

SUDHAKAR, T. D. Power Restoration in Distribution Network Using MST Algorithms, *New Frontiers in Graph Theory*. 2012.

THUKARAM, D.; KHINCHA, H. P.; VIJAYNARASIMHA, H. P. Artificial neural network and support vector machine approach for locating faults in radial distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 2, p. 710 – 721, 2005.