Paulo César Magalhães Meira

Análise da Filosofia de Eliminação de Defeitos em Sistemas de Distribuição Considerando Aspectos de Confiabilidade e de Qualidade de Energia

CAMPINAS
2014

Universidade Estadual de Campinas

Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Paulo César Magalhães Meira

Análise da Filosofia de Eliminação de Defeitos em Sistemas de Distribuição Considerando Aspectos de Confiabilidade e de Qualidade de Energia

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica, na área de Energia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Walmir de Freitas Filho

Este exemplar corresponde à versão final da tese defendida pelo aluno Paulo César Magalhães Meira, e orientada pelo Prof. Dr. Walmir de Freitas Filho.

Campinas
2014

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

M478a

Meira, Paulo César Magalhães, 1985-
Análise da filosofia de eliminação de defeitos em sistemas de distribuição considerando aspectos de confiabilidade e de qualidade de energia / Paulo César Magalhães Meira. – Campinas, SP : [s.n.], 2014.

Orientador: Walmir de Freitas Filho.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Sistemas de energia elétrica - Distribuição. 2. Sistemas de energia elétrica - Confiabilidade. 3. Energia elétrica - Distribuição - Controle de qualidade. 4. Processamento de dados. 5. Otimização. I. Freitas Filho, Walmir de,1971-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Analysis of the fault-clearing policies in power distribution systems from power quality and reliability perspectives
Palavras-chave em inglês:
Electric power distribution
Power systems - Reliability
Electricity - Distribution - Quality control
Data processing
Optimization
Área de concentração: Energia Elétrica
Titulação: Doutor em Engenharia Elétrica
Banca examinadora:
Walmir de Freitas Filho [Orientador]
Carmen Lucia Tancredo Borges
Delberis Araujo Lima
Rubén Augusto Romero Lázaro
Madson Cortes de Almeida
Data de defesa: 26-06-2014
Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE DOUTORADO

Candidato: Paulo César Magalhães Meira

Data da Defesa: 26 de junho de 2014

Título da Tese: "Análise da Filosofia de Eliminação de Defeitos em Sistemas de Distribuição Considerando Aspectos de Confiabilidade e de Qualidade de Energia"

Prof. Dr. Walmir de Freitas Filho (Presidente): _____

Profa. Dra. Carmen Lucia Tancredo Borges: _____

Prof. Dr. Delberis Araujo Lima: _____

Prof. Dr. Rubén Augusto Romero Lazaro: _____

Prof. Dr. Madson Cortes de Almeida: _____

Abstract

The fault elimination policy used by an electric energy distribution utility has great impact on the reliability and in the power quality of the system. For example, the policy of using automatic reclosers typically has a positive impact in the reliability indices based on frequency and duration of sustained interruptions but, on the other hand, has a negative impact on the power quality indices based on the frequency of temporary interruptions. This can be verified by the number of utilities around the world that are reevaluating their policies in using automatic reclosers in a generalized fashion as the customers demand better power quality. At the same time, the systems are being modernized, including the usage of more monitoring and automation equipment, such as automatic sectionalizing switches, digital relays, etc., in a context that is usually called smart grids. Therefore, currently, the policies regarding fault elimination and improvement of the reliability and power quality indices in distribution system are being reformulated and have attracted the interest of the academic and technology communities.

The objective of this thesis is to develop methods to assist in the decision-making process on the fault elimination policies in distribution systems using the integrated evaluation of reliability and power quality indices. The methods are based on the use of historical records and utility measurements, in the computation of reliability and power quality indices, in optimization techniques and statistical analysis.

To achieve the implementation of the methods in actual systems, the classic algorithms used to analyze the reliability and power quality are revisited and reformulated in order to allow their application to large-scale systems in feasible running time. Alternatives to allow the parallel and distributed execution of the main algorithms of the proposed methods are also explored.

Keywords: electric power distribution, power systems - reliability, electricity - distribution - quality control, data processing, optimization.

Resumo

A estratégia de eliminação de defeitos (faltas) empregada pela concessionária de distribuição de energia elétrica tem grande impacto na confiabilidade e na qualidade de energia do sistema. Por exemplo, a política de empregar religadores automáticos tipicamente tem um impacto benéfico nos índices de confiabilidade baseados na frequência e duração das interrupções sustentadas mas, por outro lado, tem um impacto negativo nos índices de qualidade de energia baseados na frequência de interrupções temporárias. Isto pode ser comprovado pelo número de concessionárias ao redor do mundo que estão revendo suas estratégias de empregar religadores automáticos de forma generalizada conforme cresce a preocupação do consumidor com a qualidade de energia. Somado a isso, tem-se o fato de o sistema estar sendo modernizado com o uso de mais equipamentos de monitoração e automação, como chaves seccionadoras automáticas, relés digitais, etc., dentro do contexto que se convencionou chamar redes inteligentes (*smart grids*). Portanto, atualmente, as estratégias de eliminação de faltas e de melhoria dos índices de confiabilidade e de qualidade de energia em sistemas de distribuição estão passando por modificações e têm atraído o interesse da comunidade científica e tecnológica.

Este trabalho tem como objetivo desenvolver métodos para auxiliar na tomada de decisão sobre a estratégia de eliminação de defeitos em sistemas de distribuição via avaliação integrada dos índices de confiabilidade e qualidade de energia. Os métodos empregados são baseados no uso de registros históricos e de medições da concessionária, no cálculo de índices de confiabilidade e de qualidade de energia e em técnicas de otimização e de tratamentos estatísticos.

Para permitir o emprego dos métodos a sistemas reais, algoritmos clássicos para análise de confiabilidade e qualidade de energia são revisitados e reformulados de forma a permitir sua aplicação a sistemas de grande porte em tempo de execução factível. São investigadas também formas de permitir a execução paralela e distribuída dos principais algoritmos empregados nos métodos propostos.

Palavras-chave: sistemas de energia elétrica - distribuição, sistemas de energia elétrica - confiabilidade, energia elétrica - distribuição - controle de qualidade, processamento de dados, otimização.

Sumário

Agradecimentos **xv**

1 Introdução **1**
1.1 Definição do problema . . . 2
1.2 Organização desta tese . . . 3

2 Confiabilidade e qualidade de energia **5**
2.1 Interrupções momentâneas e sustentadas . . . 5
2.1.1 Definições de interrupções momentâneas e sustentadas . . . 5
2.1.2 Causas de interrupções de energia elétrica . . . 6
2.1.3 Índices para avaliar as interrupções . . . 7
2.1.4 Conflito entre os dois tipos de interrupções . . . 8
2.1.5 Comentários . . . 9
2.2 Fatos e dados relacionados a interrupções momentâneas . . . 9
2.2.1 Impacto das interrupções momentâneas . . . 10
2.2.2 Custo associado às interrupções momentâneas . . . 12
2.2.3 Expectativas dos consumidores em relação a qualidade de energia e confiabilidade . . . 17
2.2.4 Experiência das concessionárias de energia elétrica . . . 18
2.2.5 Práticas regulatórias . . . 19
2.2.6 Características das faltas temporárias e permanentes . . . 21
2.2.7 Métodos para avaliar níveis de qualidade de energia e confiabilidade de sistemas com religamento automático . . . 22
2.3 Comentários . . . 24

3 Processamento de dados históricos de interrupções **27**
3.1 Dados fornecidos . . . 27
3.2 Metodologia de processamento . . . 28
3.2.1 Detalhamento . . . 31
3.2.2 Estimativa da razão entre faltas permanentes e temporárias . . . 38
3.2.3 Índice de eficiência da operação do religador . . . 38
3.3 Resultados . . . 39
3.3.1 Razão entre faltas permanentes e temporárias . . . 39

3.3.2 Índice de eficiência do religador . . . 39
3.4 Comentários . . . 46

4 Análise da confiabilidade de redes de distribuição operadas radialmente 47
4.1 Operação radial . . . 48
4.2 Grafos . . . 48
4.2.1 Representação em grafo para análise da confiabilidade . . . 49
4.2.2 Busca em profundidade (DFS) . . . 50
4.3 Formulação clássica do algoritmo de simulação analítica . . . 51
4.4 Formulação aprimorada do algoritmo de simulação analítica . . . 53
4.4.1 Complexidade de espaço computacional . . . 54
4.4.2 As etapas do algoritmo . . . 54
4.4.3 Diferentes políticas de restauração . . . 56
4.4.4 Reutilização da DFS . . . 57
4.5 Aplicação a sistemas de pequeno porte . . . 58
4.5.1 Comparação do tempo de execução . . . 67
4.6 Aplicação a um sistema de grande porte . . . 67
4.6.1 Simulação analítica . . . 70
4.7 Comentários . . . 71

5 Alocação de dispositivos de proteção 73
5.1 Função objetivo . . . 73
5.2 Análise exaustiva . . . 74
5.2.1 Amostragem de posições . . . 75
5.2.2 Análise exaustiva de um sistema de grande porte . . . 76
5.3 Método incremental para alocação de religadores . . . 88
5.3.1 Exemplo de aplicação em sistema de grande porte . . . 89
5.4 Algoritmo genético . . . 92
5.4.1 Codificação dos indivíduos . . . 93
5.4.2 População inicial . . . 94
5.4.3 Cálculo da função objetivo . . . 95
5.4.4 Seleção . . . 95
5.4.5 Recombinação . . . 95
5.4.6 Mutação . . . 95
5.4.7 Migração . . . 96
5.4.8 Critérios de parada e renovação parcial da população . . . 96
5.4.9 Validação em um sistema de grande porte . . . 96
5.5 Estudo de caso: realocação com remoção de *fuse saving* da subestação . . . 97
5.6 Comentários . . . 100

6 Conclusões 103
6.1 Ferramenta integrada . . . 104
6.2 Possíveis trabalhos futuros . . . 104

Referências **107**

A Exemplo: impacto do uso de religadores automáticos nos índices de confiabilidade e qualidade de energia **115**
A.1 Rede teste . . . 115
A.2 Impacto do número de religadores . . . 117
A.2.1 Um religador . . . 117
A.2.2 Dois religadores . . . 118
A.2.3 Três e quatro religadores . . . 118
A.3 Impacto do local de instalação do religador . . . 121
A.3.1 Um religador . . . 121
A.3.2 Dois religadores . . . 123
A.3.3 Análise de sensibilidade . . . 126
A.4 Comentários . . . 131

B Métodos paralelos para sistemas de grande porte **133**
B.1 Considerações gerais . . . 134
B.1.1 Tecnologias para paralelização . . . 139
B.1.2 Exploração de processadores gráficos . . . 140
B.1.3 Computação distribuída . . . 141
B.2 Perfil de execução paralela . . . 142
B.2.1 OpenMP . . . 142
B.2.2 OpenCL . . . 143
B.3 Perfil de execução distribuída . . . 144
B.4 Comentários . . . 145

C Ambiente de trabalho **147**

D Publicações **149**

Agradecimentos

- Ao professor Dr. Walmir de Freitas Filho pela orientação;
- Ao professor Dr. Wilsun Xu pela oportunidade de estágio na Universidade de Alberta;
- Aos professores e colegas do Departamento de Sistemas de Energia Elétrica e da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP;
- Aos professores da comissão julgadora pelos comentários e sugestões que viabilizaram a versão final deste documento;
- À minha família;
- À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

Lista de Ilustrações

1.1 Impacto dos religadores automáticos no número de interrupções momentâneas e sustentadas. 2

2.1 Classificação das interrupções com base em diferentes normas técnicas. 6
2.2 Custo total das interrupções (de curta e longa duração) descrito em diferentes estudos. 13
2.3 Custo decorrente das interrupções momentâneas e sustentadas. 13
2.4 Estimativa do custo decorrente das interrupções de energia para três setores. 14
2.5 Estimativa do custo das interrupções de energia para diferentes setores. 15
2.6 Número aceitável de interrupções sustentadas (com duração de 1 a 4 horas). 18
2.7 Número aceitável de interrupções momentâneas (com duração entre 1 e 2 segundos). 18
2.8 Dispositivos e níveis do sistema considerados para o relatório de interrupções sustentadas. 19
2.9 Dispositivos e níveis do sistema considerados para o relatório de interrupções momentâneas. 20
2.10 Porcentagem de faltas que são temporárias. 22

3.1 Relação entre os dados do OMS e dos sensores e a classificação dos eventos. 30
3.2 Diferença entre operações que evitam a queima de fusíveis (*fuse saving*) e aquelas que não evitam considerando apenas faltas temporárias. 31
3.3 Comparação em termos "sustentado", "progressivo sustentado" e "momentâneo". . . 31
3.4 Visão geral do processamento dos dados. 32
3.5 Combinação dos eventos dos sensores 33
3.6 Casamento de interrupções registradas pelos sensores e no OMS. 34
3.7 Combinação de interrupções ainda não associadas. 35
3.8 Exemplos de eventos classificados, onde os retângulos tracejados representam eventos (grupos de registros de interrupções) e os retângulos sólidos, preenchidos em cinza escuro, representam os registros de interrupções. 36
3.9 Um evento de interrupção, seus dados associados e classificação no tipo mais adequado através de sua inspeção. 36
3.10 Porcentagem das faltas do tipo temporárias ao longo dos meses, nos cinco anos estudados. 42
3.11 Histograma e ajuste (distribuição normal) da porcentagem das faltas do tipo temporárias no período estudado. 42
3.12 Índice R_{ef} calculado ao longo dos meses, nos cinco anos estudados. 42

3.13 Histograma do índice R_{ef} e ajuste (distribuição normal) no período estudado. . . . 45

4.1 Representação de um sistema (esquerda) como um grafo para análise de confiabilidade (direita). . . . 49
4.2 Operação realizada na presença de uma chave normalmente aberta para manter a estrutura como árvore. . . . 50
4.3 Fluxograma do algoritmo de DFS partindo de um nó n do grafo G. . . . 51
4.4 Fluxograma geral do algoritmo clássico. . . . 52
4.5 Detalhamento da etapa "Simulação das falhas e interrupções" da Figura 4.4. . . . 52
4.6 Fluxograma do algoritmo aprimorado. . . . 53
4.7 Diagrama de um sistema fictício de dimensão reduzida. . . . 58
4.8 Grafo do sistema exemplo para a análise de confiabilidade. . . . 59
4.9 Legenda dos componentes mostrados nos diagramas georreferenciados. . . . 68
4.10 Sistema de grande porte avaliado neste capítulo. . . . 69
4.11 Ampliação da região central da Figura 4.10. . . . 69
4.12 Tempo de simulação da formulação aprimorada de simulação analítica em função do número de nós. . . . 70

5.1 Função objetivo resultante da alocação de um religador em cada posição candidata: sem amostragem. . . . 77
5.2 Função objetivo resultante da alocação de um religador em cada posição candidata: tolerância de 0,01%. . . . 77
5.3 Função objetivo resultante da alocação de um religador em cada posição candidata: tolerância de 0,05%. . . . 78
5.4 Função objetivo resultante da alocação de um religador em cada posição candidata: tolerância de 0,5%. . . . 78
5.5 Função objetivo resultante da alocação de um religador em cada posição candidata: tolerância de 1,0%. . . . 78
5.6 Melhor posição de alocação de 1 religador com amostragem empregando tolerância de 1,0%. . . . 79
5.7 Posição de alocação ótima de 1 religador (sem amostragem e tolerâncias de 0,01%, 0,05%, 0,5%). . . . 79
5.8 SAIFI resultante da alocação de um religador em cada posição candidata: sem amostragem. . . . 80
5.9 SAIFI resultante da alocação de um religador em cada posição candidata: tolerância de 0,05%. . . . 80
5.10 MAIFI resultante da alocação de um religador em cada posição candidata: sem amostragem. . . . 80
5.11 MAIFI resultante da alocação de um religador em cada posição candidata: tolerância de 0,05%. . . . 81
5.12 Função objetivo resultante da alocação de 2 religadores, espaço de busca amostrado com tolerância de 0,5%. . . . 83

5.13 Função objetivo resultante da alocação de 2 religadores, espaço de busca amostrado com tolerância de 0,05%. 83
5.14 SAIFI resultante da alocação de 2 religadores, espaço de busca amostrado com tolerância de 0,5%. 84
5.15 SAIFI resultante da alocação de 2 religadores, espaço de busca amostrado com tolerância de 0,05%. 84
5.16 MAIFI resultante da alocação de 2 religadores, espaço de busca amostrado com tolerância de 0,5%. 85
5.17 MAIFI resultante da alocação de 2 religadores, espaço de busca amostrado com tolerância de 0,05%. 85
5.18 Histograma dos valores da função objetivo da alocação exaustiva de 2 religadores, espaço de busca amostrado com tolerância de 0,5%. 86
5.19 Histograma dos valores da função objetivo da alocação exaustiva de 2 religadores, espaço de busca amostrado com tolerância de 0,05%. 86
5.20 Par de posições ótimas para alocação de 2 religadores, com tolerância de amostragem de 0,5%. 87
5.21 Par de posições ótimas para alocação de 2 religadores, com tolerância de amostragem de 0,05%. 87
5.22 Método heurístico incremental para alocação de dispositivos. 89
5.23 Função objetivo para a alocação de 2 religadores, tolerância de 0,05%, empregando o método incremental. 90
5.24 SAIFI para a alocação de 2 religadores, tolerância de 0,05%, empregando o método incremental. 90
5.25 MAIFI para a alocação de 2 religadores, tolerância de 0,05%, empregando o método incremental. 91
5.26 Método incremental: alocação de 6 religadores, tolerância de 0,05%. 91
5.27 Método incremental: MAIFI com peso 3, alocação de 6 religadores, tolerância de 0,05%. 91
5.28 Fluxograma do algoritmo genético. 93
5.29 Representação de um indivíduo. 94
5.30 Exemplo da representação de 6 posições candidatas utilizando 3 bits. 94
5.31 Método incremental: MAIFI com peso 5, alocação de 6 religadores no Alimentador 2, tolerância de 0,01% para amostragem. 98
5.32 A solução de melhor qualidade encontrada pelo algoritmo genético. 99
5.33 Ampliação da Figura 5.32 em torno do religador central. 99
5.34 Uma das soluções alternativas, de pior qualidade, encontrada ao longo da evolução pelo algoritmo genético. 100

A.1 Configuração de um alimentador urbano simplificado. 116
A.2 Caso base após a instalação de um religador. 117
A.3 Caso base após a instalação de dois religadores. 118
A.4 Impacto do número de religadores no SAIDI. 119
A.5 Impacto do número de religadores no SAIFI. 119

A.6 Impacto do número de religadores no MAIFI. 120
A.7 Impacto da posição de um religador no índice SAIDI. 121
A.8 Impacto da posição de um religador no índice SAIFI. 122
A.9 Impacto da posição de um religador no índice MAIFI. 122
A.10 Soma dos três índices (SAIDI, SAIFI e MAIFI) após normalização. 122
A.11 Soma dos índices SAIFI e MAIFI após normalização. 123
A.12 Valores do SAIDI para diferentes posições dos dois religadores. 123
A.13 Valores do SAIFI para diferentes posições dos dois religadores. 124
A.14 Valores do MAIFI para diferentes posições dos dois religadores. 124
A.15 Soma dos três índices após normalização. 125
A.16 Soma dos índices SAIFI e MAIFI após normalização. 125
A.17 Sensibilidade de SAIFI em função da taxa de falha temporária. 126
A.18 Sensibilidade de MAIFI em função da taxa de falha temporária. 127
A.19 Sensibilidade de SAIDI em função da taxa de falha permanente. 127
A.20 Sensibilidade de SAIFI em função da taxa de falha permanente. 128
A.21 Sensibilidade de MAIFI em função da taxa de falha permanente. 128
A.22 Sensibilidade de SAIDI em função do tempo de chaveamento. 129
A.23 Sensibilidade de SAIDI em função do tempo de reparo. 129
A.24 Sensibilidade de SAIDI em função da distribuição dos consumidores. 130
A.25 Sensibilidade de SAIFI em função da distribuição dos consumidores. 130
A.26 Sensibilidade de MAIFI em função da distribuição dos consumidores. 131

B.1 Possível laço serial para simulação analítica de múltiplas configurações candidatas. . 135
B.2 Possível laço para simulação analítica de múltiplas configurações candidatas em paralelo. 136
B.3 Possível laço para simulação analítica de múltiplas configurações candidatas, com simulação paralela de falhas. 137
B.4 Possível laço para simulação analítica de múltiplas configurações candidatas de forma paralela, com simulação paralela de falhas também paralela. 138
B.5 Descrição em alto nível da arquitetura de distribuição de tarefas implementada. . . 142

Lista de Tabelas

2.1 Índices de confiabilidade utilizados para caracterizar interrupções de energia elétrica. 8
2.2 Durações de interrupção de energia consideradas inaceitáveis para plantas industriais. 12
2.3 Durações de interrupção de energia consideradas inaceitáveis para instalações comerciais. 12
2.4 Custo (€) decorrente dos impactos nos níveis de qualidade de energia para diferentes eventos ([24]). 14
2.5 Valor que os consumidores residenciais estariam dispostos a pagar para evitar interrupções. 18
2.6 Causas comuns das faltas temporárias e permanentes. 21
2.7 Estimativa de custos associados às interrupções momentâneas e sustentadas (com duração de 2 horas) para diferentes classes de consumidores dos EUA ([26]). 24

3.1 Razão entre faltas permanentes e temporárias para o ano de 2004. 40
3.2 Razão entre faltas permanentes e temporárias para o ano de 2005. 40
3.3 Razão entre faltas permanentes e temporárias para o ano de 2006. 40
3.4 Razão entre faltas permanentes e temporárias para o ano de 2007. 41
3.5 Razão entre faltas permanentes e temporárias para o ano de 2008. 41
3.6 Número de eventos por tipo e índice de eficiência do regulador para o ano de 2004. . 43
3.7 Número de eventos por tipo e índice de eficiência do regulador para o ano de 2005. . 43
3.8 Número de eventos por tipo e índice de eficiência do regulador para o ano de 2006. . 44
3.9 Número de eventos por tipo e índice de eficiência do regulador para o ano de 2007. . 44
3.10 Número de eventos por tipo e índice de eficiência do regulador para o ano de 2008. . 45
3.11 Parâmetros adotados. 45

4.1 Dados do sistema fictício de dimensão reduzida utilizado no exemplo passo-a-passo. 59
4.2 Dados de cada nó do grafo já preparados para análise. 59
4.3 Resultado da busca de elementos de proteção para o sistema exemplo. 63
4.4 Interrupções sustentadas (número, duração) a partir de cada nó do grafo para o sistema exemplo. 65
4.5 Número de interrupções momentâneas a partir de cada nó do grafo para o sistema exemplo. 66
4.6 Interrupções por ano finais após propagação pelo grafo. 66
4.7 Tempo de simulação para a análise de 496 cenários de um sistema reduzido. 67
4.8 Principais dados do sistema. 68

4.9 Tempo de simulação médio para diversas combinações de alimentadores. 70

5.1 Número de nós selecionados para diferentes parâmetros de tolerância de amostragem incremental MAIFI-SAIFI. 76
5.2 Síntese dos resultados dos testes do algoritmo genético com três valores de tolerância de amostragem e 10 sementes aleatórias. 97

A.1 Parâmetros do alimentador em estudo. 116
A.2 Valores dos principais índices de confiabilidade para diferentes configurações do sistema teste. 117
A.3 Valores dos índices de confiabilidade após a inclusão de um religador no meio do alimentador principal do sistema teste. 117
A.4 Valores dos índices de confiabilidade após a inclusão de um religador no meio do alimentador principal do sistema teste. 118
A.5 Valores dos índices de confiabilidade após a inclusão de três e quatro religadores no alimentador principal do sistema teste. 119

B.1 Tempo de execução (em segundos) da análise exaustiva da alocação de 1 religador em função do número de threads (C++/OpenMP). 143
B.2 Tempo de execução (porcentagem do tempo da execução serial) da análise exaustiva da alocação de 1 religador em função do número de threads (C++/OpenMP). . . . 143
B.3 Tempo de execução da análise exaustiva da alocação de 1 religador em diferentes dispositivos (OpenCL). 144
B.4 Tempo de execução da análise exaustiva da alocação de 2 religadores (309 posições candidatas) em diferentes computadores e em conjunto. 145

Capítulo 1

Introdução

Atualmente, um dos grandes desafios enfrentados pelas concessionárias de distribuição de energia elétrica é a necessidade de diminuição das taxas de interrupções momentâneas no fornecimento de energia sem elevar as taxas de interrupções sustentadas. O aumento da utilização de cargas cada vez mais sensíveis à ocorrência de distúrbios de curto-prazo na rede tem sido acompanhado pela maior consciência dos consumidores quanto aos efeitos negativos destes distúrbios no desempenho de seus processos. De forma geral, interrupções momentâneas e sustentadas são classificadas como problemas de qualidade de energia e de confiabilidade, respectivamente, que afetam os diferentes tipos de consumidores de maneiras variadas.

A estratégia de eliminação de defeitos (faltas) empregada pela concessionária de distribuição de energia elétrica tem grande impacto na confiabilidade e na qualidade de energia do sistema. Por exemplo, a política de empregar religadores automáticos tipicamente tem um impacto benéfico nos índices de confiabilidade baseados na frequência e duração das interrupções sustentadas mas, por outro lado, tem um impacto negativo nos índices de qualidade de energia baseados na frequência de interrupções temporárias. Isto pode ser comprovado pelo número de concessionárias ao redor do mundo que estão revendo suas estratégias de empregar religadores automáticos de forma generalizada conforme cresce a preocupação do consumidor com a qualidade de energia ([1–3]). Somado a isso, tem-se o fato de o sistema estar sendo modernizado com o uso de mais equipamentos de monitoração e automação, como chaves seccionadoras automáticas, relés digitais, etc., dentro do contexto que se convencionou chamar redes inteligentes (*smart grids*). Portanto, atualmente, as estratégias de eliminação de faltas e de melhoria dos índices de confiabilidade e de qualidade de energia em sistemas de distribuição estão passando por modificações e têm atraído o interesse da comunidade científica e tecnológica.

Este trabalho tem como objetivo desenvolver uma metodologia para auxiliar na tomada de decisão sobre a estratégia de eliminação de defeitos em sistemas de distribuição via avaliação integrada dos índices de confiabilidade e qualidade de energia. A metodologia é baseada no uso de registros históricos e de medições da concessionária, no cálculo de índices de confiabilidade e de qualidade de energia e em técnicas de otimização e de tratamentos estatísticos, permitindo realizar a análise da política de religamento automático em diferentes níveis para sistemas de grande porte.

1.1 Definição do problema

Faltas temporárias são a principal razão do uso da política *fuse saving* em religadores e disjuntores de alimentadores de distribuição ([4, 5]), o que torna o uso de muitos religadores associado a esta política. Desta forma, caso não seja especificado explicitamente, neste trabalho os termos "religador" e "religamento automático" referem-se a um equipamento com capacidade de religamento automático de ciclo rápido e coordenado de acordo com o esquema *fuse saving*.

A estratégia de religamento automático tem criado o seguinte dilema: uma tentativa de reduzir o número de interrupções sustentadas provocará um aumento das interrupções momentâneas. A Figura 1.1 pode ser usada para explicar esta condição. No sistema da figura, há um religador R no alimentador e um fusível em um ramo lateral. Para uma falta permanente no ponto F, o religador R irá abrir uma ou duas vezes, sendo que cada abertura com uma duração de 2 segundos, antes que o fusível opere. Esta estratégia irá resultar em interrupções momentâneas para os consumidores a jusante de R. Se o religador R for desabilitado, uma falta temporária no ponto F irá resultar na operação do fusível FS, causando interrupções sustentadas aos consumidores a jusante de FS. Neste caso, as interrupções momentâneas às quais os consumidores a montante de FS estariam sujeitos são eliminadas, porém os consumidores a jusante irão estar sujeitos a interrupções sustentadas mesmo no caso de faltas temporárias. Isto implica que a redução das interrupções sustentadas irá ocasionar o aumento de interrupções momentâneas e vice-versa.

Um exemplo estendido, baseado no estudo de um alimentador reduzido apresentado em [6], é apresentado no Apêndice A.

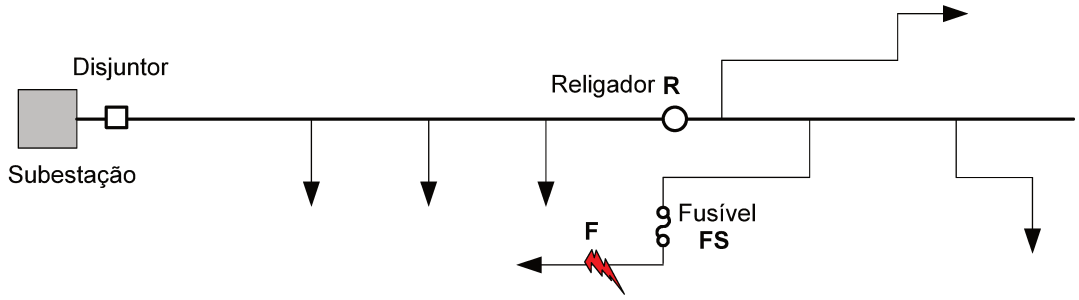

Figura 1.1: Impacto dos religadores automáticos no número de interrupções momentâneas e sustentadas.

1.2 Organização desta tese

Esta tese foi organizada como segue:

- No Capítulo 2, contextualiza-se o conflito entre os índices de confiabilidade e qualidade de energia elétrica. São apresentados os principais conceitos sob diferentes pontos de vista.
- O processamento de dados históricos de uma empresa de distribuição de energia é apresentado no Capítulo 3. São analisados dados coletados através de vários anos e de fontes distintas com o objetivo de extrair informações sobre a eficiência passada dos equipamentos de proteção e sua relação com as interrupções de fornecimento de energia.
- Na tentativa de analisar sistemas de grande porte sem empregar reduções drásticas, os métodos clássicos mostraram-se inadequados. Uma nova abordagem para algoritmos clássicos de análise de confiabilidade de redes de distribuição é apresentada no Capítulo 4, no qual é apresentado um exemplo de aplicação a um sistema de grande porte baseado em um sistema real.
- Os algoritmos desenvolvidos no Capítulo 4 são utilizados em conjunto a métodos de otimização para alocação de dispositivos de proteção no Capítulo 5, no qual apresenta-se uma formulação de algoritmo genético para alocação de dispositivos de proteção, além de um método heurístico de custo computacional reduzido para alocação de religadores automáticos. Um mecanismo de redução do espaço de busca de soluções sem simplificação dos dados do sistema também é apresentado. Para acelerar a aplicação dos métodos explorados neste capítulo quando aplicados a sistemas reais de grande porte, sem a realização de simplificações, aspectos da execução paralela em processadores tradicionais e aceleradores gráficos, além da execução distribuída, são discutidos no Apêndice B.
- Por fim, apresenta-se uma lista das principais conclusões e resultados do trabalho no Capítulo 6, assim como possíveis trabalhos futuros que possam vir a complementar os métodos desenvolvidos.

Capítulo 2

Confiabilidade e qualidade de energia

Neste capítulo, o comportamento conflitante entre os índices de confiabilidade e os índices de qualidade de energia é discutido com base em uma revisão bibliográfica de normas e outros trabalhos técnicos que regem a definição dos conceitos e sua aplicação na operação de redes de distribuição de energia elétrica.

2.1 Interrupções momentâneas e sustentadas

A estratégia de eliminação de faltas adotada pelas empresas de distribuição de energia elétrica tem grande impacto tanto na qualidade de energia quanto nos níveis de confiabilidade do sistema, dependendo da duração das interrupções de energia. Neste contexto, é importante investigar os diversos tipos de interrupções a que os consumidores estão sujeitos. Resumidamente as interrupções podem ser divididas em duas categorias, momentâneas e sustentadas. Esta seção apresenta uma descrição detalhada da definição e dos índices associados a cada tipo de interrupção. Também são investigados os impactos conflitantes na qualidade de energia e na confiabilidade decorrente da prática de eliminação de faltas.

2.1.1 Definições de interrupções momentâneas e sustentadas

As interrupções de energia elétrica podem ser divididas em duas categorias principais: as interrupções de curta duração e as interrupções de longa duração ([7]). As interrupções de longa duração são comumente denominadas interrupções sustentadas. As interrupções de curta duração podem ser subdivididas em instantâneas, momentâneas e temporárias. A Figura 2.1 ilustra as interrupções mencionadas acima com relação aos respectivos tempos de duração definidos em diferentes normas técnicas. A duração máxima para que uma interrupção seja caracterizada como momentânea varia entre 2 segundos e 5 minutos de acordo com diferentes normas técnicas ([8–12]). Por exemplo, na norma técnica do IEEE Std. 1366 ([8]), todas as interrupções que duram menos de 5 minutos são definidas como interrupções momentâneas. Por outro lado, de acordo com a norma técnica IEEE Std. 1250 ([11]), as interrupções momentâneas são aquelas que têm duração superior a 30 ciclos e inferior a 2 segundos. Já no Brasil, a *Agência Nacional de Energia Elétrica* (ANEEL) fornece nos *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema*

Elétrico Nacional (PRODIST) um módulo específico para qualidade de energia elétrica ([13]) no qual definem-se dois tipos de interrupção de curta duração: momentânea, de até três segundos, e temporária, de até três minutos. Portanto, não há um consenso entre as diversas normas técnicas quanto à definição das interrupções momentâneas.

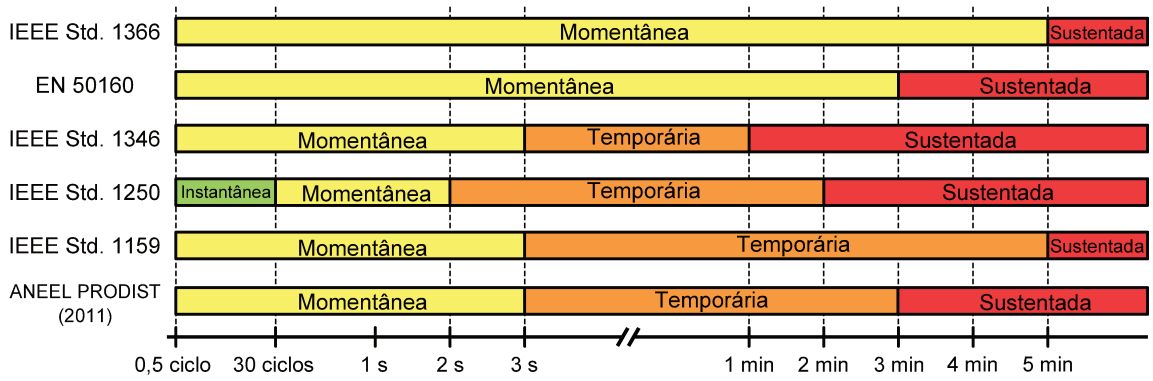

Figura 2.1: Classificação das interrupções com base em diferentes normas técnicas.

As interrupções temporárias também são definidas nas normas técnica como tendo duração mínima de 2 segundos e duração máxima de 5 minutos, como mostra a Figura 2.1. Entretanto, os estudos de confiabilidade e de qualidade de energia não avaliam os índices associados às interrupções temporárias separadamente, ou seja, as interrupções momentâneas e temporárias são avaliadas de forma combinada e avaliadas como interrupções momentâneas. As interrupções momentâneas são consideradas distúrbios de grande impacto na qualidade de energia uma vez que os equipamentos eletrônicos são muitos sensíveis à perda momentânea do suprimento de energia elétrica. Por outro lado, a teoria de confiabilidade dos sistemas de energia tem seu foco voltado para as interrupções sustentadas.

É importante notar que, na teoria de qualidade de energia, condições de operação para a qual o nível de tensão é inferior a 0,1 p.u. são caracterizadas como interrupções momentâneas. Entretanto, os estudos de confiabilidade de energia consideram como interrupções momentâneas quando há completa perda de suprimento de energia (tensão nula).

2.1.2 Causas de interrupções de energia elétrica

As causas mais comuns de interrupções são descargas elétricas, contato da linha de distribuição com animais ou árvores, vento e falha na isolação dos diversos equipamentos do sistema de potência ([1, 4]). Estas condições indesejáveis se manifestam como curtos-circuitos ou faltas ao longo das redes de distribuição. As faltas são comumente agrupadas em duas categorias: faltas temporárias e faltas permanentes, e não há uma categoria denominada como faltas momentâneas. A falta temporária tem uma característica inerente que é o fato de que após a sua ocorrência a mesma se auto-extingue e, portanto, geralmente não provoca danos permanentes em qualquer equipamento do sistema de distribuição. Por outro lado, as faltas permanentes, geralmente, causam danos permanentes aos equipamentos do sistema, por exemplo, falhas de isolação e falhas

no funcionamento de capacitores e transformadores, provocando um atraso maior na restauração do suprimento de energia elétrica. As consequências decorrentes destas faltas são interrupções de energia elétrica momentâneas, temporárias ou sustentadas, dependendo do tipo de falta e do sistema de coordenação de proteção adotado. Geralmente, uma falta temporária causa interrupções do tipo momentâneas e uma falta permanente ocasiona interrupções sustentadas. Entretanto, na presença de religadores automáticos a montante dos fusíveis, esta divisão pode não ser mais válida. Por exemplo, na usual política *fuse saving*, faltas permanentes que ocorrem a jusante do fusível irão causar interrupções momentâneas para consumidores a montante do fusível de proteção. Por outro lado, uma condição de falta temporária que é eliminada pela operação de um fusível resulta em uma interrupção sustentada, porém causa uma interrupção momentânea caso a falta fosse eliminada por um religador. Portanto, separar as causas de interrupções momentâneas das causas de interrupções sustentadas é realmente complexo. Como descrito na seção anterior, as interrupções são agrupadas de acordo com suas durações e não de acordo com suas respectivas causas.

2.1.3 Índices para avaliar as interrupções

Uma grande quantidade de índices para quantificar os diversos tipos de interrupções está disponível na literatura. Os índices básicos descrevem a frequência de ocorrência e a duração das interrupções sustentadas ([14]). Os índices mais comuns são o SAIFI (*System Average Interruption Frequency Index*) e SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*), definidos conforme as expressões (2.1.1) e (2.1.2). O índice SAIFI representa o número total de interrupções por consumidor para um determinado sistema de distribuição de energia elétrica e o índice SAIDI representa o período de tempo médio em que não há suprimento de energia para os consumidores em um determinado período de tempo, geralmente um ano. Similar ao SAIFI, o índice MAIFI (*System Average Momentary Interruption Frequency Index*), definido conforme a expressão (2.1.3), se aplica para interrupções momentâneas. Na verdade, a abreviação MAIFI deveria ser SAMIFI de acordo com a definição, porém o primeiro é comumente encontrado na literatura técnica.

$$\text{SAIFI} = \frac{\text{Número total de interrupções sustentadas para todos consumidores}}{\text{Número total de consumidores conectados}} \tag{2.1.1}$$

$$\text{SAIDI} = \frac{\text{Soma das durações das interrupções de todos consumidores}}{\text{Número total de consumidores conectados}} \tag{2.1.2}$$

$$\text{MAIFI} = \frac{\text{Número total de interrupções momentâneas para todos consumidores}}{\text{Número total de consumidores conectados}} \tag{2.1.3}$$

As expressões (2.1.1) a (2.1.3) também podem ser interpretadas como frequências e durações equivalentes, como segue.

SAIFI: Frequência equivalente das interrupções sustentadas por consumidor em um período de tempo.

SAIDI: Duração equivalente das interrupções por consumidor em um período de tempo.

MAIFI: Frequência equivalente das interrupções momentâneas por consumidor em um período de tempo.

Não há ainda um índice associado à duração, similar ao SAIDI, das interrupções momentâneas. Além disso, dados precisos referentes ao índice MAIFI não são facilmente encontrados devido a, principalmente, diferentes práticas de registro do número de operações dos religadores automáticos. Como os efeitos das tentativas seguidas de religamento são superados pela primeira tentativa, as operações múltiplas de abertura e religamento podem ser tratadas como um evento único de interrupção momentânea. Neste contexto, outro índice denominado MAIFI_E é definido de acordo a expressão (2.1.4).

$$\text{MAIFI}_\text{E} = \frac{\text{Número total de eventos de interrupção momentânea para todos consumidores}}{\text{Número total de consumidores conectados}} \tag{2.1.4}$$

Embora SAIFI, SAIDI e MAIFI são mais comumente usados por concessionárias de energia elétrica e especialistas para relatarem os níveis de qualidade no suprimento de energia elétrica, estes índices não são capazes de distinguir entre os tipos de consumidores sujeitos a problemas de confiabilidade e não podem ser utilizados de forma isolada para avaliar os custos resultantes. A Tabela 2.1 mostra uma lista adicional de outros índices de confiabilidade.

Tabela 2.1: Índices de confiabilidade utilizados para caracterizar interrupções de energia elétrica.

Índices baseados nos consumidores	
SAIFI	System Average Interruption Frequency Index
SAIDI	System Average Interruption Duration Index
MAIFI	Momentary Average Interruption Frequency Index
Índices baseados na perda de energia	
AENS	Average Energy Not Supplied
LOEE	Loss of Energy Expectation (kWh/ano)
Índices baseados na perda de carga	
LOLE	Loss of Load Expectancy (kW/ano)
LOLF	Loss of Load Frequency
LOLD	Loss of Load Duration
Índice baseado no custo das interrupções	
ECOST	Expected Customer Cost

2.1.4 Conflito entre os dois tipos de interrupções

No início da década de 80, muitos estudos foram conduzidos para avaliar e determinar a composição dos tipos de faltas ao longo dos alimentadores de distribuição. Um exemplo é um estudo realizado pela EPRI (*Electric Power Research Institute*) em 1983 ([15]), o qual envolveu 50 alimentadores de 13 concessionárias de distribuição de energia elétrica. Este estudo concluiu que 85% das faltas eram do tipo temporária. Outros estudos realizados mundialmente mostraram que a maioria (50–90%) das faltas é temporária, confirmando os estudos realizados pela EPRI. Esta

importante constatação contribuiu para o atual modelo dos sistemas de proteção, principalmente, para o uso de religadores automáticos para eliminar faltas temporárias.

À medida que a indústria de modo geral dá mais importância aos níveis de qualidade de energia, o impacto negativo dos religadores automáticos (também conhecido em inglês por *fuse-saving scheme*, uma vez que seu uso evita a queima de fusíveis) na qualidade de energia torna-se preocupante para muitas concessionárias de energia elétrica. Como apresentado na Seção 1.1, a estratégia de religamento automático tem criado o seguinte dilema: uma tentativa de melhorar o nível de confiabilidade, ou seja, de reduzir o número de interrupções sustentadas, irá deteriorar o nível de qualidade de energia, ou seja, provocará um aumento das interrupções momentâneas, e vice-versa.

Um estudo mostrou que ao remover a estratégia de religamento automático, o MAIFI foi reduzido de 29 para 7 ([16]). Entretanto, o SAIDI aumentou de 5,53 para 6,65 horas. Outro estudo ([6]) mostrou uma redução do MAIFI de 6,6 para 5,2 por ano (redução de 20%), porém o SAIFI aumentou de 2,2 para 3,4 por ano (aumento de 50%). Consequentemente, a duração da interrupção (SAIDI) aumentou de 40 a 50%, aproximadamente. Os autores do estudo também destacam que aquelas concessionárias que não são obrigadas a relatarem informações sobre interrupções momentâneas irão relatar um número elevado de interrupções sustentadas se a prática de religamento automático for eliminada.

2.1.5 Comentários

A definição de interrupção momentânea não é consistente entre as várias normas técnicas. As interrupções com duração inferior a 3 segundos são comumente caracterizadas como momentâneas na maioria das normas. Da mesma maneira, as interrupções com duração superior a 3 minutos são reconhecidas como interrupções sustentadas. Durações entre 3 segundos e 1 minuto, 2 minutos ou 3 minutos são associadas às interrupções temporárias. Porém, não há classificação similar para os índices de confiabilidade ou de qualidade de energia – as interrupções momentâneas e temporárias são frequentemente combinadas e avaliadas como interrupções momentâneas.

A presença ou a ausência de religadores automáticos influencia o número de interrupções momentâneas e sustentadas de forma oposta, resultando em impactos conflitantes nos níveis de confiabilidade e de qualidade de energia. É praticamente impossível melhorar os níveis de confiabilidade e de qualidade de energia simultaneamente com a prática de religamento automático.

2.2 Fatos e dados relacionados a interrupções momentâneas

Como mencionado na seção anterior, a adoção da prática do religamento automático causa impactos conflitantes na confiabilidade e na qualidade de energia de um sistema de distribuição. Assim, é importante compreender as consequências e características das interrupções momentâneas e sustentadas. Esta seção apresenta fatos e dados associados a estes tipos de interrupções com foco voltado para as interrupções momentâneas. As interrupções sustentadas já foram e têm sido

investigadas pelas companhias de energia elétrica e o conhecimento (características, dados, etc.) disponível sobre este tipo de interrupção é bastante extenso.

2.2.1 Impacto das interrupções momentâneas

Os impactos das interrupções momentâneas resultam, basicamente, de duas condições de operação do sistema: completa perda da tensão e afundamento de tensão. Afundamentos de tensão ocorrem devido às faltas, ou devido à abertura e fechamento de religadores automáticos no alimentador adjacente. Com respeito aos consumidores residenciais, o impacto mais perceptível das interrupções momentâneas é o incômodo de se ter de ajustar os relógios digitais. A maioria das cargas residenciais irá retornar à condição normal de operação a partir do momento que a tensão nominal é restabelecida. Entretanto, consumidores comerciais e industriais, podem estar sujeitos a uma total parada no funcionamento dos respectivos processos e a restauração para condição normal pode levar várias horas.

Condições de operação em que há uma breve interrupção do fornecimento de tensão causam a desaceleração de motores. Apesar da duração do fenômeno ser de alguns segundos, as consequências podem persistir por mais tempo e causarem grandes prejuízos, como interrupção da linha de produção, perda do conteúdo armazenado na memória dos computadores, etc. ([1]). Interrupções momentâneas devido às práticas de religamento automático adotadas para proteção contra faltas temporárias podem impactar de forma negativa o funcionamento de cargas sensíveis, a não ser que as cargas sejam capazes de suportar a perda momentânea de tensão (conhecido por *fault ride through capability*) ou sejam equipadas de forma adequada com dispositivos de condicionamento de energia. Alguns equipamentos, como computadores, podem ser protegidos por fontes de energia ininterrupta (*Uninterruptible Power Supply*, UPS). Porém, não é prático prover este tipo de proteção a motores de grande porte. Neste contexto, esta seção discute os impactos das interrupções momentâneas e dos afundamentos de tensão na operação dos equipamentos e instalações industriais.

Equipamentos

Os impactos das interrupções momentâneas em diferentes tipos de equipamentos comumente empregados são brevemente descritos a seguir.

Motores de indução: Um motor de indução sofre uma desaceleração quando é sujeito a uma interrupção de tensão de curta duração. A constante de tempo mecânica de um motor de indução combinado com suas cargas varia entre 1 e 10 segundos ([1]). A partir do momento em que a interrupção é eliminada, a velocidade do motor aumenta, demandando mais energia do sistema até que a condição de regime permanente seja atingida. As características mecânicas e elétricas dos motores podem estender a duração dos distúrbios de tensão. Como consequência, alguns equipamentos sensíveis que eram capazes de suportar o evento de interrupção irão ser desligados durante o período pós-evento devido aos efeitos adversos causados pela aceleração do motor de indução ([17]). Portanto, o controle do processo de produção pode ser interrompido e o tempo de restabelecimento para condição normal pode levar várias horas.

Motores síncronos: Quando sujeitos a uma perda momentânea de tensão, os motores síncronos começam a desacelerar e a ficar fora de sincronismo com a tensão fornecida pelo sistema. A tensão interna do motor decresce com a velocidade. Com isto, no instante do religamento, a diferença de tensão resultante entre a máquina e o sistema pode ser em torno de 2 p.u., se estas tensões forem iguais em magnitude e com diferença angular de 180 graus. Como consequência, o motor pode consumir uma grande corrente elétrica do sistema de distribuição. Esta condição, caso estendida por um longo tempo, pode causar danos significativos ao motor se este não for desligado por seu esquema de proteção. Assim, o intervalo de religamento deve ser mais longo que o tempo de atuação do esquema de proteção por subtensão do motor ([7]).

Motores com controle eletrônico de velocidade (*Adjustable Speed Drives* - ASDs) [7]: Os ASDs, ou dispositivos para acionamento de velocidade variável, são usados para controle de velocidade, conjugado, aceleração e direção de rotação de motores. Estes dispositivos são muitos sensíveis a interrupções de curta duração. Normalmente, eles são desligados dentro de 1 segundo e, algumas vezes, dentro de 1 ciclo, causando perda da carga. O impacto da parada de um processo por vários segundos pode ser tão significativo que o religamento não traz nenhum benefício. O tempo de religamento normalmente varia de 2 segundos a 10 segundos ou até mais nas tentativas seguintes de religamento.

Computadores [18]: Computadores são um dos equipamentos mais sensíveis à perda de tensão. A curva do ITIC (*Information Technology Industry Council*), originalmente conhecido como CBEMA (*Computer Business and Equipment Manufacturing Association*), estabelece que este tipo de equipamento seja capaz de tolerar a perda completa de tensão por apenas 20 ms (1,2 ciclos em 60 Hz).

Controle de Processos [19]: Processos modernos de automação de instalações comerciais e industriais consistem de microprocessadores e microcomputadores. Processos comerciais incluem sensores para entrada de dados, unidades de terminal remoto (*remote terminal units*, RTU), um processador central e dispositivos de interface homem-máquina. Processos industriais sensíveis podem incluir ferramentas de montagem de maquinários, ferramentas de corte, etc. Adicionalmente, dispositivos de partida de motores, contatores, relés e outros dispositivos magnéticos, os quais são bastante sensíveis a interrupções de curta duração e afundamentos de tensão. Muitos destes dispositivos são tão sensíveis que eles são desligados mesmo antes da completa perda de tensão, por exemplo, se a tensão atinge 60% a 70% do valor nominal.

Equipamentos Eletrônicos Residenciais [20]: Dispositivos eletrônicos como relógios digitais, fornos micro-ondas, televisão, etc., podem não funcionar corretamente durante o período de religamento. A maioria dos relógios digitais, gravadores e micro-ondas passam a funcionar incorretamente com 2 segundos de interrupção.

Transformadores: Na referência [20], os autores concluíram que os transformadores podem se tornar saturados à medida que a tensão se recupera de um afundamento de tensão e, com isso, produzem uma corrente de *inrush* similar àquela resultante da energização de transformadores. O efeito das interrupções momentâneas pode ser similar ao efeito devido à reenergização do transformador devido ao religamento automático.

Instalações industriais e comerciais

O livro *IEEE Gold Book* de 1997 ([21]) apresenta dados relativos a interrupções de plantas industriais e comerciais. Tais dados são sumarizados nas Tabelas 2.2 e 2.3. A Tabela 2.2 mostra que, para 25% das plantas industriais, a perda do fornecimento de energia elétrica por um período de 10 ciclos é considerada inaceitável. Além disso, 50% do total das plantas industriais são sensíveis a interrupções de 10 segundos. Para plantas industriais, o tempo médio de interrupção da produção devido a falhas em equipamentos com duração entre 1 e 10 ciclos é de 1,39 horas.

Tabela 2.2: Durações de interrupção de energia consideradas inaceitáveis para plantas industriais.

Número de plantas industriais (%)	Duração Crítica
25 %	10 ciclos
50 %	10 segundos
75 %	15 minutos

Tabela 2.3: Durações de interrupção de energia consideradas inaceitáveis para instalações comerciais.

Interrupções Curtas		Interrupções Longas	
Duração Interrupção	Número de instalações (%)	Duração Interrupção	Número de instalações (%)
1 ciclo	3	5 minutos	36
2 ciclos	6	30 minutos	64
8 ciclos	9	1 hora	74
1 segundo	15	12 horas	100

A Tabela 2.3 apresenta quais as durações das interrupções no fornecimento de energia consideradas inaceitáveis para instalações comerciais. Destas instalações, 15% possuem equipamentos que são sensíveis a interrupções de 1 segundo. Como a Tabela 2.3 apresenta dados associados a interrupções de 1 segundo e 5 minutos, é difícil identificar a porcentagem de instalações comerciais afetadas por interrupções com duração de 1 minuto. Entretanto, os dados fornecidos pela tabela revelam quão sensíveis os processos e equipamentos de instalações comerciais são quando sujeitos a interrupções momentâneas.

2.2.2 Custo associado às interrupções momentâneas

No passado, o custo devido a consequências causadas pelas interrupções de energia era avaliado apenas para as interrupções do tipo sustentadas. Estudos têm sido realizados para compreender o custo associado às interrupções momentâneas. Recentemente, alguns trabalhos mostram que o custo das interrupções momentâneas pode ser ainda mais significativo. A Figura 2.2 sumariza o custo total anual (em bilhões) devido às interrupções de energia exposto por diferentes estudos. Cada um destes estudos é brevemente descrito a seguir. Nota-se que os tipos de interrupção podem ter sido definidos de forma inconsistente nos diferentes estudos.

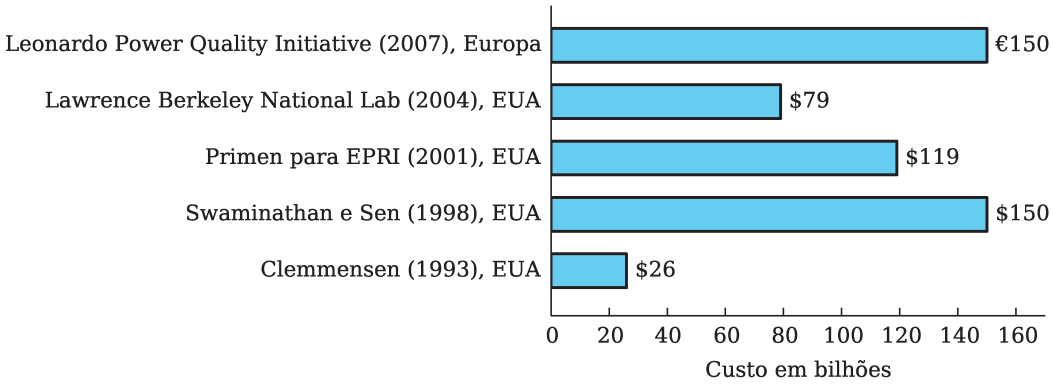

Figura 2.2: Custo total das interrupções (de curta e longa duração) descrito em diferentes estudos.

Estimativas do Lawrence Berkeley National Lab (LBNL)

Um trabalho realizado pelo *Lawrence Berkeley National Lab* (LBNL) ([22]) fornece uma grande quantidade de informações sobre os custos das interrupções. A Figura 2.3 mostra o custo anual incluindo todos os tipos de interrupção. Interrupções momentâneas são responsáveis pela a perda de $52 bilhões do custo total de $79 bilhões por ano, ou seja, 67% do custo total são atribuídos às perdas momentâneas. As interrupções com duração inferior a 5 minutos são associadas às interrupções do tipo momentâneas.

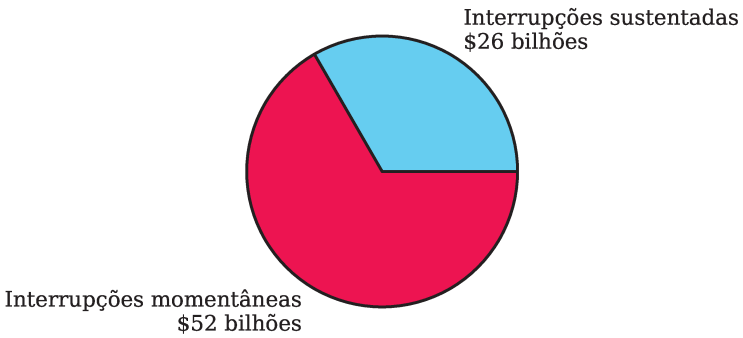

Figura 2.3: Custo decorrente das interrupções momentâneas e sustentadas.

Uma grande parte das perdas é atribuída aos consumidores comerciais, ou seja, 72% da perda total, como é mostrado na Figura 2.4. As perdas associadas aos consumidores industriais são de 26% e o restante é atribuído aos consumidores residenciais.

Os consumidores foram divididos em três setores: residencial, comercial e industrial. Especialistas na área de confiabilidade têm a opinião de que estes setores devem ser subdivididos em categorias mais específicas. Na referência [23], estes setores são subdivididos em sete grupos in-

cluindo consumidores de grande porte, industrial, comercial, residencial, rural, escritórios e prédios. Entretanto, torna-se mais difícil obter dados para os diferentes grupos.

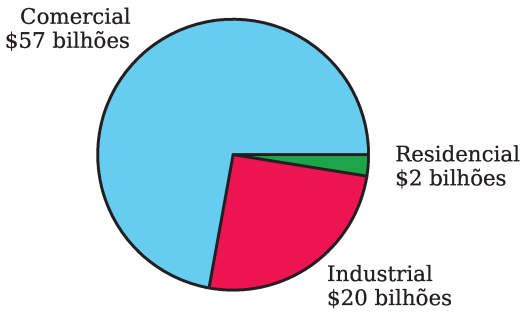

Figura 2.4: Estimativa do custo decorrente das interrupções de energia para três setores.

Estimativas do Leonardo Power Quality Initiative

No ano de 2007, o *Leonardo Power Quality Initiative* (LPQI) concluiu um levantamento focado no impacto de uma baixa qualidade no fornecimento de energia elétrica ([24]). Sessenta e oito entrevistados e 15 parceiros do projeto de diferentes países estavam envolvidos nesse estudo. Verificou-se que uma perda estimada de €150 bilhões por ano ocorre devido à baixa qualidade no fornecimento de energia. Os custos devido às interrupções de curta duração e os afundamentos de tensão foram combinados. As perdas devido a estes eventos de qualidade de energia foram de €86,5 bilhões (principalmente industrial) e os custos devido a interrupções de longa duração foi de €6,4 bilhões. As perdas devido às harmônicas, transitórios, *flicker*, etc., foram também relatados. É interessante observar que o custo associado aos transitórios foi de €53,3 bilhões, como mostra a Figura 2.5.

O número de companhias que participaram nesse levantamento foi: França (13), Eslovênia (21), Espanha (12), Reino Unido (5), Polônia (5), Itália (4), Áustria (1), Portugal (1).

As interrupções momentâneas representam 18,8% do custo global decorrente dos impactos na qualidade de energia e as interrupções sustentadas 12,5%. Os afundamentos de tensão representam 23,6% do custo global e os transitórios 29%, como visto na Tabela 2.4.

Tabela 2.4: Custo (€) decorrente dos impactos nos níveis de qualidade de energia para diferentes eventos ([24]).

Classe de consumo	Afundamento de Tensão	Interrupções Curtas/Momentâneas	Interrupções Longas/Sustentadas	Transitórios
Indústria	4682	14484	95478	186260
Serviços	2120	19447	80326	122602
Média	4177	16539	91021	175871

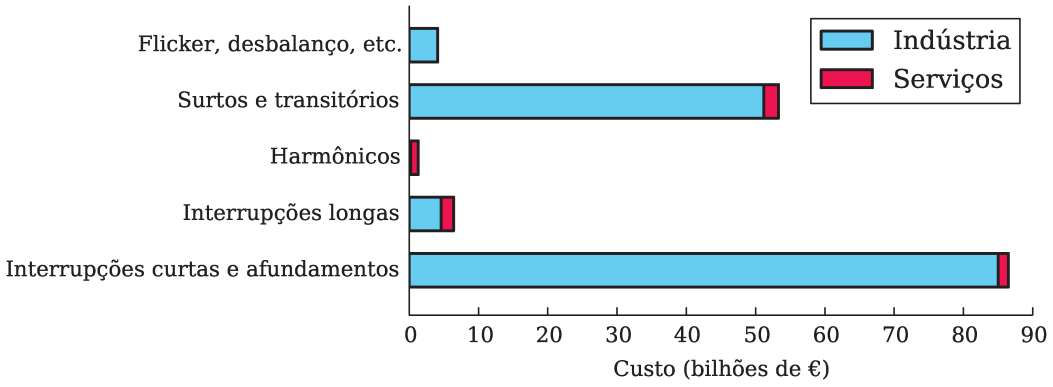

Figura 2.5: Estimativa do custo das interrupções de energia para diferentes setores.

Estimativas da EPRI

O estudo realizado por Primen para a EPRI, em 2001, estimou o custo da queda de energia em $119 bilhões por ano ([25]). Um total de 985 empresas de diferentes setores da área de negócios, a saber (1) economia digital, (2) processo contínuo de fabricação e (3) fabricação e serviços essenciais, responderam os questionários. No estudo, as durações das interrupções foram agrupadas em um segundo, três minutos e uma hora. Os custos associados com religamento automático também foram relatados separadamente. O número de interrupções sustentadas e momentâneas não foi mostrado pelo estudo.

O custo de um evento de religamento automático é quase duas vezes mais caro do que uma interrupção momentânea de 1 segundo e 1,3 vezes mais caro do que uma interrupção de 3 minutos. Um evento de religamento custa cerca de 36% do custo de uma interrupção de 1 hora. O custo médio de uma interrupção de curta duração é de $6452 e de uma hora de interrupção sustentada é de $7795. O custo por evento de 1 segundo, de 3 minutos, de religamento automático, de 1 hora, é de $1477, $2107, $2848 e $7795, respectivamente.

Outras estimativas

O relatório do LBNL ([22]) reconhece que Swaminathan e Sen (1998) estimaram os custos de interrupção de energia em $150 bilhões por ano para os EUA extrapolando os resultados de um levantamento realizado pela Duke Power em 1992, o qual se baseou na oferta total de energia elétrica. A extrapolação focou apenas no setor industrial e em uma área geográfica restrita. A estimativa não inclui os custos dos setores comerciais ou residenciais. A extrapolação não pode ser aplicada porque, estatisticamente, há diferenças significativas tanto entre os custos associados a diferentes setores industriais e entre diferentes regiões geográficas ([26]). Além disso, os custos associados aos consumidores residenciais e comerciais podem ser significativamente diferentes dos consumidores industriais.

Da mesma forma, Clemmensen (EPRI, 1993) [27] forneceu a primeira estimativa do custo associado aos impactos devido a problemas de qualidade de energia no valor de $26 bilhões para o

setor manufatureiro dos EUA. É importante notar que a estimativa de Clemmensen se baseia nos gastos anuais com equipamentos industriais para solucionar problemas de qualidade de energia, sendo que problemas de qualidade de energia normalmente se referem a um subconjunto de problemas de confiabilidade, nas quais há uma queda da tensão por um período muito curto de tempo, normalmente, com duração de alguns ciclos ou segundos. Portanto, os dados de custo associados às interrupções momentâneas e interrupções sustentadas não estão disponíveis de forma separada neste estudo.

Sumário do custo decorrente das interrupções

Com base nas informações mencionadas anteriormente, custos relacionados às interrupções momentâneas podem ser resumidos como se segue:

- Custo total excluindo eventos de qualidade de energia (LBNL): O custo da interrupção momentânea é em torno de 67% do custo acumulado relativo às interrupções de curta e longa duração.
- Custo total, incluindo eventos de qualidade de energia (LPQI): As interrupções momentâneas constituem cerca de 18,8% do custo total de qualidade de energia e as interrupções sustentadas constituem apenas 12,5%. Os valores para os afundamentos de tensão e transitórios são de 23,6% e 29%, respectivamente.
- Custo por evento de religamento (EPRI): O custo de um evento de religamento é quase duas vezes mais caro do que uma interrupção momentânea de 1 segundo e 1,3 vezes mais caro do que uma interrupção de 3 minutos. Um evento de religamento custa cerca de 36% do custo de uma interrupção de 1 hora.
- Custo por interrupção momentânea: Estimativas da EPRI mostram que uma interrupção momentânea de 1 segundo custa cerca de 19% do custo de uma interrupção sustentada de 1 hora. De acordo com os resultados obtidos pela LPQI, o custo de uma interrupção momentânea é cerca de 18% do custo de uma interrupção sustentada.

Os custos médios por evento das interrupções são significativamente distintos nos estudos da EPRI e da LPQI. O estudo realizado pela LBNL não informou o custo por evento, porém o custo por interrupção por consumidor. O custo total pode ser determinado através dos dados de frequência de interrupções e dos custos por interrupção. O número de interrupções momentâneas foi cerca de 3 vezes maior do que o número de interrupções sustentadas. O estudo realizado pela LPQI revelou o número de interrupções momentâneas e sustentadas foi de 6,9 por ano e 2,2 por ano, respectivamente. Da mesma forma, o estudo da LBNL mostrou que estes valores são de 4,3 por ano e 1,2 por ano, respectivamente. O estudo da EPRI não contém informação sobre a frequência de interrupções.

Em resumo, o custo das interrupções momentâneas é geralmente maior do que as sustentadas. Os custos estimados em vários estudos não são consistentes, principalmente devido às incertezas na estimativa das perdas, inconsistência no monitoramento de eventos de qualidade de energia, tipos de indústrias, esquemas de coleta de dados, entre outros.

2.2.3 Expectativas dos consumidores em relação a qualidade de energia e confiabilidade

Em 1996, a Duke Power conduziu um estudo abrangente, em cooperação com a EPRI, para tentar entender a satisfação e a expectativa dos consumidores com relação ao nível de confiabilidade do serviço e para estimar o custo da interrupção. A maioria dos consumidores entende que é praticamente impossível fornecer energia elétrica com índices perfeitos de confiabilidade e de qualidade da energia. No entanto, eles diferem significativamente em suas expectativas para o desempenho das companhias de energia elétrica. As principais conclusões do estudo ([28]) estão resumidas a seguir.

Grandes consumidores comerciais e industriais esperam que a confiabilidade do fornecimento de energia elétrica seja quase perfeita. Os consumidores considerados no estudo são conectados no sistema de transmissão e os mesmos não toleram nenhuma interrupção de qualquer duração. Ao passo que pequenos e médios consumidores esperam um nível de confiabilidade significativamente mais elevado se comparado com os consumidores residenciais. As Figuras 2.6 e 2.7 ([28]) mostram o número aceitável de interrupções de longa duração (de 1 hora até 4 horas) e de interrupções momentâneas de acordo com as informações fornecidas pelos consumidores residenciais e não residenciais.

A Figura 2.6 mostra que os consumidores residenciais têm expectativas significativamente mais baixas quanto aos níveis de confiabilidade se comparadas com os consumidores comerciais e industriais. Por exemplo, 50% dos consumidores residenciais consideram duas ou menos interrupções sustentadas como um nível aceitável. Por outro lado, 50% dos consumidores comerciais e industriais esperam uma ou menos interrupção por ano. Isso significa que, na média, o consumidor comercial e industrial espera que serviço de fornecimento de energia elétrica seja cerca de duas vezes mais confiável se comparado com os consumidores residenciais.

As expectativas dos consumidores têm diferenças ainda maiores com relação às interrupções momentâneas. A Figura 2.7 mostra que, na média, o consumidor residencial considera 38 interrupções momentâneas por ano como um nível aceitável (cerca de uma vez a cada dez dias). Porém, os consumidores não residenciais esperam menos de 12 interrupções por ano (cerca de uma por mês). Isto significa que os consumidores não residenciais esperam um serviço três vezes mais confiável se comparado com os consumidores residenciais.

Em geral, as expectativas dos consumidores comerciais e industriais são tais em vista dos mesmos visarem evitar perdas econômicas. Os custos associados a uma interrupção podem ser convertidos em perdas econômicas com base no lucro perdido. No entanto, os custos de interrupções para consumidores residenciais muitas vezes são intangíveis, são descritos como aborrecimento e transtorno. Em um estudo realizado pelo Lawrence Berkeley Lab ([29]), o custo das interrupções associadas a consumidores residenciais foram levantados em termos do valor que o proprietário da residência pagaria para evitar uma interrupção. Este valor é referido como "disponibilidade para pagar" (*willingness to pay*) para obter maior confiabilidade. A Tabela 2.5 ([29]) mostra os números que refletem as expectativas dos consumidores residenciais e comerciais com relação à confiabilidade e qualidade de energia.

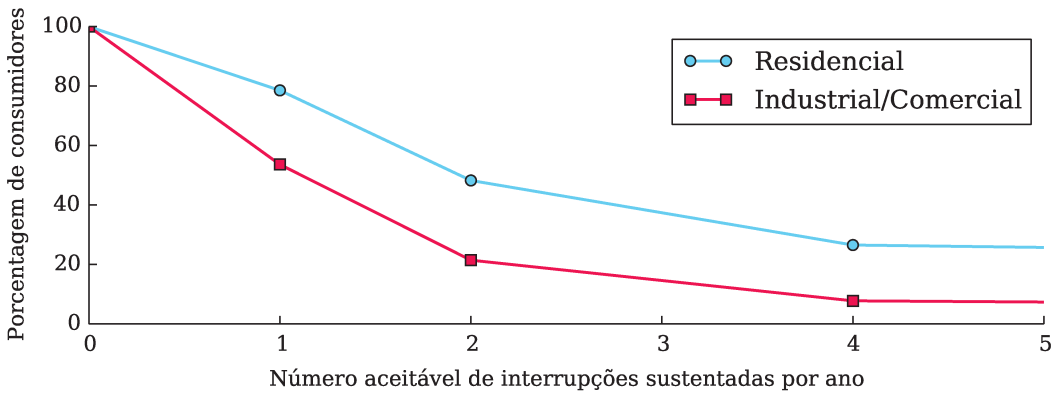

Figura 2.6: Número aceitável de interrupções sustentadas (com duração de 1 a 4 horas).

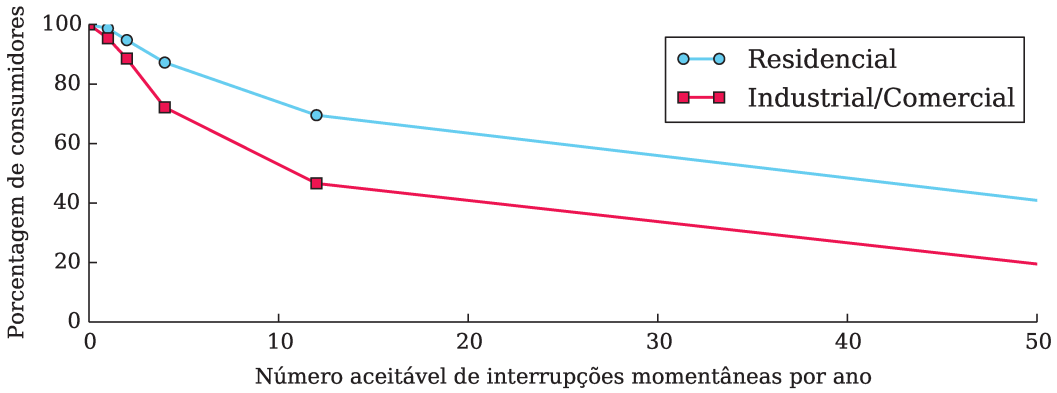

Figura 2.7: Número aceitável de interrupções momentâneas (com duração entre 1 e 2 segundos).

Tabela 2.5: Valor que os consumidores residenciais estariam dispostos a pagar para evitar interrupções.

Duração do evento	Custo ($)
Afundamento de tensão	2,3
Até 1 hora	4,1
De 2 a 4 horas	7,3
De 8 a 12 horas	11,75

2.2.4 Experiência das concessionárias de energia elétrica

Muitas concessionárias de energia elétrica dos EUA avaliam níveis de confiabilidade do sistema incluindo o índice de interrupções momentâneas (MAIFI) ([22, 30]). Em uma pesquisa recente envolvendo 161 concessionárias ([31]), verificou-se que apenas 37% das concessionárias (28 de 76) calcularam o MAIFI. Apenas 18% (9 em 50) das concessionárias incluem as interrupções momentâneas no cálculo do SAIFI. Uma concessionária avaliou o SAIFI com e sem interrupções momentâneas. Os valores de SAIFI aumentaram 305%, com a inclusão das interrupções momentâ-

neas. A inclusão ou a exclusão das interrupções momentâneas afeta o SAIFI de forma significativa. Portanto, algumas concessionárias têm eliminado a estratégia de religamento automático.

Até o final de 1980, quase todas as concessionárias adotavam a prática de religamento automático. Um levantamento realizado pelo IEEE concluiu que 91% das concessionárias adotavam a prática do religamento automático. O número de concessionárias adotando a prática caiu para 71% em 1994 e 66% em 2000 ([30]). Outra pesquisa (1996) mostrou resultados distintos: 40% das concessionárias usando religamento automático, 27% usando fusíveis sem a presença de religadores (*fuse blowing*) e 33% usando uma combinação das duas estratégias. Há variações entre as unidades quanto à duração das interrupções relatadas como interrupções sustentadas ou como interrupções momentâneas. Muitas das concessionárias que normalmente utilizavam religamento automático mudaram para o esquema envolvendo apenas fusíveis (*fuse blowing*) se houvesse muitos casos de reclamações por parte dos consumidores ([4]).

Há uma discrepância entre as concessionárias de energia elétrica quanto aos sistemas e dispositivos que devem ser considerados na avaliação das interrupções momentâneas e sustentadas. As Figuras 2.8 e 2.9 ([31]) mostram quais níveis do sistema e dispositivos são considerados na avaliação das interrupções sustentadas e momentâneas, respectivamente. A maioria das concessionárias é equipada com um programa computacional que recebe como entrada os dados de interrupção e gera como saída os índices de confiabilidade.

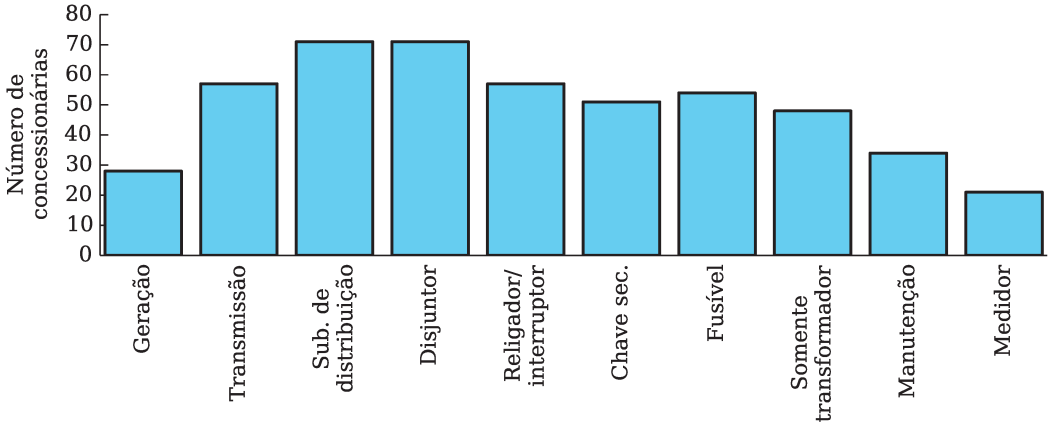

Figura 2.8: Dispositivos e níveis do sistema considerados para o relatório de interrupções sustentadas.

2.2.5 Práticas regulatórias

Ainda não foi regulamentado se as concessionárias são obrigadas a informarem dados associados a interrupções. Uma pesquisa realizada em 1998 ([31]) revelou que 64% (47 de 73) das concessionárias foram requisitadas a informarem os índices ou dados de interrupção para os agentes reguladores. Apenas 48% (32 de 66) das concessionárias relataram que o órgão regulador define o processo de notificação das interrupções. Como mencionado anteriormente, muitas concessionárias

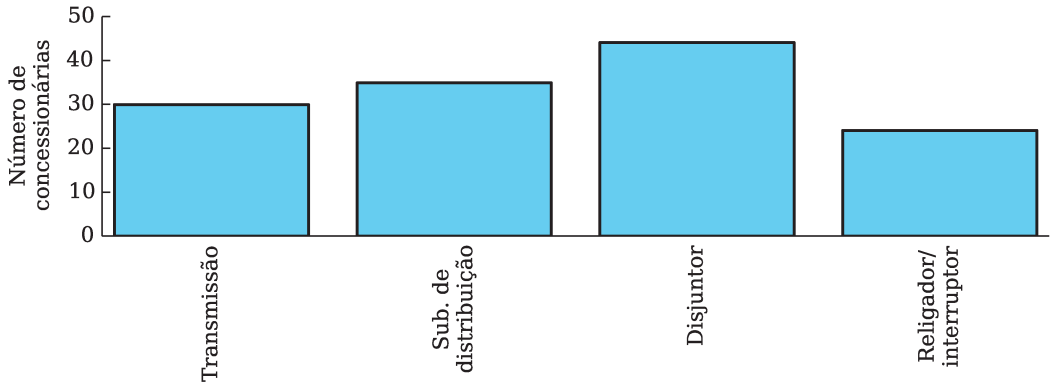

Figura 2.9: Dispositivos e níveis do sistema considerados para o relatório de interrupções momentâneas.

realizam o cálculo do MAIFI. Algumas empresas chegam a incorporar o MAIFI em seus relatórios e a falha de uma concessionária no cumprimento das normas regulamentadas resulta os resultados em penalidades ([32]). Algumas concessionárias australianas incluem o MAIFI, de alguma forma ([33]).

Na referência [31] várias sugestões foram feitas em relação às práticas regulatórias:

- Os índices de confiabilidade dos sistemas de distribuição e de transmissão devem ser avaliados separadamente;
- Necessidade de uma exigência regulamentar padronizada para informar as interrupções momentâneas;
- Os dispositivos de interrupção devem ser definidos para que os mesmos sejam incluídos no cálculo dos índices de interrupções momentâneas;
- Contar as sequências de religamento como um evento;
- Separação dos índices de interrupções planejadas na transmissão e dos índices das concessionárias de distribuição;
- Exclusão de eventos de grande porte a fim de comparar o SAIFI com o MAIFI.

Para este trabalho de doutorado, com o suporte dos pesquisadores da Universidade de Alberta, foi realizado um levantamento envolvendo 50 agências reguladoras localizada na América do Norte. Nove delas (6 dos EUA, 3 do Canadá) responderam. Embora o número de respostas seja pequena, o levantamento revela informações úteis sobre a atual situação. As principais constatações são resumidas a seguir:

- Apenas duas agências reguladoras indicaram que exigem a notificação sobre os níveis de interrupções momentâneas na medição de desempenho. No entanto, um regulador informou que existem diferenças entre empresas e que não aplica este requisito de forma rigorosa.

- A maioria dos reguladores (6 de 9) informou que não monitoram os níveis de interrupções momentâneas.

- Um regulador considera incluir interrupções momentâneas como parte dos relatórios anuais de avaliação dos níveis de confiabilidade e outros disseram que talvez considerem no futuro.

No contexto brasileiro, através do módulo 8 do PRODIST, a ANEEL define índices, incluindo DEC e FEC (equivalentes a SAIDI e SAIFI), para avaliação da continuidade do serviço, considerando apenas interrupções de longa duração. As interrupções de curta duração de até três minutos são estimadas por amostragem e não são consideradas de forma integrada à avaliação da continuidade de serviço, mas sim juntamente aos outros parâmetros de qualidade de energia de elétrica (qualidade de produto).

2.2.6 Características das faltas temporárias e permanentes

Faltas ou curtos-circuitos podem ser divididos em duas categorias principais: temporárias e permanentes. Uma falta permanente é aquela em que há um dano permanente no sistema de distribuição, incluindo falhas na isolação ou falhas em equipamentos como transformadores e capacitores. Para eliminar uma falta, é necessário que um fusível, religador ou um disjuntor opere para interromper o circuito afetado. Por outro lado, uma falta temporária não resulta em danos permanentes aos equipamentos do sistema. Se o circuito é interrompido e, em seguida, é religado depois de um atraso, o sistema opera normalmente.

Faltas temporárias são a principal justificativa para o uso do esquema de religamento automático nos sistemas de distribuição. A principal consequência advinda das faltas temporárias é o afundamento de tensão para os consumidores conectados no circuito sob falta e, possivelmente, para os consumidores nos alimentadores adjacentes. Na Tabela 2.6, as causas comuns de faltas temporárias e permanentes são sumarizadas ([34]).

Tabela 2.6: Causas comuns das faltas temporárias e permanentes.

Faltas Temporárias	Faltas Permanentes
Descargas Elétricas	Queda de árvores ou galhos
Animais	Falhas no cabo
Ventos	Falha de outros equipamentos
Problemas nos equipamentos de isolação	*Dig-in* (ruptura de cabos subterrâneos)

A estimativa do número de faltas temporárias e permanentes é um fator importante para a investigação do impacto de religadores automáticos. A maioria dos estudos assume que as faltas temporárias e faltas permanentes representam 80% e 20% de todas as faltas, respectivamente ([35–37]). Porém, dados de medição mostram valores diferentes para estas porcentagens. A companhia de energia elétrica *Florida Power Company* registrou condições de falta no seu sistema de distribuição durante 3 anos. Um total de 895 faltas foi registrado. A análise dos dados obtidos mostrou que 506 faltas (57%) eram temporárias e as outras 389 faltas (43%) eram permanentes. Outro levantamento também baseado em dados de medição realizados em um sistema de distribuição de

34,5 kV na Virgínia (EUA) mostrou que 51,5% das faltas eram temporárias e 48,5% eram permanentes ([38]). Outros estudos de campo realizados na Inglaterra e na Austrália mostram uma maior porcentagem de faltas temporárias, entre 70 e 75% ([39, 40]).

A proporção entre faltas permanentes e temporárias varia de sistema para sistema devido a condições geográficas e climáticas. A Figura 2.10 mostra a proporção para vários sistemas. Por exemplo, o percentual de faltas temporárias são 50-80% ([4]), 50-90% ([34]) e 80-95% ([35]). Como pode ser observado, é muito difícil generalizar a relação entre faltas temporárias e permanentes. No entanto, uma conclusão geral é que o número de faltas temporárias é maior do que de faltas permanentes.

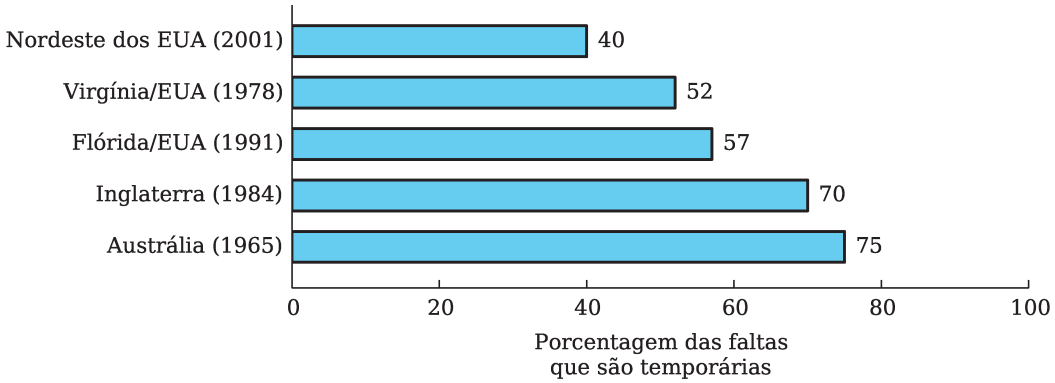

Figura 2.10: Porcentagem de faltas que são temporárias.

Alguns métodos matemáticos para calcular um percentual aproximado de faltas permanentes empregando o monitoramento da operação dos disjuntores, religadores e fusíveis são dados em [4].

Os dados dos diversos estudos analisados confirmam a crença amplamente difundida de que 50-80% das faltas são temporárias. Este número depende do próprio sistema e das condições ambientais da área a qual o sistema se situa, tais como vento, raios e árvores.

2.2.7 Métodos para avaliar níveis de qualidade de energia e confiabilidade de sistemas com religamento automático

Atualmente, não existem métodos amplamente aceitos ou ferramentas disponíveis para analisar os níveis de qualidade de energia e confiabilidade dos impactos consequentes da estratégia de religamento automático. Entretanto, alguns estudos de membros da indústria e universidades têm sido conduzidos visando à avaliação dos impactos do religamento automático. Por exemplo, o impacto da remoção da estratégia de religamento automático (*fuse saving*) nos índices de confiabilidade foi quantificado em [6]. Embora índices associados às interrupções momentâneas não foram quantificados, foi observado um aumento significativo dos índices SAIFI e SAIDI devido à remoção dos religadores. Um método simples que incorpora as interrupções momentâneas em estudos de confiabilidade foi proposto em [41] e, adicionalmente, este método considerou o cálculo do índice MAIFI. Além disso, o método proposto pode incluir disjuntores automáticos, religadores, fusíveis,

disjuntores comuns e reconfigurações em um sistema de distribuição radial. Nesta técnica, as interrupções momentâneas devido a faltas que se auto-extinguem e as interrupções momentâneas devido às faltas permanentes podem ser quantificadas separadamente. Verificou-se que a soma dos índices SAIFI e MAIFI permanece a mesma, mas interrupções sustentadas serão convertidas para interrupções momentâneas, devido à presença de religadores.

A localização do religador é um fator importante para confiabilidade e proteção. Um método baseado em programação binária foi proposto em [42] para identificar o tipo (fusível ou religador), localização e o número necessário de equipamentos de proteção de tal maneira que o índice SAIFI fosse otimizado. Em outro trabalho, esse método foi aprimorado com a programação nebulosa ([43]) para que o processo de avaliação pudesse incorporar as interrupções momentâneas. A otimização entre os índices SAIFI e MAIFI foi realizada utilizando este método. Primeiramente, a técnica identifica a localização dos dispositivos de proteção e, em seguida, a decisão de se aplicar a estratégia de religamento automático é feita com base na melhoria máxima do índice SAIFI e na degradação mínima do índice MAIFI.

Em outro trabalho, um índice combinado foi proposto ([44]). Neste método, os locais ótimos para alocação dos religadores são identificados sem fazer qualquer alteração da posição original dos fusíveis ou de outros dispositivos. Os locais que levam a minimização deste índice combinado são os locais ótimos para a instalação do religador. O índice composto é baseado em uma soma ponderada dos índices SAIFI, SAIDI e $\mathrm{MAIFI_E}$, como mostra a equação (2.2.1):

$$\mathrm{CI} = P_1 \frac{\mathrm{SAIFI_C} - \mathrm{SAIFI_T}}{\mathrm{SAIFI_T}} + P_2 \frac{\mathrm{SAIDI_C} - \mathrm{SAIDI_T}}{\mathrm{SAIDI_T}} + P_3 \frac{\mathrm{MAIFI_C} - \mathrm{MAIFI_T}}{\mathrm{MAIFI_T}} \tag{2.2.1}$$

em que:

- $\mathrm{SAIFI_C}$, $\mathrm{SAIDI_C}$ e $\mathrm{MAIFI_C}$ são os valores calculados dos respectivos índices;
- $\mathrm{SAIFI_T}$, $\mathrm{SAIDI_T}$ e $\mathrm{MAIFI_T}$ são os valores de referência dos respectivos índices, definidos pela concessionária;
- P_1, P_2 e P_3 são os pesos correspondentes de cada índice ($P_1 + P_2 + P_3 = 1$).

Em [45], diferentes modos de operações do religador como "1 trip, lockout trifásico", "proteção monofásica nos alimentadores e 1 trip, lockout trifásico na subestação", "todos com proteção monofásica", "todos com proteção trifásica", etc., foram investigados. O trabalho concluiu que a estratégia "todos com proteção monofásica" foi a alternativa mais eficaz, capaz de melhorar os índices SAIFI, SAIDI e MAIFI em até 80% em comparação com a condição em que não há religadores no sistema.

O principal desafio com relação ao método acima é a dificuldade em determinar os valores dos pesos P_1, P_2 e P_3. Esses fatores refletem os custos relativos das interrupções sustentadas e momentâneas. Ortmeyer propôs um método ([46]) para estimar os custos das interrupções no qual os custos relacionados ao índice MAIFI são convertidos em um custo equivalente relacionado ao índice SAIFI. A partir destas estimativas, um índice combinado pode ser obtido através de (2.2.2):

$$\mathrm{SMAIF} = \mathrm{SAIFI} + \frac{\mathrm{MAIFI}}{\mathrm{SMRCR}} \tag{2.2.2}$$

onde SMRCR (do inglês *SAIFI-MAIFI Relative Cost Ratio*) é a relação entre os custos dos índices SAIFI e MAIFI, ou seja, a relação entre o custo das interrupções sustentadas e o custo das interrupções momentâneas. Para determinar esta proporção, Ortmeyer empregou os resultados obtidos em [26]. Adotando uma duração média de 2 horas para as interrupções sustentadas, a Tabela 2.7([26]) mostra o impacto, em termos monetários, de cada interrupção para diferentes classes de consumidores, comercial/industrial (C&I) e residencial. A proporção entre os custos varia de 1,39 a 2,91. Esta tendência uniforme sugere que uma única medida relativa pode ser adequada e justa para todas as classes de consumidores. Como resultado, o valor recomendado de SMRCR é de 2,0, ou seja, o custo associado a uma interrupção sustentada é, em média, cerca de duas vezes daquele associado a uma interrupção momentânea.

Tabela 2.7: Estimativa de custos associados às interrupções momentâneas e sustentadas (com duração de 2 horas) para diferentes classes de consumidores dos EUA ([26]).

Categoria	Custo de interrupções momentâneas ($/cliente)	Custo de interrupções sustentadas de 2 horas ($/cliente)	Razão do custo de int. de 2 horas para o custo de int. momentânea
C&I de grande porte, inverno, tarde	11.000	32.000	2,91
C&I de grande porte, verão, tarde	5.000	11.000	2,2
C&I de pequeno porte, inverno, tarde	1.300	2.400	1,85
C&I de pequeno porte, verão, tarde	900	1.200	1,89
C&I de pequeno porte, fim de semana	500	1.000	2,0
Residencial, sudoeste	3,2	4,8	1,5
Residencial, sudeste	2,3	3,6	1,57
Residencial, noroeste	2,0	2,8	1,40
Residencial, oeste	1,8	258	1,39

Outro estudo ([47]) mostrou que os índices SAIFI e MAIFI podem ser significativamente melhorados através de uma tecnologia para religadores automáticos denominada *Triple-Single*. Os religadores *Triple-Single* têm três modos de operação: (1) trip trifásico, lockout trifásico, (2) trip monofásico, lockout trifásico, e (3) trip monofásico, lockout monofásico. Um método baseado em simulações Monte Carlo foi usado para incorporar as múltiplas tentativas de religamento em [48] e para modelar descargas elétricas naturais em [49].

A otimização da alocação e realocação de religadores é abordada com uma implementação prática no Capítulo 5.

2.3 Comentários

Este capítulo apresentou uma análise de várias constatações relativas às interrupções momentâneas, incluindo os impactos sobre os consumidores, os custos decorrentes, a expectativa dos consumidores e as experiências das concessionárias. As principais conclusões podem ser resumidas como segue:

- Muitos dispositivos e consumidores são sensíveis às interrupções momentâneas com duração inferior a 10 segundos. Cerca de 25% das instalações industriais são afetadas por interrupções com durações de até 10 ciclos.

- O custo total das interrupções momentâneas geralmente é maior que aquele decorrente das interrupções sustentadas simplesmente porque as interrupções momentâneas são mais frequentes. No entanto, o custo por evento pode ser maior para as interrupções sustentadas em função da duração da interrupção. Estudos mostram que o custo total das interrupções momentâneas foi de cerca de duas vezes o custo total das interrupções sustentadas, mas a proporção entre os custos de uma interrupção sustentada (2 horas de duração) e uma interrupção momentânea apresenta valor aproximado entre 1,5 e 3. Da mesma forma, outro estudo mostrou que o custo de um evento de religamento foi de 1,3 vezes o custo de uma interrupção de 3 minutos, mas apenas 0,36 vezes o custo de uma interrupção de 1 hora.

- Consumidores industriais e comerciais são os mais afetados em termos de perdas econômicas devido às interrupções de energia. Portanto, apresentam expectativas muito altas. Os resultados dos levantamentos mostraram que eles esperam um serviço de fornecimento de energia três vezes mais confiável se comparado com as expectativas dos consumidores residenciais.

- Muitas empresas já começaram a dar mais atenção às interrupções momentâneas. Em resposta ao aumento de queixas em relação às interrupções momentâneas, o número de concessionárias que adotavam a estratégia de religamento automático diminuiu de 91% em 1988 para 66% em 2000. Um diferente estudo mostrou que o número é ainda menor (40% em 1996).

- Em termos de práticas de regulamentação, normas regulamentadoras para informar dados relativos aos níveis de interrupções momentâneas ainda não foram estabelecidas. Em uma pesquisa recente (2003), apenas 48% (32 de 66) das concessionárias relataram que o órgão regulador é quem define como os dados de interrupções devem ser informados. Cerca de 37% das concessionárias usam ambos os índices associados às interrupções sustentadas e momentâneas (SAIFI e MAIFI) para a avaliação da confiabilidade do sistema.

- Em termos da frequência das faltas permanentes e temporárias, a conclusão é que faltas temporárias são ainda mais frequentes. No entanto, não são tão frequentes como se pensa. Com base nos levantamentos realizados, pode-se estimar que, em geral cerca de 20% das faltas são permanentes e 80% são temporárias.

- As ferramentas e métodos para avaliar o impacto das faltas nos alimentadores nos níveis de qualidade de energia e confiabilidade, especialmente naqueles alimentadores com religadores automáticos, não são maduras. Ainda não há métodos que sejam amplamente aceitos para estudar o problema.

Capítulo 3

Processamento de dados históricos de interrupções

Os benefícios da estratégia de religamento automático são dependentes da relação entre o número de faltas permanentes e temporárias. Uma proporção menor sugere mais faltas temporárias, e, portanto, o esquema de religamento automático é mais atrativo. No entanto, esta relação unicamente não pode revelar a eficácia do esquema de religamento. A eficácia pode ser mais bem avaliada através da relação entre operações bem sucedidas (fusível é preservado — *fuse saving*) e não sucedidas (fusível não é preservado — *fuse clearing*). Não existem métodos simples para determinar estas relações, uma vez que tais cálculos dependem do tipo de dados que estão disponíveis.

Para o desenvolvimento deste trabalho, uma empresa canadense forneceu os seus dados associados às interrupções. Com base nestes dados, um conjunto de algoritmos foi desenvolvido e os valores dos índices foram determinados. Os resultados são úteis para obter um maior entendimento sobre o valor real da prática do religamento automático para o sistema estudado. Apesar da análise ser realizada com dados específicos da empresa, a apresentação realizada neste capítulo pode ser facilmente adaptada a cenários nos quais há dados de um registro de interrupções no estilo dos *Outage Management Systems* que possam ser suplementados por dados de sensores diversos, conforme será apresentado.

3.1 Dados fornecidos

Os dados fornecidos, referentes a cinco anos de operação da concessionária (de 2004 a 2008), incluem:

Dados do *Outage Management System* (OMS): com as seguintes informações: *(a)* localização das interrupções em termos de número de barra ou secção do alimentador; *(b)* horário de início e fim da interrupção; *(c)* número de consumidores afetados; *(d)* dispositivos de proteção envolvidos na remoção da falta: sequência de operação, tipo de dispositivos e localização dos dispositivos; *(e)* causas. Os dados listados de *(a)* a *(e)* são empregados no cálculo dos índices de confiabilidade como SAIDI e SAIFI. A informação sobre causas e/ou dispositivos de

proteção envolvidos permite que a metodologia descarte eventos planejados e eventos relacionados a falhas e interrupções de origem no sistema de transmissão ou na subestação principal.

Dados de interrupções coletados localmente: estes dados são coletados por sensores distribuídos capazes de reportar interrupções e quedas de tensão de alimentação de um consumidor, como os dispositivos sentinelas (*sentry devices*) instalados tipicamente juntos aos consumidores, de forma amostrada. Tais dados incluem: *(f)* código de identificação do dispositivo; *(g)* localização do dispositivo; *(h)* horários de início e término da interrupção; *(i)* informação sobre o local de instalação do equipamento como tipo de instalação e principalmente se há presença de geradores ou qualquer outro sistema de *backup*. Estes dispositivos são muito úteis, pois interrupções momentâneas e afundamentos de tensão podem ser inferidos destes dados e tal informação não é normalmente incluída na maioria dos OMSs, em que somente interrupções sustentadas são analisadas. Adicionalmente, as interrupções sustentadas presentes nos dados do OMS podem ser analisadas mais detalhadamente ao utilizar os dados dos sensores.

Os dados de interrupções locais e do OMS serão utilizados em conjunto para calcular os índices de confiabilidade e outros dados estatísticos úteis como número de faltas temporárias versus faltas permanentes, número de operações úteis dos religadores, índices de eficiência de religadores, razão de sucesso na eliminação da falta durante a primeira, segunda e terceira operação dos religadores (este dado pode ajudar na decisão de quantas tentativas serão utilizadas na configuração do equipamento), entre outros. A determinação de outras informações úteis também é investigada. Para dar uma ordem de dimensão, esta concessionária possui cerca de 500.000 consumidores e o número de sensores instalados é de cerca de 1.000 equipamentos.

3.2 Metodologia de processamento

Na metodologia proposta, os dados são classificados de acordo com cinco tipos de eventos (A, B, C, D e E) como segue:

Tipo A: são eventos que têm início como interrupções sustentadas. Um exemplo deste tipo de evento é quando fusíveis que não estão coordenados com um religador operam como primeira linha de atuação do sistema de proteção. Como estes eventos estão relacionados às interrupções sustentadas, as informações sobre eles estão incluídas simultaneamente nos dados do OMS e dos sensores.

Tipo B: são os eventos que se iniciaram como eventos momentâneos e, depois de uma operação mal sucedida do religador, evoluem para eventos sustentados devido à atuação de fusíveis. Estes eventos são classificados como operações de religamento automático que não evitaram a operação (queima) do fusível. Como os eventos estão relacionados a interrupções sustentadas, as informações sobre eles estão incluídas nos dados do OMS e dos sensores distribuídos.

Tipo C: são os eventos que começaram como eventos momentâneos e, depois da operação mal sucedida do religador automático, evoluem para eventos sustentados devido a qualquer operação de chaveamento (abertura de disjuntor, bloqueio do religador, etc.). Embora estes eventos

não possam ser classificados como operações de religamento automático que não evitaram a operação do fusível, dado que nenhum fusível estava envolvido no processo de eliminação da falta, a utilização de religadores para eliminar este tipo de falta permanente é questionável, já que outros dispositivos de proteção podem ser mais adequados para eliminar tais faltas. Como os eventos estão relacionados a interrupções sustentadas, as informações sobre eles estão incluídas nos dados do OMS e também dos sensores.

Tipo D: são eventos momentâneos causados por faltas temporárias e eliminados com êxito por meio de operações do religador, quando as faltas ocorrem a jusante de um fusível. A maioria destes eventos está relacionada com o primeiro ciclo de operação do religador (ou seja, a falta é eliminada com êxito durante o estágio de atuação rápida do religador), entretanto, poucos eventos são eliminados durante o estágio com atuação temporizada do religador sem que ocorra a queima do fusível (o número de ocorrências deste tipo de evento é baixo). Assim, existe um subtipo do evento D, associados apenas ao primeiro estágio de operação do religador e será chamado de D*, que na verdade representa as operações do religador que não resultaram na queima do fusível. Como os eventos estão relacionados à interrupção momentânea, informações sobre eles estão incluídas apenas nos dados dos sensores.

Tipo E: são eventos momentâneos causados por faltas temporárias e eliminadas pela atuação de religadores quando as faltas ocorrem entre o religador e qualquer fusível a jusante. Embora estes eventos não podem ser classificados como operações do religador que não resultaram na queima do fusível, são eventos relacionados a faltas temporárias que devem ser eliminadas usando religadores. Sendo assim, estes eventos representam situações em que vale a pena utilizar religadores. Como para o tipo D, um subtipo do evento E contendo apenas operações únicas (apenas 1 ciclo) do religador será chamado de E*. Os eventos estão relacionados às interrupções momentâneas, e, portanto, as informações sobre eles estão incluídas somente nos dados dos sensores.

Itens Descartados: alguns eventos presentes nos dados do OMS e dos sensores são descartados devido a inconsistências ou por serem irrelevantes à análise. Exemplos destes itens são eventos relacionados a possíveis falhas dos sensores (dispositivos sentinelas) e eventos relacionados a falhas no sistema de transmissão de dados.

A Figura 3.1 ilustra a classificação dos eventos descritos anteriormente e a relação com os dados disponíveis nos dados do OMS e dos sensores.

Neste ponto, alguns esclarecimentos são necessários:

- Com base nos dados disponíveis, a classificação entre os eventos dos tipos B e C é simples uma vez que esses são eventos sustentados e, consequentemente, as informações detalhadas estão incluídas nos arquivos do OMS a serem utilizados no processo de classificação, incluindo a causa da interrupção e dispositivo de proteção que atuou.

- A diferença entre os eventos do tipo D e E pode ser mais bem compreendida através da Figura 3.2. No caso de faltas nos pontos 2 e 3, considerando apenas faltas temporárias eliminadas pela a ação bem sucedida do religador R, as operações dos religadores evitaram

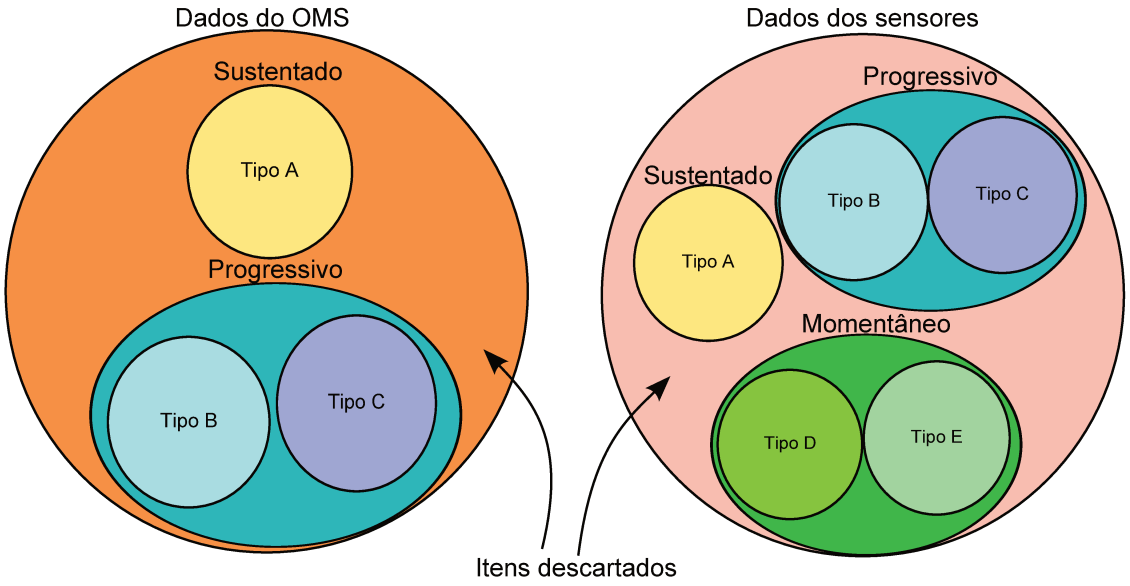

Figura 3.1: Relação entre os dados do OMS e dos sensores e a classificação dos eventos.

a queima dos fusíveis a montante das faltas, consequentemente, esses eventos são do tipo D. Por outro lado, no caso de uma falta temporária no ponto 1, a operação do religador não evitou a queima de nenhum fusível, embora esta operação tenha evitado a atuação desnecessária de qualquer esquema de proteção na subestação ou a montante da subestação, o que poderia resultar em problemas mais sérios de qualidade de energia e confiabilidade. Este é um exemplo do tipo de evento E.

- A classificação precisa entre eventos tipo D e E não é simples (talvez impossível), utilizando os dados disponíveis, uma vez que são eventos momentâneos e, consequentemente, não há nenhuma informação detalhada nem nos dados do OMS nem nos dados dos sensores. Esta é a principal dificuldade para analisar apenas os casos concretos de *fuse saving*. No entanto, como será explicado mais adiante, esta dificuldade pode ser parcialmente superada com base em algumas suposições.

- A diferença entre os termos "sustentado", "progressivo (sustentado)" e "momentâneo", presentes na Figura 3.1, pode ser entendida a partir da Figura 3.3. Nesta figura, um sinal alto OFF indica que houve interrupção no fornecimento de energia elétrica. Deve ser notado que, em um estudo clássico de confiabilidade, "sustentado" e "progressivo sustentado" são simplesmente classificados como eventos sustentados.

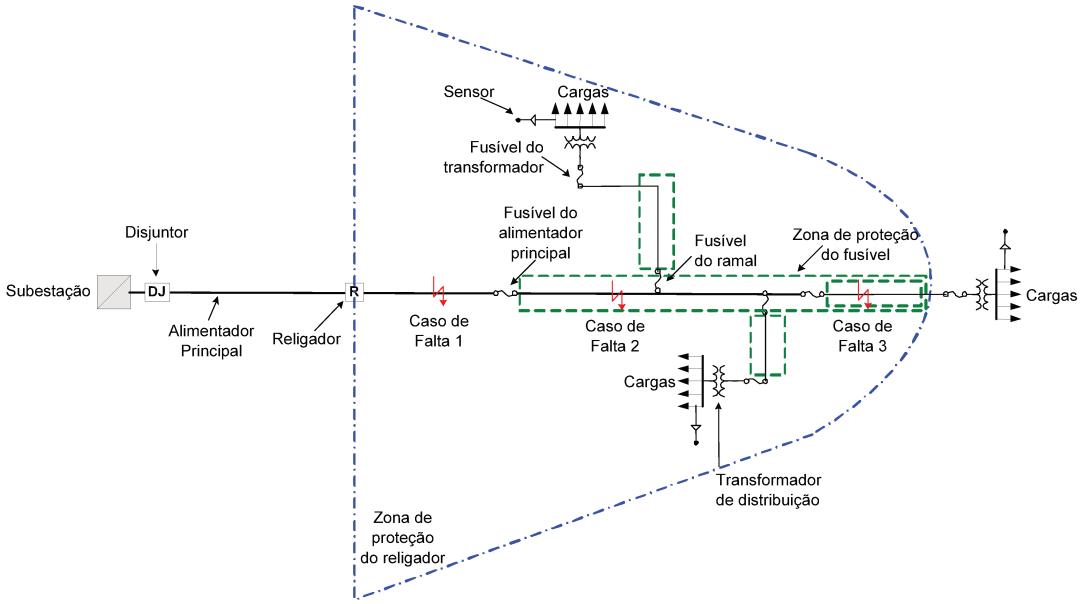

Figura 3.2: Diferença entre operações que evitam a queima de fusíveis (*fuse saving*) e aquelas que não evitam considerando apenas faltas temporárias.

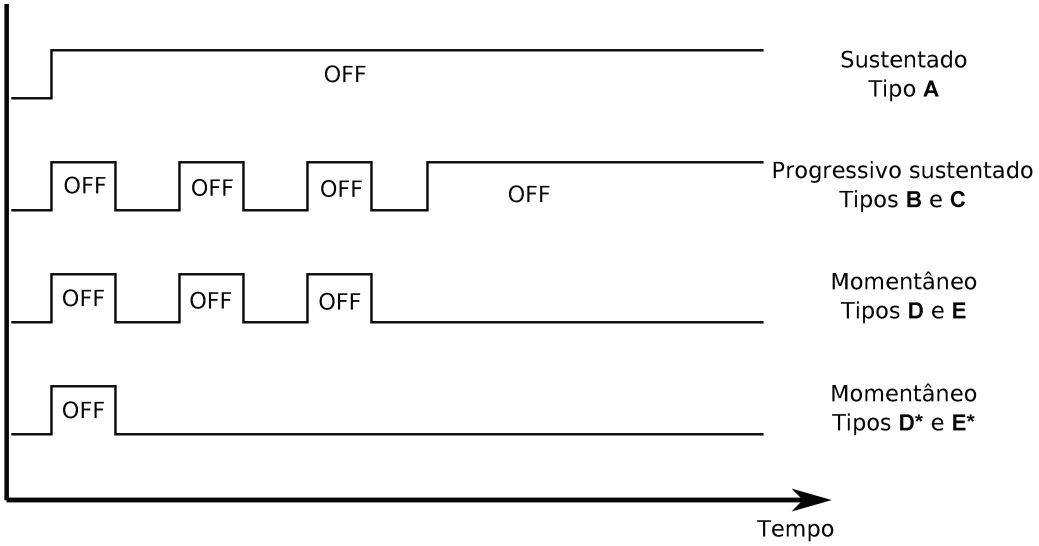

Figura 3.3: Comparação em termos “sustentado”, “progressivo sustentado” e “momentâneo”.

3.2.1 Detalhamento

Nesta subseção são apresentadas as principais características da implementação da metodologia de filtragem e classificação proposta frente aos dados fornecidos pela concessionária. Uma descrição visual simplificada é mostrada na Figura 3.4: os eventos dos sensores são processadores e agrupados em eventos de interrupções de acordo com suas características, realiza-se o casamento

das informações dos sensores e do OMS e, finalmente, realiza-se a classificação de cada conjunto casado. Nas figuras desta seção, cada evento de interrupção é representado por um retângulo, cuja posição horizontal representa o instante de registro listado nos dados e o comprimento representa a duração registrada.

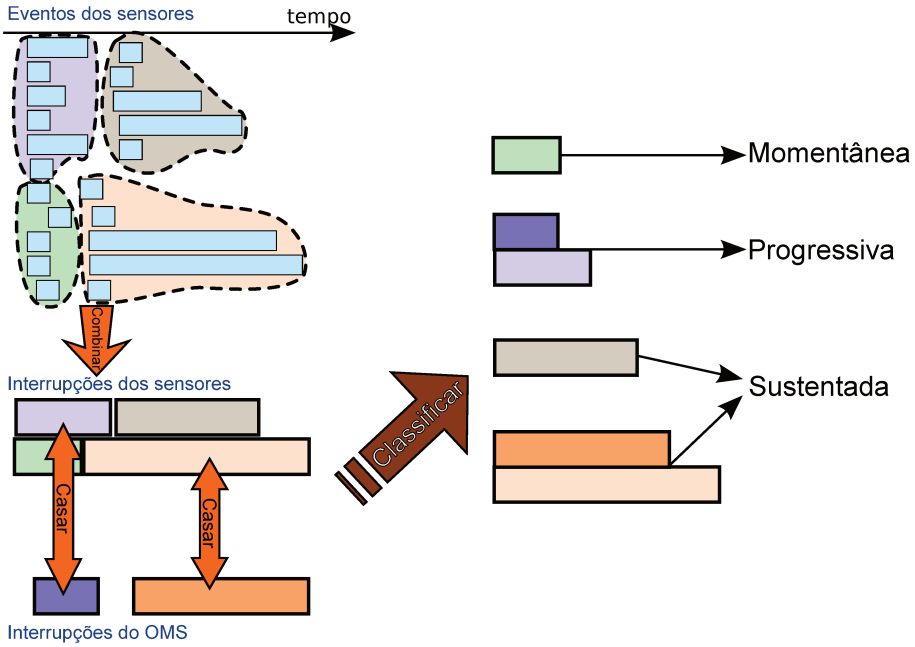

Figura 3.4: Visão geral do processamento dos dados.

O método está dividido em quatro etapas principais, descritas em detalhe nas seções a seguir:

- Combinação de eventos dos sensores
- Casamento sensores-OMS
- Combinação de interrupções não associadas
- Classificação

Combinação de eventos dos sensores

Nesta etapa, o principal objetivo é identificar as interrupções reportadas por diferentes sensores que são relacionadas ao mesmo evento primário de interrupção. Isto ocorre quando dois ou mais dispositivos sensores são instalados a jusante da falta. Em alto nível, o processo pode ser representado pela Figura 3.5.

Todas as ocorrências nos dados dos sensores são inicialmente identificadas por seu campo de estado indicando interrupção (“OFF”) e são ordenadas pelos respectivos instantes de ocorrência.

Todos os sensores estão instalados a jusante de uma subestação fonte principal (subestação que conecta o sistema de distribuição ao sistema de transmissão), cuja informação está incluída nos

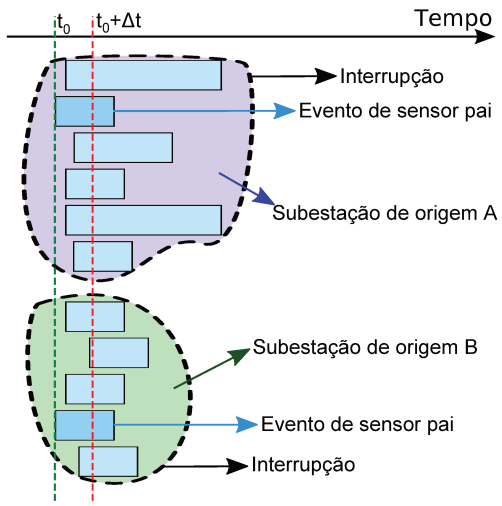

Figura 3.5: Combinação dos eventos dos sensores

registros de dados dos sensores. Assim, de forma a combinar diferentes eventos dos sensores em uma interrupção, emprega-se um pequeno atraso de tempo (Δt na Figura 3.5) entre os eventos OFF de cada evento de sensor (por exemplo, 0,25 s) e é verificado se os sensores estão conectados a jusante da mesma subestação fonte. Se os eventos de diferentes sensores são iniciados a menos de 0,25 s (como exemplo) entre si e os sensores estão conectados à mesma subestação, assume-se que os eventos reportam o mesmo evento primário de interrupção. O atraso é empregado a fim de contornar erros de sincronização, configurações diferentes e erros na detecção do estado.

Como ilustrado na Figura 3.5, o primeiro (no tempo) dos registros em cada grupo é selecionado como "evento de sensor pai". A duração efetiva do evento representado pelo grupo é dada pela diferença entre os instantes do último evento a terminar e do evento pai.

Além de combinar os eventos de sensor relacionados à mesma interrupção, os seguintes eventos são marcados para serem descartados, se desejado:

- Eventos reportados nos registros dos sensores com subestação fonte não presente nos dados do OMS podem ser descartados, visto que é impossível determinar onde o sensor está instalado.

- Eventos de curta duração (como $<$ 1s) também podem ser descartados dado que estes eventos provavelmente são relacionados a subtensão (i.e., afundamentos de tensão, visto que o sensor empregado neste projeto reporta ausência de energia quando a tensão é menor do que 0,5 pu e o evento dura pelo menos 3 ciclos) e não interrupções.

- Eventos possivelmente originados no sistema de transmissão podem ser descartados. São eventos com durações entre 6 e 16 segundos de acordo com sugestão de engenheiros da concessionária. Alternativamente pode-se verificar se, além de ter duração de mais de 6 segundos, são registrados eventos OFF para sensores conectados a uma mesma subestação fonte. Caso positivo, provavelmente trata-se de evento originado no sistema de transmissão.

Casamento sensores-OMS

O objetivo desta etapa, representada na Figura 3.6, é relacionar (casar) todas as interrupções presentes nos dados dos sensores com as respectivas interrupções descritas nos dados do OMS. O casamento só ocorre se os eventos estão relacionados à mesma subestação fonte e três mecanismos de associação são empregados.

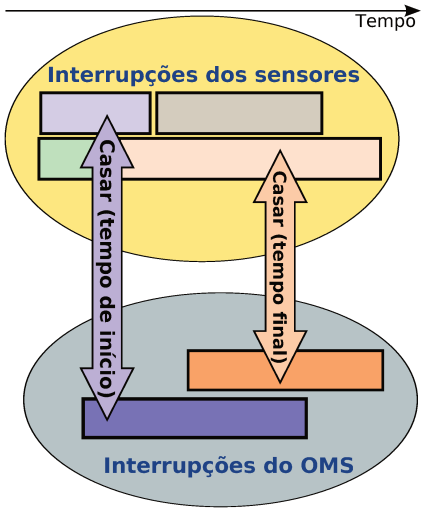

Figura 3.6: Casamento de interrupções registradas pelos sensores e no OMS.

Os sensores registram o fim de uma interrupção quase instantaneamente e pode-se assumir que a informação também é registrada no OMS em seguida, separados no máximo por alguns minutos entre si. Um registro de interrupção do OMS é casado com o evento de sensor que terminar a alguns minutos do registro do fim da interrupção no OMS.

Registros no OMS podem ocorrer minutos após o início efetivo da interrupção. É empregado um atraso máximo de, por exemplo, 30 minutos, entre o início de um evento reportado por um sensor e o início registrados nos dados do OMS, casando-se cada interrupção de sensor com as interrupções listadas no OMS dentro do período de atraso.

Após o casamento através do início e fim das interrupções, uma interrupção de OMS pode estar associada a múltiplas interrupções de sensor. Apenas a mais provável interrupção de sensor é mantida associada e as outras são desassociadas. A interrupção de sensor escolhida é aquela com duração mais longa que a interrupção do OMS e, caso não exista, escolhe-se a última em termos de instante de registro.

O terceiro mecanismo de casamento consiste em tentar associar interrupções de sensor ainda não associadas ("interrupções livres") aos grupos de interrupções sensor-OMS já existentes, como visto na Figura 3.7. Para cada interrupção de sensor já associada, é verificado se há interrupções não associadas que ocorreram em um intervalo de, por exemplo, 30 minutos antes do início da interrupção ou terminaram 5 minutos após o fim da interrupção. Caso existam, tais interrupções são associadas.

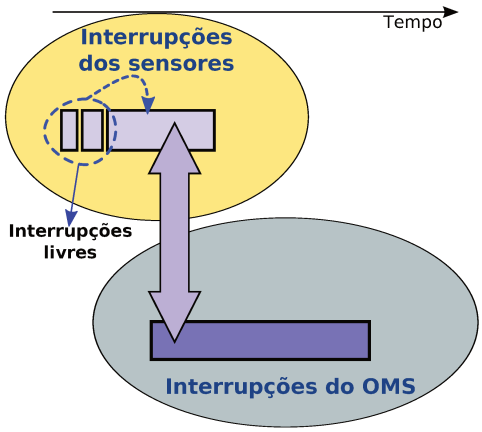

Figura 3.7: Combinação de interrupções ainda não associadas.

Combinação de interrupções de sensor não associadas

As interrupções livres restantes são processadas em eventos, agrupando diversos registros em um único grupo. É um processo parecido ao esquematizado pela Figura 3.5, com duas diferenças: 1) é empregada a duração máxima de evento momentâneo escolhido ao invés do atraso Δt entre os sensores, e 2) comparam-se os instantes de fim de interrupção ao invés do início.

Classificação

Nesta etapa classificam-se os eventos de interrupção nos tipos definidos na Seção 3.2. São utilizados tanto os eventos casados (sensores-OMS) quanto interrupções de sensor não associados ao OMS, divindo os itens em três grupos, esquematizados na Figura 3.8:

Interrupção sustentada direta (tipo A): eventos nos quais ao menos uma das interrupções associadas é mais longa que a duração de evento momentâneo e não há mais de um chaveamento detectado por cada sensor.

Interrupção sustentada progressiva (tipos B e C): consiste em uma sequência de chaveamentos (mínimo de dois registros de interrupção para pelo menos um dos sensores) e uma ou mais interrupções sustentadas. Este tipo indica operações de religadores sem sucesso na eliminação de falta.

Evento de interrupção momentânea (tipos D e E): conjuntos de interrupções que não contêm interrupções com duração maior que o parâmetro de duração de evento momentâneo. Provavelmente são causadas por operações de religador que preservaram fusíveis com sucesso ao eliminar faltas temporárias.

A classificação é realizada através da inspeção de todos os dados associados a um evento, sejam eles originários dos sensores ou do OMS, se casamentos puderam ser realizados com sucesso. Uma visão global da etapa pode ser vista na Figura 3.9.

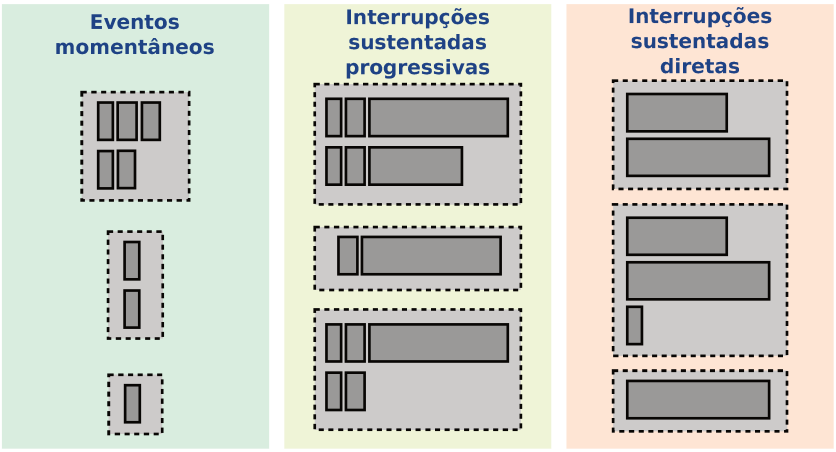

Figura 3.8: Exemplos de eventos classificados, onde os retângulos tracejados representam eventos (grupos de registros de interrupções) e os retângulos sólidos, preenchidos em cinza escuro, representam os registros de interrupções.

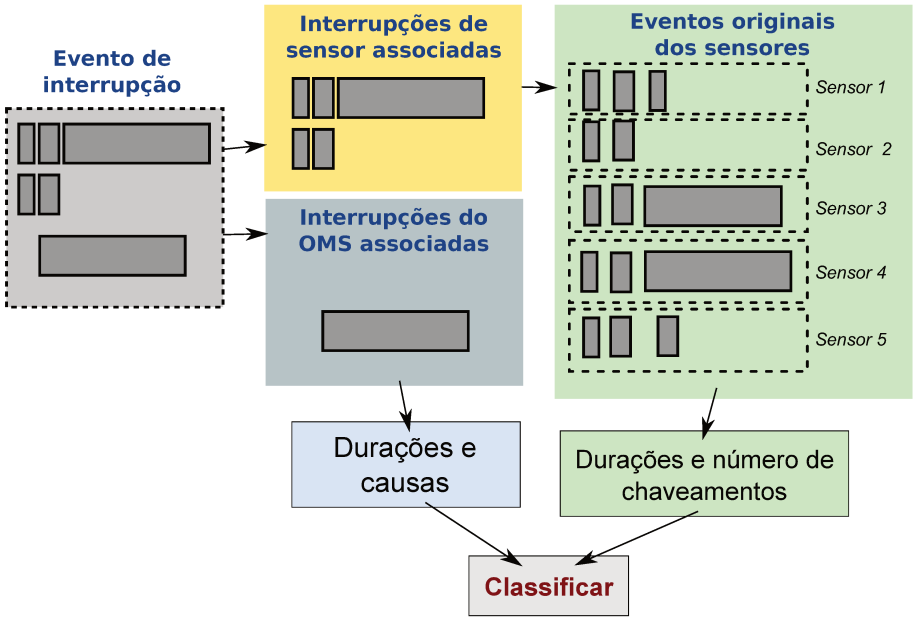

Figura 3.9: Um evento de interrupção, seus dados associados e classificação no tipo mais adequado através de sua inspeção.

Dados como causas e dispositivos relacionados, disponíveis no OMS, podem ser filtrados para permitir maior análise dos números de interrupções. Alguns dos eventos podem ser descartados nesta etapa, entre eles interrupções planejadas (assim marcadas nos dados do OMS), além de todos os tipos de evento sustentado (progressivo ou não) presentes apenas nos dados dos sensores. Tais eventos sustentados são muitas vezes relacionados a falhas no funcionamento dos sensores.

Parâmetros de execução

Uma coleção de parâmetros de execução da implementação da metodologia foi criada a fim de permitir adequação das diversas etapas a diferentes análises. Uma breve explicação de cada parâmetro está listada abaixo.

Atraso de sincronização entre sensores (em segundos): é o tempo máximo de atraso entre dois eventos detectados pelos sensores para que eles sejam agrupados como uma interrupção.

Limiar para classificação como afundamento de tensão (em segundos): este parâmetro especifica um limite de duração para descarte de eventos dos sensores, ou seja, eventos detectados pelos sensores com duração menor do que esse valor são descartados, pois não são úteis na análise.

Descartar interrupções não-auditadas: interrupções observadas no sistema estudado que afetaram mais de 100 clientes são auditadas, resultando em dados nos arquivos OMS com qualidade assegurada para estes casos específicos. Esta é uma opção para descartar as interrupções que provavelmente não são auditadas.

Descartar interrupções planejadas: interrupções planejadas resultam, por exemplo, de manutenção programada. As interrupções resultantes são esperadas e não devem ser utilizadas na análise do religadores.

Descartar interrupções detectadas por um único dispositivo sentinela: um estado OFF (interrupção de fornecimento) registrado por um único sensor pode indicar um mau funcionamento do dispositivo.

Descartar interrupções advindas do sistema de transmissão: interrupções com duração entre 6 e 16 segundos são provavelmente relacionadas a manobras de chaveamento na transmissão, e, por isso, devem ser excluídas da análise.

Descartar afundamentos de tensão: especifica se os eventos dos sensores com durações mais curtas do que o limiar de afundamentos de tensão, descrito acima, devem ser descartados.

Atraso entre OMS e sensor, início (em minutos): este parâmetro indica o máximo atraso permitido para associar uma interrupção do OMS com uma interrupção de sensor, comparando os respectivos inícios de cada interrupção.

Atraso entre OMS e sensor, fim (em minutos): este parâmetro indica o máximo atraso permitido para associar uma interrupção do OMS com uma interrupção de sensor, comparando os respectivos finais de cada interrupção, ou seja, períodos de restauração.

Limiar de evento momentâneo (em minutos): este é o limite para as durações de eventos momentâneos. Eventos com duração superior a este valor são considerados sustentados.

Limiar de operação do religador (em segundos): eventos momentâneos com duração superior ao valor especificado neste parâmetro podem ser classificados como provenientes de religadores.

3.2.2 Estimativa da razão entre faltas permanentes e temporárias

Os métodos de filtragem e classificação desenvolvidos neste trabalho são capazes de determinar, com razoável precisão, o número dos vários tipos de eventos. A razão entre o número de faltas permanentes e temporárias pode ser estimada por (3.2.1) e (3.2.2):

$$\text{Faltas permanentes (\%)} = \left(\frac{\text{Tipo A} + \text{Tipo B} + \text{Tipo C}}{\text{Tipo A} + \text{Tipo B} + \text{Tipo C} + \text{Tipo D} + \text{Tipo E}} \right) \times 100 \qquad (3.2.1)$$

$$\text{Faltas temporárias (\%)} = \left(\frac{\text{Tipo D} + \text{Tipo E}}{\text{Tipo A} + \text{Tipo B} + \text{Tipo C} + \text{Tipo D} + \text{Tipo E}} \right) \times 100 \qquad (3.2.2)$$

em que "Tipo X" significa o número de eventos do tipo X contados pelo algoritmo de filtragem e classificação. A aplicação destas expressões aos dados estudados é apresentada na Seção 3.3.1.

3.2.3 Índice de eficiência da operação do religador

Uma relação mais importante é o índice de eficiência no uso de religadores. Com base na classificação anteriormente discutida, pode-se extrair as seguintes conclusões:

- Eventos do tipo A não trazem nenhuma informação sobre a utilidade do uso de religadores uma vez que não há operações de religadores envolvidos com este tipo de evento.
- Eventos dos tipos B e C estão relacionados a situações em que as operações do religador causaram interrupções momentâneas para um grande número de consumidores, porém não auxiliaram no processo de eliminação das faltas. Assim, para estas situações, a melhor opção seria eliminar os religadores.
- Eventos dos tipos D* e E* estão relacionados com a situação em que a presença do religador foi benéfica para o sistema, uma vez que eventos tipo D* de fato representam as operações dos religadores que evitaram a queima de fusíveis, as quais tem efeito positivo para o sistema, e eventos do tipo E* que, embora não representem operações dos religadores que evitaram queima de fusíveis, estão relacionados a faltas temporárias que devem ser eliminadas usando religadores, pois, caso contrário seriam eliminadas por outros dispositivos de chaveamento a montante, o que afetaria um número maior de consumidores. Portanto, estes eventos representam situações em que vale a pena empregar religadores.
- O número total de eventos dos tipos D e E inclui, além dos eventos relacionados a operações do religador que evitaram a queima do fusível e aqueles para os quais vale a pena utilizar

religadores, denominados Tipo D* e E*, as situações em que a eliminação das faltas não ocorre durante o primeiro ciclo de chaveamento do religador. Consequentemente, o uso de religadores durante estes eventos é questionável.

Com base nestas observações, o índice reproduzido em (3.2.3) é proposto para medir a eficiência das operações de religamento, que é aqui denominado de *índice de eficiência do religador*, R_{ef}:

$$R_{ef} = \left(\frac{\text{Tipo D*} + \text{Tipo E*}}{\text{Tipo B} + \text{Tipo C} + \text{Tipo D} + \text{Tipo E}} \right) \times 100 \tag{3.2.3}$$

Basicamente, o índice mede a razão entre o número de operações do religador útil para o sistema versus o número total de operações do religador. Uma análise destes números, tendo em consideração os dados fornecidos, é apresentada na próxima seção.

3.3 Resultados

Após o processamento e análise dos dados de acordo com a metodologia apresentada, foram calculados os resultados apresentados nesta seção.

3.3.1 Razão entre faltas permanentes e temporárias

A soma do número de faltas do tipo A, B e C representa o total de faltas permanentes, enquanto a soma do número de faltas classificadas como D e E representam as faltas temporárias. Esta informação pode ser usada para calcular a distribuição entre as faltas permanentes e temporárias usando as expressões (3.2.1) e (3.2.2). Os valores resultantes por ano para o período analisado são mostrados nas Tabelas 3.1 a 3.5. Como pode ser observado, embora a relação varie de mês para mês durante os 5 anos de análise, a proporção apresenta média de 51,8% durante os cinco anos de análise, com desvio padrão de 8,2%. Um gráfico ilustrando a razão ao longo dos meses de cada ano está reproduzido na Figura 3.10, enquanto o histograma e o ajuste à distribuição normal podem ser vistos na Figura 3.11.

3.3.2 Índice de eficiência do religador

Os resultados do método de classificação proposto para os diferentes tipos de eventos, bem como os resultados relacionados ao índice de eficiência do religador (R_{ef}) para os 5 anos em análise são apresentados nas Tabelas 3.6 a 3.10. Os valores do índice R_{ef} calculado para todos esses anos, de 2004 a 2008, variam de 60% a 66,3%. Para diferentes meses, o índice varia consideravelmente, variando de 47% a 80%, como pode ser melhor observado na Figura 3.12. O histograma e o ajuste à distribuição normal dos valores calculados, cuja média é de 65,05% e 8,06%, podem ser vistos na Figura 3.13. Observa-se que o ajuste não é tão adequado quanto ao obtido para a razão de faltas temporárias na Figura 3.11.

Os valores sugerem que, para o sistema estudado, as operações dos religadores têm êxito em cerca de 65% das tentativas em evitar a queima dos fusíveis. É importante destacar alguns fatos:

Tabela 3.1: Razão entre faltas permanentes e temporárias para o ano de 2004.

Período	Permanentes	Temporárias
Janeiro	40,3%	59,7%
Fevereiro	36,3%	63,7%
Março	54,8%	45,2%
Abril	54,9%	45,1%
Maio	43,5%	56,5%
Junho	37,7%	62,3%
Julho	39,6%	60,4%
Agosto	29,9%	70,1%
Setembro	43,8%	56,2%
Outubro	48,3%	51,7%
Novembro	45,0%	55,0%
Dezembro	53,7%	46,3%
Total	44,2%	55,8%

Tabela 3.2: Razão entre faltas permanentes e temporárias para o ano de 2005.

Período	Permanentes	Temporárias
Janeiro	58,2%	41,8%
Fevereiro	45,2%	54,8%
Março	55,0%	45,0%
Abril	50,7%	49,3%
Maio	57,7%	42,3%
Junho	37,7%	62,3%
Julho	50,0%	50,0%
Agosto	47,1%	52,9%
Setembro	49,1%	50,9%
Outubro	48,5%	51,5%
Novembro	50,2%	49,8%
Dezembro	43,7%	56,3%
Total	48,9%	51,1%

Tabela 3.3: Razão entre faltas permanentes e temporárias para o ano de 2006.

Período	Permanentes	Temporárias
Janeiro	54,4%	45,6%
Fevereiro	36,3%	63,7%
Março	59,0%	41,0%
Abril	51,5%	48,5%
Maio	42,0%	58,0%
Junho	48,5%	51,5%
Julho	48,5%	51,5%
Agosto	33,8%	66,2%
Setembro	37,0%	63,0%
Outubro	49,1%	50,9%
Novembro	60,5%	39,5%
Dezembro	57,3%	42,7%
Total	47,8%	52,2%

Tabela 3.4: Razão entre faltas permanentes e temporárias para o ano de 2007.

Período	Permanentes	Temporárias
Janeiro	53,9%	46,1%
Fevereiro	53,4%	46,6%
Março	35,8%	64,2%
Abril	63,5%	36,5%
Maio	37,7%	62,3%
Junho	58,3%	41,7%
Julho	47,0%	53,0%
Agosto	43,9%	56,1%
Setembro	45,0%	55,0%
Outubro	67,2%	32,8%
Novembro	55,9%	44,1%
Dezembro	41,0%	59,0%
Total	50,9%	49,1%

Tabela 3.5: Razão entre faltas permanentes e temporárias para o ano de 2008.

Período	Permanentes	Temporárias
Janeiro	42,1%	57,9%
Fevereiro	36,7%	63,3%
Março	44,1%	55,9%
Abril	42,9%	57,1%
Maio	47,9%	52,1%
Junho	60,3%	39,7%
Julho	53,5%	46,5%
Agosto	48,3%	51,7%
Setembro	55,0%	45,0%
Outubro	47,3%	52,7%
Novembro	58,9%	41,1%
Dezembro	54,5%	45,5%
Total	52,1%	47,9%

- Nesta análise, o número de consumidores afetados não foi considerado, e, portanto, o cálculo do índice R_{ef} sozinho não pode trazer uma perspectiva completa sobre a situação.
- Embora o cálculo do índice R_{ef} para o sistema completo exponha informações úteis, ele é proposto para ser aplicado individualmente para o religador ou o alimentador em uma análise caso a caso, a qual pode ser feita se dados adicionais estiverem disponíveis.

Os valores utilizados para os parâmetros de execução, conforme descritos na Seção 3.2.1, são apresentados na Tabela 3.11.

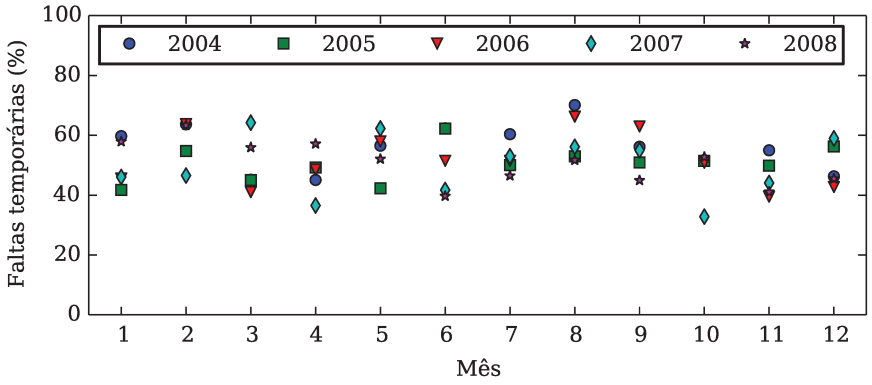

Figura 3.10: Porcentagem das faltas do tipo temporárias ao longo dos meses, nos cinco anos estudados.

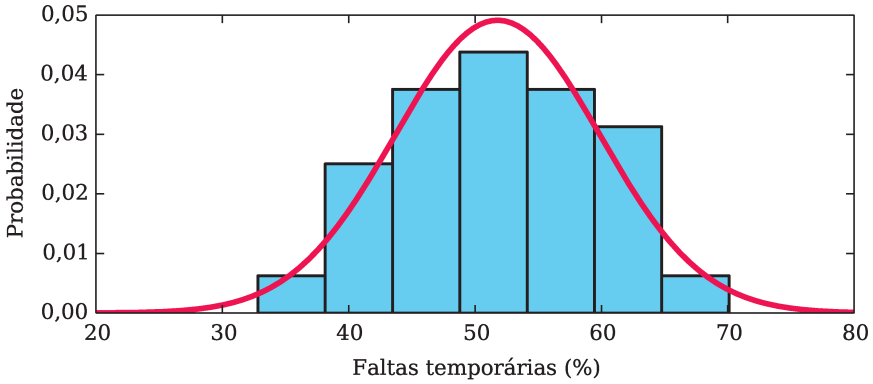

Figura 3.11: Histograma e ajuste (distribuição normal) da porcentagem das faltas do tipo temporárias no período estudado.

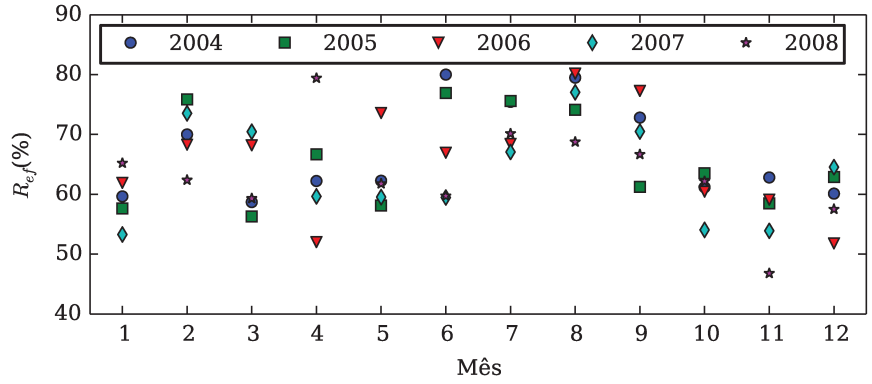

Figura 3.12: Índice R_{ef} calculado ao longo dos meses, nos cinco anos estudados.

Tabela 3.6: Número de eventos por tipo e índice de eficiência do regulador para o ano de 2004.

Período	(A) Sustentada	(B+C) Progressiva	(D+E) Momentânea	(D+E)* Momentânea (1° ciclo)	$R_{ef} = \frac{D*+E*}{B+C+D+E}$
Janeiro	15	14	43	34	59,6%
Fevereiro	43	38	142	126	70,0%
Março	16	18	28	27	58,7%
Abril	26	13	32	28	62,2%
Maio	16	14	39	33	62,3%
Junho	22	7	48	44	80,0%
Julho	45	18	96	86	75,4%
Augusto	19	10	68	62	79,5%
Setembro	43	21	82	75	72,8%
Outubro	31	25	60	52	61,2%
Novembro	141	121	320	277	62,8%
Dezembro	82	55	118	104	60,1%
Total	499	354	1076	948	66,3%

Tabela 3.7: Número de eventos por tipo e índice de eficiência do regulador para o ano de 2005.

Período	(A) Sustentada	(B+C) Progressiva	(D+E) Momentânea	(D+E)* Momentânea (1° ciclo)	$R_{ef} = \frac{D*+E*}{B+C+D+E}$
Janeiro	32	21	38	34	57,6%
Fevereiro	13	6	23	22	75,9%
Março	81	68	122	107	56,3%
Abril	22	12	33	30	66,7%
Maio	28	13	30	25	58,1%
Junho	28	12	66	60	76,9%
Julho	54	14	68	62	75,6%
Augusto	27	13	45	43	74,1%
Setembro	34	22	58	49	61,3%
Outubro	29	21	53	47	63,5%
Novembro	73	70	142	124	58,5%
Dezembro	94	98	247	217	62,9%
Total	515	370	925	820	63,3%

Tabela 3.8: Número de eventos por tipo e índice de eficiência do regulador para o ano de 2006.

Período	(A) Sustentada	(B+C) Progressiva	(D+E) Momentânea	(D+E)* Momentânea (1° ciclo)	$R_{ef} = \frac{D*+E*}{B+C+D+E}$
Janeiro	53	33	72	65	61,9%
Fevereiro	40	34	130	112	68,3%
Março	17	6	16	15	68,2%
Abril	16	18	32	26	52,0%
Maio	16	13	40	39	73,6%
Junho	49	32	86	79	66,9%
Julho	55	27	87	78	68,4%
Augusto	32	18	98	93	80,2%
Setembro	5	5	17	17	77,3%
Outubro	25	32	59	55	60,4%
Novembro	32	14	30	26	59,1%
Dezembro	67	51	88	72	51,8%
Total	407	283	755	677	65,2%

Tabela 3.9: Número de eventos por tipo e índice de eficiência do regulador para o ano de 2007.

Período	(A) Sustentada	(B+C) Progressiva	(D+E) Momentânea	(D+E)* Momentânea (1° ciclo)	$R_{ef} = \frac{D*+E*}{B+C+D+E}$
Janeiro	43	46	76	65	53,3%
Fevereiro	24	7	27	25	73,5%
Março	21	18	70	62	70,5%
Abril	47	19	38	34	59,6%
Maio	11	9	33	25	59,5%
Junho	64	38	73	66	59,5%
Julho	35	20	62	55	67,1%
Augusto	89	36	160	151	77,0%
Setembro	19	17	44	43	70,5%
Outubro	27	16	21	20	54,1%
Novembro	182	171	278	242	53,9%
Dezembro	40	47	125	111	64,5%
Total	602	444	1007	899	62,0%

Tabela 3.10: Número de eventos por tipo e índice de eficiência do regulador para o ano de 2008.

Período	(A) Sustentada	(B+C) Progressiva	(D+E) Momentânea	(D+E)* Momentânea (1° ciclo)	$R_{ef} = \frac{D*+E*}{B+C+D+E}$
Janeiro	11	13	33	30	65,2%
Fevereiro	19	25	76	63	62,4%
Março	32	20	66	51	59,3%
Abril	22	2	32	27	79,4%
Maio	14	9	25	21	61,8%
Junho	54	22	50	43	59,7%
Julho	47	14	53	47	70,1%
Augusto	53	19	77	66	68,8%
Setembro	48	23	58	54	66,7%
Outubro	18	8	29	23	62,2%
Novembro	68	64	92	73	46,8%
Dezembro	228	172	334	291	57,5%
Total	614	391	925	789	60,0%

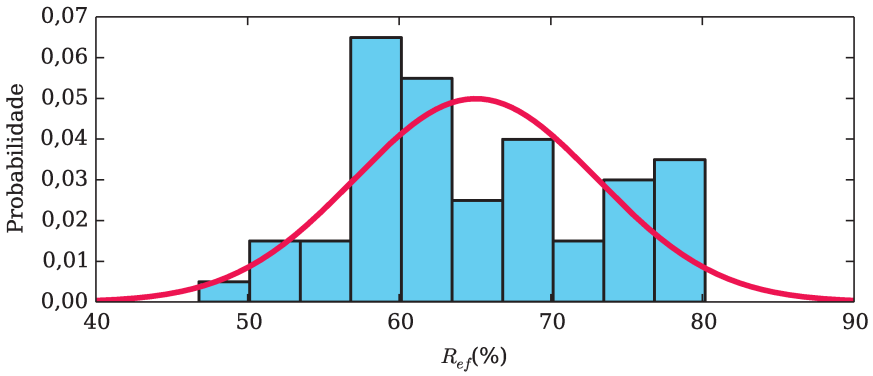

Figura 3.13: Histograma do índice R_{ef} e ajuste (distribuição normal) no período estudado.

Tabela 3.11: Parâmetros adotados.

Parâmetro	Valor
Atraso de sincronização entre sensores (s)	0,25
Limiar para classificação como afundamento de tensão (s)	1,0
Descartar interrupções não-auditadas	Não
Descartar interrupções planejadas	Sim
Descartar interrupções detectadas por um único sensor	Sim
Descartar interrupções advindas do sistema de transmissão	Sim
Descartar afundamentos de tensão	Sim
Atraso entre OMS e sensor, início (min)	30,0
Atraso entre OMS e sensor, fim (min)	5,0
Limiar de evento momentâneo (min)	1,0
Limiar de operação do religador (s)	1,0

3.4 Comentários

Os resultados apresentados neste capítulo são produto de uma análise que aplicou uma metodologia criada em função dos dados de registros históricos disponibilizados por uma concessionária de distribuição de energia elétrica. Apesar de a implementação final ser dependente do formato de dados utilizado pelos sensores e pelo OMS da concessionária, a padronização de dados mínimos providos pelos sensores e OMSs seria suficiente para permitir sua aplicação por outras empresas.

Um dos principais resultados da análise é o histograma da porcentagem das faltas temporárias no sistema. Observa-se o número de faltas temporárias segue valores próximos ao esperado conforme a literatura, além de que, no período estudado, observou-se uma distribuição normal na proporção das faltas temporárias frente ao total de faltas. Além disso, globalmente para o sistema, obteve-se um índice aproximado da eficiência dos religadores de 65% nas tentativas de evitar queimas de fusíveis. Informações adicionais poderiam ser fornecidas ao método de forma a obter resultados mais precisos. Alguns exemplos são:

- Relação entre o número de vezes que as faltas são eliminadas e o número de tentativas do religador. Isto pode ser usado para decidir quantas vezes o religador deve operar para tentar eliminar a falta antes de ser bloqueado.
- O número de consumidores afetados por cada tipo de evento.
- Topologia dos sistemas e ajustes dos esquemas de proteção em operação.
- Localização dos religadores e dos sensores distribuídos.

A análise realizada empregou dados históricos, que são uma das mais importantes fontes de dados para análises de confiabilidade. No futuro, com a implantação de tecnologias de rede inteligente, o número de equipamentos de monitoramento, até mesmo integrados aos medidores residenciais, devem criar um grande volume de dados. Estes dados poderão ser processadores com metodologias próximas à apresentada neste capítulo.

Capítulo 4

Análise da confiabilidade de redes de distribuição operadas radialmente

Ao longo do tempo, computadores com maior poder de cálculo amenizam características de tempo computacional de diversas análises. Concomitantemente, o volume de dados capturados aumenta. Com perspectivas de implantação de tecnologias de redes inteligentes (*smart grids*), o volume de detalhamento da rede tende a aumentar ainda mais. Frequentemente, estudos de confiabilidade para redes empregam versões simplificadas dos sistemas, muitas vezes necessitando de um esforço manual dos engenheiros envolvidos. Em um cenário ideal, os dados reais do sistema deveriam ser utilizados, eliminando diversas simplificações, facilitando a integração entre diversos estudos através do uso de uma única base de dados e minimizando a necessidade de edição manual dos dados para realização dos estudos.

Na realização de estudos de confiabilidade de alimentadores operados de forma radial frente a diversas configurações de rede, como nos estudos de otimização, a simulação da resposta do sistema frente a falhas nos diversos componentes pode ser executada dezenas ou mesmo centenas de milhares de vezes.

Durante o desenvolvimento deste trabalho, ao tentar aplicar a abordagem clássica do algoritmo de simulação analítica ([1]) a sistemas de grande porte, foi possível observar que, sem modificações, estudos de otimização poderiam se estender por até mesmo dias. Isto se deve ao algoritmo clássico apresentar complexidade de tempo computacional de ordem quadrática ([50]) ou mesmo cúbica ([51]) com o número de elementos de nós da rede simulada.

Comumente, para contornar esta dificuldade, são realizadas simplificações diversas, como a redução dos sistemas a blocos ou seções chaveáveis ([1, 50, 51]). A abordagem da redução em blocos se distancia do cenário ideal, apesar da redução em blocos ser inteiramente válida para diversos estudos, não é adequado utilizá-la quando se permite o chaveamento de trechos na simulação ou é admitida a alocação de dispositivos em qualquer ponto da rede, por exemplo.

Optou-se, portanto, por modificar a estrutura do algoritmo de forma a tornar sua complexidade de tempo computacional de ordem linear ao custo de um aumento na complexidade espacial, ainda mantida linear. Neste capítulo são apresentados os principais passos da formulação clássica e da formulação aprimorada desenvolvida a fim de ilustrar suas características. É importante observar que, apesar de estruturalmente diferentes, os resultados providos são os mesmos no contexto dos

problemas estudados.

Deve ser notado que, visto que o foco deste trabalho é sobre o impacto do uso generalizado de religadores, deu-se ênfase a falhas temporárias e permanentes ativas, ou seja, faltas temporárias e permanentes. É possível, no entanto, integrar à análise facilmente outros tipos de falha e interrupções em geral, como falhas que resultem na não-operação de componentes e interrupções devido a manutenções programadas.

4.1 Operação radial

Tradicionalmente, as redes de distribuição de energia elétrica são radiais ou operadas radialmente, isto é, a abertura e o fechamento de chaves específicas mantêm a topologia em uso da rede radial, formando uma árvore, ou seja um grafo acíclico.

A operação radial apresenta diversas vantagens sobre a alternativa de operação malhada ([4]), tais como proteção e coordenação da proteção mais fácil, correntes de curto-circuito reduzidas, controle de tensão mais simples e fluxos de potência de previsão e controle mais fáceis, além de custo mais baixo.

Esta forma de operação implica que, em um determinado instante, há apenas um caminho elétrico entre um nó qualquer da rede e a fonte principal de energia. Caso ocorra uma falha em um componente de distribuição do sistema, como uma falta em um trecho de linha, uma parte da rede terá inevitavelmente seu fornecimento de energia elétrica interrompido. Em muitas situações, o projeto da rede já previu tais situações e assim a rede inclui chaves de manobra que possibilitam isolar o componente em falha temporariamente para sua manutenção, além de permitir a restauração do fornecimento de energia para parte dos consumidores afetados usando, por exemplo, fontes alternativas.

Sob o ponto de vista do estudo da confiabilidade do sistema, a operação radial permite simplificações específicas. Por exemplo, enquanto que para sistemas de transmissão é fundamental a análise de falhas de segunda ordem (ou seja, o tratamento de falhas simultâneas em dois componentes), tais falhas podem ser desprezadas na análise de um sistema radial, visto que representam uma parcela mínima das falhas totais ([1]).

4.2 Grafos

Muitos algoritmos de análise de sistemas elétricos podem ser expressos na forma de operação em elementos do grafo do sistema. De fato, as matrizes que representam diversas quantidades do sistema podem ser vistas como grafos e há algoritmos de fatoração e decomposição de matrizes que são mais facilmente interpretados sob o ponto de vista da operação em tais grafos.

Na análise da confiabilidade de sistemas de distribuição na presença de dispositivos chaveáveis equipados de religadores, é importante tentar reproduzir os processos de chaveamento devido à ocorrência de uma falta. Para tanto, é necessário modelar as características de chaveamento dos componentes da rede, com especial atenção aos dispositivos de proteção, como fusíveis, disjuntores e religadores. A utilização da teoria de grafos, em especial os algoritmos de busca (ou travessia)

([52]), facilitam tanto a interpretação quanto a implementação dos algoritmos de análise descritos neste capítulo.

A seguir, apresentam-se maiores detalhes da representação da rede de distribuição em grafo (Seção 4.2.1) e o algoritmo de busca em profundidade em grafos utilizado como base dos algoritmos de simulação analítica da confiabilidade (Seção 4.2.2).

4.2.1 Representação em grafo para análise da confiabilidade

Para a realização dos estudos de confiabilidade de sistemas elétricos, a rede é representada como grafo, como no exemplo mostrado na Figura 4.1. Neste trabalho este grafo é chamado de grafo de confiabilidade. Esta representação é necessária dado que cada elemento que compõe o sistema pode apresentar taxas de falha e características de chaveamento distintas. Como consequência, o grafo de confiabilidade contém mais que o dobro de nós que o número de nós elétricos da representação barra-ramos tradicional, empregada em algoritmos clássicos de fluxo de carga ([53]).

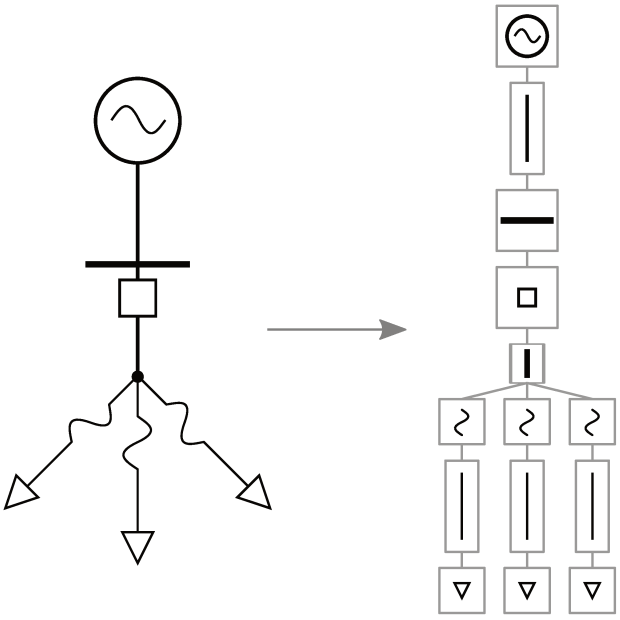

Figura 4.1: Representação de um sistema (esquerda) como um grafo para análise de confiabilidade (direita).

Na montagem do grafo, os nós que representam chaves normalmente abertas são duplicados de forma a manter a estrutura em árvore do sistema. O procedimento está ilustrado na Figura 4.2, na qual a chave N.A. **(C)** tem seu nó duplicado, criando um novo nó **(C')**. Os nós da chave são mantidos desconectados enquanto a chave operar aberta e são conectados para simular o comportamento de uma chave fechada.

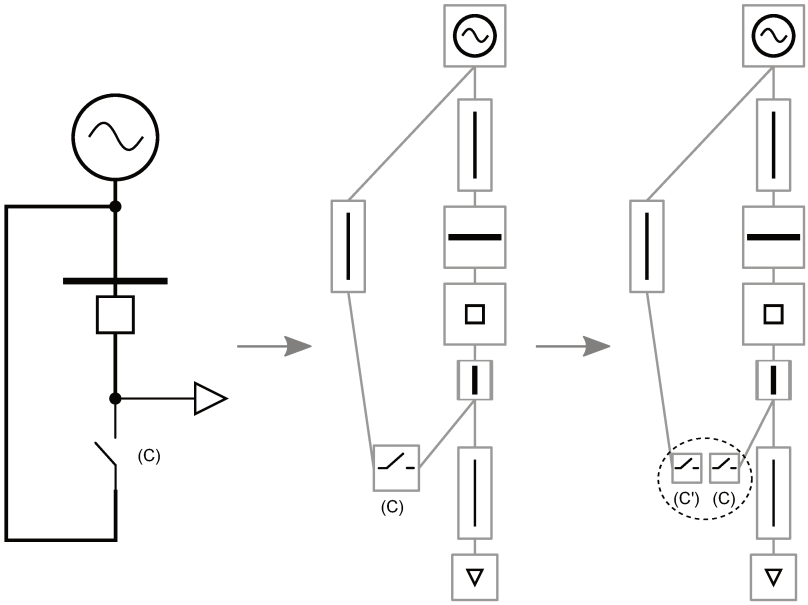

Figura 4.2: Operação realizada na presença de uma chave normalmente aberta para manter a estrutura como árvore.

4.2.2 Busca em profundidade (DFS)

Há dois algoritmos clássicos de buscas em grafos: a busca em profundidade (*depth-first search*, DFS) e a busca em largura (*breadth-first search*, BFS). Os métodos expostos neste trabalho podem ser adaptados para empregar a busca em largura caso desejado, contudo as características da DFS permitem que tanto a implementação quanto a descrição dos métodos sejam mais diretos.

A busca em profundidade consiste em uma busca não informada realizada a partir de um nó do grafo. Nela, os nós sucessores são visitados até que seja encontrado um nó que tenha todos seus nós vizinhos já visitados. A DFS apresenta características de tempo computacional linear com o total de nós e ramos, e complexidade espacial linear com o número de nós.

Uma descrição de alto nível do algoritmo como utilizado no contexto deste trabalho está disponível na Figura 4.3. De especial importância são os eventos de marcação dos nós como descobertos e finalizados. Estes eventos são estendidos nas diversas etapas do algoritmo de análise de confiabilidade proposto.

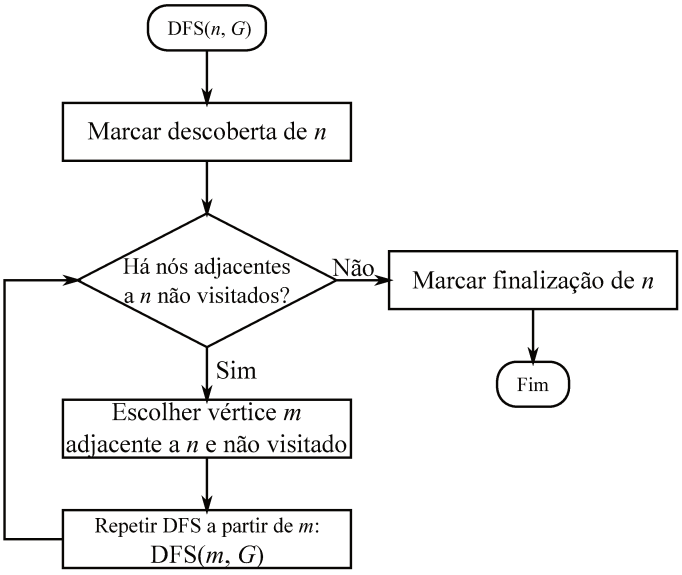

Figura 4.3: Fluxograma do algoritmo de DFS partindo de um nó n do grafo G.

4.3 Formulação clássica do algoritmo de simulação analítica

Enquanto o método analítico direto utilizado de forma mais geral inclui essencialmente o tratamento de taxas de falhas (λ) e tempos médios de reparo (*mean time to repair*, MTTR), a simulação analítica inclui também a representação da resposta do sistema de proteção frente a cada falha, permitindo assim estimar valores médios para interrupções momentâneas, além das interrupções sustentadas. Esta é a característica fundamental que permite sua utilização na análise integrada de aspectos de confiabilidade e qualidade de energia.

A formulação clássica do algoritmo conforme descrito por Brown ([1]) consiste, resumidamente, na simulação da seguinte sequência de eventos para cada componente sujeito a falhas, ilustrada na Figura 4.4. O núcleo do algoritmo, a simulação das falhas, está representado na Figura 4.5. Alternativamente, o procedimento representado pelo fluxograma da Figura 4.5 pode ser descrito pelos seguintes passos para cada possível falha:

1. Busca e atualização do número de operações do religador a montante do componente (se algum) e possível fusível associado, seguida da atualização das interrupções momentâneas dos nós a jusante do equipamento de proteção de acordo com a coordenação dos dispositivos.

2. Busca e atualização do número de operações do primeiro equipamento de proteção a montante, seguida da atualização das interrupções dos nós a jusante do equipamento de proteção.

3. Restauração a montante, que inclui a busca do primeiro dispositivo chaveável a montante do equipamento de proteção, seguida das devidas atualizações das interrupções.

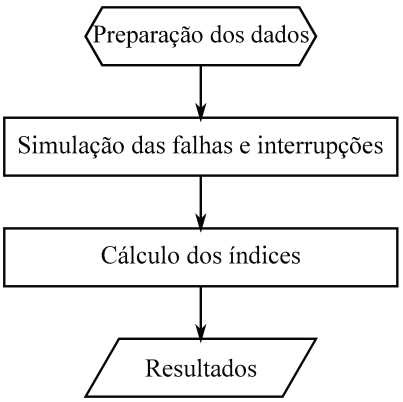

Figura 4.4: Fluxograma geral do algoritmo clássico.

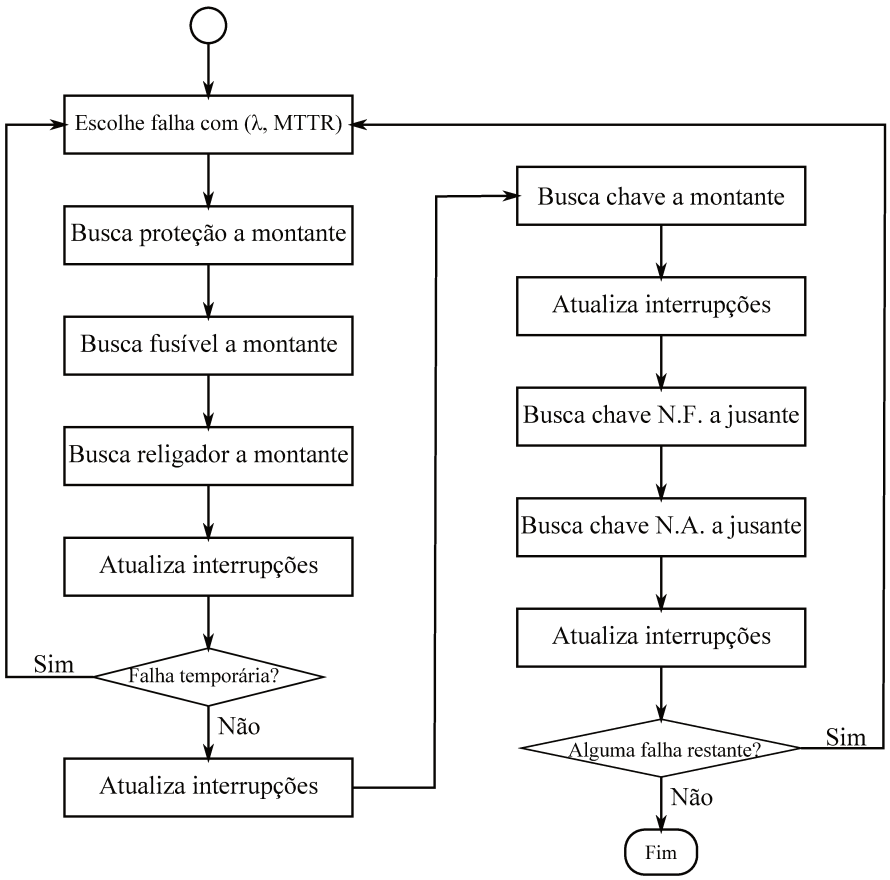

Figura 4.5: Detalhamento da etapa "Simulação das falhas e interrupções" da Figura 4.4.

4. Restauração a jusante, que inclui a busca do primeiro elemento chaveável normalmente fechado a jusante e do primeiro elemento normalmente aberto a jusante deste, seguida das devidas atualizações das interrupções.

Após a execução destes passos para cada falha, são calculados os índices desejados. Uma característica importante deste algoritmo é a inclusão do cálculo das interrupções momentâneas, as quais costumam ser desprezadas em diversas análises, contudo de grande importância no contexto deste trabalho.

As buscas dos elementos a jusante e também a atualização das interrupções podem ser realizadas através de DFS ou BFS. As buscas a montante, mais simples, percorrem a hierarquia dos nós do ponto de falha até o nó fonte/raiz, procurando um elemento do tipo desejado.

A complexidade temporal quadrática do algoritmo, em função do número de nós, vem da execução da DFS ou BFS repetidamente para a localização dos elementos e atualização do total de interrupções de cada nó afetado para cada possível falha. Caso sejam avaliadas as restrições de operação na etapa de restauração a jusante através de algum método de fluxo de carga, mesmo que aproximado, o método passa a ter complexidade cúbica ou superior.

4.4 Formulação aprimorada do algoritmo de simulação analítica

A formulação aprimorada desenvolvida neste trabalho é baseada nas propriedades da busca em profundidade, eliminando parcialmente ou totalmente a necessidade de realizar buscas durante a análise de uma falha, dependendo da política de operação dos componentes. A estrutura geral do algoritmo está reproduzida na Figura 4.6, enquanto as subseções seguintes expõe maior detalhamento de cada etapa.

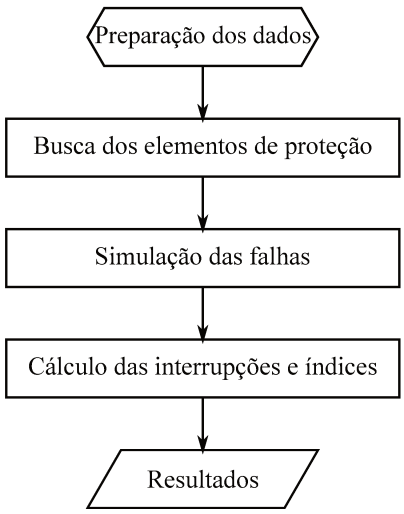

Figura 4.6: Fluxograma do algoritmo aprimorado.

4.4.1 Complexidade de espaço computacional

Para reproduzir o comportamento do algoritmo clássico, para cada nó do grafo é necessário espaço em memória para armazenar as seguintes informações, geralmente em forma de índices dos nós:

- Fusível a montante
- Religador a montante
- Proteção a montante
- Elemento chaveável a montante
- Elemento normalmente fechado a jusante
- Elemento normalmente aberto a jusante

Como extensão, pode-se armazenar os seguintes itens para cada nó de forma a permitir diferentes políticas de restauração:

- Elemento chaveável a montante (anterior)
- Número total de consumidores a jusante
- Carga total a jusante

Em termos de implementação prática, observa-se que, mesmo que os índices dos nós utilizem uma palavra de 64 bits (8 bytes) cada, o espaço de armazenamento em memória necessário é bastante reduzido. Por exemplo, um grafo de 30.720 nós requer 240 kb (245.760 bytes) para o uso de 64 bits por palavra. Já para palavras de 16 bits, suficiente para muitos sistemas (de até 65 mil nós), apenas 60 kb são necessários para um grafo com 30.720 nós. Como processadores modernos contêm caches de memória de nível L1 da ordem de 32 kb e de nível L2 da ordem de 8 MB ([54]), a grande maioria dos sistemas pode ter seus dados armazenados em cache, até mesmo no nível L1, evitando totalmente a latência de acesso a memória RAM externa ao processador. Logo, o algoritmo, além de evitar a complexidade de tempo quadrática, pode ser implementado de forma a explorar os recursos dos processadores modernos mais facilmente.

4.4.2 As etapas do algoritmo

Busca dos elementos de proteção

A busca pelos elementos de proteção é realizada utilizando uma DFS. É utilizado um espaço de armazenamento temporário que contém as seis variáveis listadas na seção anterior. Os valores temporários são atualizados e propagados no grafo através do processamento de dois tipos de evento:

Descoberta de nó: A descoberta ocorre quando um nó ainda não visitado é encontrado. O tratamento deste evento consiste em:

- Propagação do valor temporário dos elementos a montante para o nó descoberto.
- Atualização do estado temporário dos elementos a montante. Por exemplo, caso o nó se refira a um fusível, a variável temporária "Fusível a montante" é atualizada.

Finalização de nó: A finalização ocorre quando um nó tem todos os nós a jusante visitados. O tratamento deste evento consiste em:

- Caso o nó não tenha elementos a jusante, marcar as variáveis temporárias do estado a jusante como "vazias".
- Propagação do valor temporário dos elementos a jusante, incluindo o total de consumidores e carga, para o nó descoberto.
- Atualização do estado temporário dos elementos a jusante. Por exemplo, caso o nó se refira a um elemento chaveável normalmente aberto, a variável temporária "Elemento normalmente aberto a jusante" é atualizada.
- Restauração do estado temporário dos elementos a montante, isto é, cópia das variáveis referentes aos elementos a montante do nó para o estado temporário.

Apenas uma busca é executada, percorrendo todos os nós a partir da fonte principal do sistema.

Simulação das respostas às falhas

Na etapa de simulação de falhas, a mesma lógica de simulação do algoritmo de formulação clássica é empregada. No entanto, ao invés de realizar diversas buscas para cada falha simulada, são utilizados diretamente os dados já selecionados na etapa anterior de buscas dos elementos de proteção.

Por exemplo, ao processar uma falha temporária de um determinado nó, é necessário saber qual é o primeiro religador a montante deste nó. Ao invés de realizar uma busca a montante para localizar o religador (se algum), basta utilizar o valor guardado em "Religador a montante" para este nó. Em seguida é utilizada a mesma lógica de processamento que seria empregada no algoritmo clássico.

Cálculo das interrupções e dos índices

A etapa final consiste no cálculo final das frequências e durações médias das interrupções utilizando a estrutura da rede e as informações de simulação coletadas na etapa anterior. Como passo final, os índices desejados, como SAIFI, MAIFI e SAIDI, são calculados. É importante observar que os índices desejados variam de acordo com o estudo. Por exemplo, para estudos de alocação de novos equipamentos, é necessário observar apenas o índice global do sistema. Em outras situações, como análise de causa raiz, é necessário calcular os valores das interrupções de cada componente.

Caso as informações das interrupções de cada componente sejam utilizadas, é necessário propagar os valores através do grafo:

Descoberta de nó: Incrementa-se o valor das interrupções momentânea e sustentada correntes, assim como a duração de interrupção sustentada pelos valores de interrupção a partir do nó registrados na etapa de simulação das falhas. O estado corrente passa a representar os valores de interrupção e duração para o nó descoberto. Estes valores podem ser gravados como resultado, caso desejado, ou utilizados para o cálculo dos índices escolhidos. Enquanto a gravação dos valores das interrupções para cada nó requerem espaço de armazenamento extra proporcional ao número de nós, o cálculo direto dos índices requer apenas um espaço de trabalho mínimo e independe do número de nós.

Finalização de nó: Desfaz-se o incremento realizado durante a descoberta do nó. Ou seja, decrementa-se o valor das interrupções momentânea e sustentada correntes, assim como a duração de interrupção sustentada pelos valores de interrupção a partir do nó registrados na etapa de simulação das falhas. Salvo artefatos numéricos, o estado corrente torna-se idêntico ao estado anterior à descoberta do nó.

Se apenas os índices globais para o sistema forem necessários, não é necessário espaço para armazenamento das interrupções individuais, bastando percorrer o grafo e calcular os índices totais.

4.4.3 Diferentes políticas de restauração

Dependendo das políticas de operação adotadas, pode ser necessário realizar uma busca extra antes da busca dos elementos de proteção, e ainda realizar uma busca parcial no grafo durante o cálculo das interrupções. De acordo com a política de restauração a montante, o subgrafo formado pelos elementos chaveáveis a montante pode ser percorrido durante o processamento da falha. Alguns exemplos de política de restauração a montante são:

SAIFI ótimo: Para obter SAIFI ótimo, basta abrir o primeiro dispositivo chaveável a montante. Logo, é utilizado o valor já salvo como "Elemento chaveável a montante" para o nó sob falha. Esta é a política mais utilizada.

SAIDI ótimo para tempo restauração médio: Considerando um tempo de restauração médio de falha, a busca dos elementos de proteção pode ser modificada de forma a guardar em "Elemento chaveável a montante" o melhor dispositivo a chavear. A escolha do melhor dispositivo baseia-se na comparação do valor dos decrementos de SAIDI para os elementos a montante. Este decremento é calculado a partir do número de consumidores restaurados pela abertura do dispositivo e de seu tempo de chaveamento, considerando um tempo de restauração médio.

SAIDI ótimo: O subgrafo formado pelos dispositivos chaveáveis a montante é percorrido de forma a escolher o melhor dispositivo, em termos do índice SAIDI, dados os números de consumidores restaurados, os tempos de chaveamento dos dispositivos, e o tempo de restauração de cada dispositivo sob falha.

A política de restauração a jusante também pode requerer ações extras:

Chaveamento sem restrições de operação: Uma chave é fechada para realizar a restauração a jusante. É utilizado o valor gravado em "Elemento normalmente aberto a jusante" para o nó sob falha.

Chaveamento com restrições de operação: Idêntica à política sem restrições, mas realiza um cálculo do fluxo de potência para avaliar se há restrições violadas. Caso os limites sejam respeitados, realiza-se a restauração.

Chaveamento com restrições de operação, múltiplas tentativas: Idêntica à política anterior, mas são realizados diversos cálculos do fluxo de potência para avaliar se há restrições violadas, efetuando a operação de chaveamento que não extrapola os limites, se alguma. É necessário percorrer um subgrafo dos elementos N.A. a jusante. Deve-se observar que este subgrafo pode ser codificado diretamente no armazenamento do valor de "Elemento normalmente aberto a jusante" durante a etapa de busca dos elementos de proteção, de forma que não é necessário armazenamento extra nem outra busca para sua confecção.

A consideração das restrições de operação dos componentes durante a simulação da restauração a jusante eleva a complexidade do problema para, no mínimo, complexidade quadrática com o número de nós, visto que pode ser necessário executar um ou mais estudos de fluxo de carga para cada falha analisada. Para um sistema de grande porte, a diferença entre o tempo de simulação pode passar de décimos de segundos para centenas de segundos. Desta forma, para minimizar o tempo de execução, nos estudos iniciais não se utilizam as restrições de operação do sistema. Como o processo de restauração a jusante requer tempo maior que o de uma interrupção momentânea, o principal índice afetado pela escolha da política de restauração é o SAIDI dos componentes restaurados, apesar de outros índices relacionados a duração de interrupção e energia não fornecida também serem afetados.

Caso a simulação das restrições seja fundamental, podem ser empregados artifícios para reduzir o tempo necessário para realização das simulações de fluxo de carga. O uso de cache do resultado do fluxo de carga em função das operações de chaveamento, em particular o resultado da condição de respeito ou não das restrições de operação, pode resultar em economia de mais de 90% do tempo necessário para a avaliação do fluxo de carga em uma simulação analítica de confiabilidade para um sistema de grande porte.

É importante lembrar que as políticas de restauração aqui listadas são aplicáveis, principalmente, a topologias radiais. Para topologias genéricas, pode ser necessário aplicar uma análise mais complexa para decidir as operações de chaveamento ([55–59]). Os algoritmos de decisão podem ser integrados aos algoritmos de confiabilidade, contudo seu custo computacional pode ser proibitivo, principalmente em estudos de otimização.

4.4.4 Reutilização da DFS

A principal ferramenta que compõe o algoritmo é a DFS. No contexto deste trabalho, a topologia da rede é estática e, desta forma, a DFS percorre sempre o mesmo caminho. Partindo

desta observação, é possível compilar as informações da DFS utilizadas no algoritmo de simulação analítica, reutilizando-as nas diversas etapas do algoritmo. Esta reutilização pode ser considerada análoga à reutilização dos dados de fatoração simbólica de algoritmos de fatoração de matrizes esparsas, como os utilizados nos *solvers* KLU ([60]), SuperLU ([61]) e CHOLMOD ([62]).

É possível empregar a lista de informações compilada entre simulações subsequentes, como no caso dos algoritmos de alocação apresentados no Capítulo 5. Nestes casos, observou-se economia de mais de 40% do tempo total de execução.

É importante observar que a reutilização das informações da DFS só é viável na versão aprimorada do algoritmo de simulação analítica. Na versão clássica, apresentada na Seção 4.3, são realizadas buscas parciais a partir de diversos nós, enquanto na versão aprimorada as buscas são completas a partir do nó fonte.

4.5 Aplicação a sistemas de pequeno porte

Esta seção apresenta resultados, incluindo detalhamento passo-a-passo, da aplicação da formulação aprimorada do algoritmo de simulação analítica a sistemas de pequeno porte com o objetivo de explicar didaticamente a metodologia proposta, sendo que resultados em uma rede de grande porte são apresentados na próxima seção. O ambiente de testes é baseado em um microcomputador equipado com um processador Intel i7-3770 ([54]), com implementação em linguagem C++. Mais detalhes no Apêndice C.

Para ilustrar a execução passo-a-passo da formulação aprimorada apresentada neste capítulo, utiliza-se o sistema de dimensão reduzida reproduzido na Figura 4.7, cujos dados utilizados encontram-se na Tabela 4.1. O sistema é fictício e foram utilizados valores inteiros e aproximados de forma a facilitar a exposição das etapas do algoritmo.

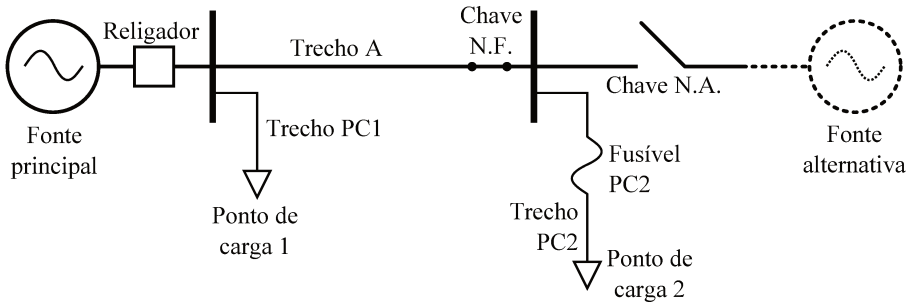

Figura 4.7: Diagrama de um sistema fictício de dimensão reduzida.

Preparação dos dados

A partir dos dados do sistema, monta-se o grafo para a análise de confiabilidade. O grafo resultante está mostrado na Figura 4.8. Cada elemento é associado a um nó, indicado pelo número em negrito na figura. A cada nó são associados os dados correspondentes, conforme listado na Tabela 4.2.

Tabela 4.1: Dados do sistema fictício de dimensão reduzida utilizado no exemplo passo-a-passo.

Componente	Taxa de falha permanente (falhas/ano)	Taxa de falha temporária (falhas/ano)	Tempo de chaveamento (minutos)	Tempo de reparo (minutos)	Número de consumidores
Religador	–	–	3	–	–
Chave Sec. N.A.	–	–	15	–	–
Trecho A	1	2	–	150	–
Trechos PC1 e PC2 (cada)	2	4	–	150	–
Pontos de carga 1 e 2 (cada)	–	–	–	–	100

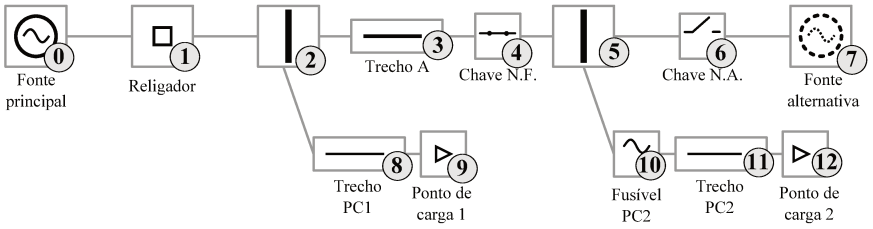

Figura 4.8: Grafo do sistema exemplo para a análise de confiabilidade.

Tabela 4.2: Dados de cada nó do grafo já preparados para análise.

Nó	Taxa de falha permanente λ^p (falhas/ano)	Taxa de falha temporária λ^t (falhas/ano)	Tempo de chaveamento s (minutos)	Tempo de reparo r (minutos)	Número de consumidores	
0	0	0	0	0	0	
1	0	0	3	0	0	
2	0	0	0	0	0	
3	1	3	0	90	0	
4	0	0	30	0	0	
5	0	0	0	0	0	
6	0	0	30	0	0	
7	0	0	0	0	0	
8	1	4	45	90	0	
9	0	0	0	0	100	
10	0	0	0	0	0	
11	1	4	45	90	0	
12	0	0	0	0	100	

Busca dos elementos de proteção

Como foi explicado na Seção 4.4.2, mantém-se um estado corrente ao percorrer o grafo, atualizando e copiando o estado de acordo com o necessário. Utiliza-se a seguinte notação:

$$e_n = [e_{n,m}|e_{n,j}] \tag{4.5.1}$$
$$e_{n,m} = [d_{\text{fusível},n}, d_{\text{religador},n}, d_{\text{proteção},n}, d_{\text{chaveável},n}] \tag{4.5.2}$$
$$e_{n,j} = [d_{\text{N.F.},n}, d_{\text{N.A.},n}] \tag{4.5.3}$$

onde:

- n é um dos nós, ou c para o estado corrente.
- e_n representa o estado do conjunto de elementos encontrados.
- $e_{n,m}$ representa o estado do conjunto de elementos a montante encontrados para o nó n.
- $e_{n,j}$ representa o estado do conjunto de elementos a jusante encontrados para o nó n.
- d_x representa o nó do dispositivo encontrado, por exemplo, $d_{\text{fusível},n}$ representa o nó do fusível encontrado a montante do nó n.

Inicializa-se o estado corrente como vazio, $e_c = [-, -, -, -|-, -]$, e é executada uma busca em profundidade a partir da fonte principal:

- **Descoberta do nó 0**
  - Copia-se o estado corrente dos elementos a montante, $e_{0,m} \leftarrow e_{c,m}$.
- **Descoberta do nó 1**
  - $e_{1,m} \leftarrow e_{c,m}$.
  - O nó representa um religador, logo preenche-se os valores de religador, proteção e chaveável a montante com 1, tornando $e_{c,m} = [-, 1, 1, 1]$.
- **Descoberta do nó 2**
  - $e_{2,m} \leftarrow e_{c,m}$.
- **Descoberta do nó 3**
  - $e_{3,m} \leftarrow e_{c,m}$.
- **Descoberta do nó 4**
  - $e_{4,m} \leftarrow e_{c,m}$.
  - O nó representa uma chave, logo preenche-se os valores de proteção e chaveável a montante com 4, tornando $e_{c,m} = [-, 1, 4, 4]$.
- **Descoberta do nó 5**
  - $e_{5,m} \leftarrow e_{c,m}$.

- **Descoberta do nó 6**
  - $e_{6,m} \leftarrow e_{c,m}$.
- **Descoberta do nó 7**
  - $e_{7,m} \leftarrow e_{c,m}$.
- **Finalização do nó 7**
  - Copia-se o estado corrente dos elementos a jusante, $e_{7,j} \leftarrow e_{c,j}$.
  - Copia-se o estado dos elementos a montante do nó como estado corrente, $e_{c,m} \leftarrow e_{7,m}$.
- **Finalização do nó 6**
  - $e_{6,j} \leftarrow e_{c,j}$.
  - O nó representa uma chave normalmente aberta, logo preenche-se o valor de chave N.A. com 6, tornando $e_{c,j} = [-, 6]$
  - $e_{c,m} \leftarrow e_{6,m}$.
- **Descoberta do nó 10**
  - $e_{10,m} \leftarrow e_{c,m}$.
  - O nó representa um fusível, logo preenche-se os valores de fusível, proteção e chaveável a montante com 10, tornando $e_{c,j} = [10, 1, 10, 10]$.
- **Descoberta do nó 11**
  - $e_{11,m} \leftarrow e_{c,m}$.
  - O nó representa um trecho de linha chaveável, logo preenche-se o valor de chaveável a montante com 11, tornando $e_{c,j} = [10, 1, 11, 10]$.
- **Descoberta do nó 12**
  - $e_{12,m} \leftarrow e_{c,m}$.
- **Finalização do nó 12**
  - $e_{12,j} \leftarrow e_{c,j}$.
  - $e_{c,m} \leftarrow e_{12,m}$.
- **Finalização do nó 11**
  - $e_{11,j} \leftarrow e_{c,j}$.
  - O nó representa uma chave normalmente fechada, logo preenche-se o valor de chave N.F. com 11, tornando $e_{c,j} = [11, -]$.
  - $e_{c,m} \leftarrow e_{11,m}$.
- **Finalização do nó 10**

- $e_{10,j} \leftarrow e_{c,j}$.
- $e_{c,m} \leftarrow e_{10,m}$.

- **Finalização do nó 5**
  - O nó 5 apresenta mais de um caminho a jusante mas apenas o caminho do nó 6 apresenta chave N.A., logo: $d_{\text{N.A.},c} \leftarrow 6$.
  - $e_{5,j} \leftarrow e_{c,j}$.
  - $e_{c,m} \leftarrow e_{5,m}$.

- **Finalização do nó 4**
  - $e_{4,j} \leftarrow e_{c,j}$.
  - O nó representa uma chave normalmente fechada, logo preenche-se o valor de chave N.F. com 4, tornando $e_{c,j} = [4, 6]$.
  - $e_{c,m} \leftarrow e_{4,m}$.

- **Finalização do nó 3**
  - $e_{3,j} \leftarrow e_{c,j}$.
  - $e_{c,m} \leftarrow e_{3,m}$.

- **Descoberta do nó 8**
  - Copia-se o estado corrente dos elementos a montante.
  - O nó representa um trecho de linha chaveável, logo preenche-se o valor de chaveável a montante com 8, tornando $e_{c,j} = [1, 1, 8, 1]$.

- **Descoberta do nó 9**
  - Copia-se o estado corrente dos elementos a montante.

- **Finalização do nó 9**
  - $e_{9,j} \leftarrow e_{c,j}$.
  - $e_{c,m} \leftarrow e_{9,m}$.

- **Finalização do nó 8**
  - $e_{8,j} \leftarrow e_{c,j}$.
  - $e_{c,m} \leftarrow e_{8,m}$.

- **Finalização do nó 2**
  - O nó 2 apresenta mais de um caminho a jusante mas apenas o caminho do nó 3 apresenta chave N.A., logo: $(d_{\text{N.A.},c} \leftarrow 6)$ e $(d_{\text{N.F.},c} \leftarrow 4)$.
  - $e_{2,j} \leftarrow e_{c,j}$.

- $e_{c,m} \leftarrow e_{2,m}$.

- **Finalização do nó 1**

  - $e_{1,j} \leftarrow e_{c,j}$.
  - $e_{c,m} \leftarrow e_{1,m}$.

- **Finalização do nó 0**

  - $e_{0,j} \leftarrow e_{c,j}$.
  - $e_{c,m} \leftarrow e_{0,m}$.

Tabela 4.3: Resultado da busca de elementos de proteção para o sistema exemplo.

Nó	Fusível a montante	Religador a montante	Proteção a montante	Chaveável a montante	N.F. a jusante	N.A. a jusante
0	–	–	–	–	1	6
1	–	–	–	1	4	6
2	–	1	1	1	4	6
3	–	1	1	1	4	6
4	–	1	1	4	–	6
5	–	1	4	4	–	6
6	–	1	4	6	–	–
7	–	1	6	6	–	–
8	–	1	1	8	–	–
9	–	1	1	8	–	–
10	–	1	4	4	11	–
11	10	1	10	11	–	–
12	10	1	10	11	–	–

Simulação das falhas

São simuladas as falhas em cada nó com taxas de falha não nulas, ou seja, nós 3, 8 e 11.

- **Nó 3**

  - **Falha temporária (λ_3^t = 3 falhas/ano)**

    1. Há um religador a montante (nó 1): incrementa-se a interrupção momentânea originada do religador a montante de $\lambda_3^t = 3$ interrupções/ano.

  - **Falha permanente (λ_3^p = 1 falha/ano, r_3 = 90 minutos)**

    1. Há um dispositivo de proteção a montante (nó 1): incrementa-se a interrupção sustentada originada na proteção a montante por 1 int./ano e $\lambda_3^p r_3 = 90$ minutos.
    2. O primeiro elemento chaveável a montante é o próprio nó 1, com tempo de chaveamento s_1 de 3 minutos.

3. Como $s_1 < r_3$, é simulada uma interrupção momentânea no trecho entre o dispositivo de proteção a montante e o elemento chaveável: incrementa-se a interrupção momentânea originada na proteção a montante (nó 1) de 1 int./ano, e decrementa-se a interrupção momentânea originada no elemento chaveável a montante de 1 int./ano.
4. Como o primeiro elemento chaveável a montante é ainda o nó 1, não é necessário reduzir a duração da interrupção entre a proteção e o elemento chaveável.
5. Há uma chave N.A. a jusante (nó 6), assim como uma chave N.F. (nó 4), com tempo de chaveamento total $s_t = (s_4 + s_6) = 60$ minutos. Como $s_t < r_3$, é possível realizar restauração do fornecimento a jusante: decrementa-se a duração da interrupção originada no nó 4 de $(r_3 - s_t) = 30$ minutos.

- **Nó 8**

  - **Falha temporária (λ_8^t = 4 falhas/ano)**

    1. Há um religador a montante (nó 1): incrementa-se a interrupção momentânea originada do religador a montante de $\lambda_8^t = 4$ interrupções/ano.

  - **Falha permanente (λ_8^p = 1 falha/ano, r_8 = 90 minutos)**

    1. Há um dispositivo de proteção a montante (nó 1): incrementa-se a interrupção sustentada originada na proteção a montante por 1 int./ano e $\lambda_8^p r_8 = 90$ minutos.
    2. O primeiro elemento chaveável a montante é o próprio nó 8, com tempo de chaveamento s_8 de 45 minutos.
    3. Como $s_8 < r_8$, é simulada uma interrupção momentânea no trecho entre o dispositivo de proteção a montante e o elemento chaveável: incrementa-se a interrupção momentânea originada na proteção a montante (nó 1) de 1 int./ano, e decrementa-se a interrupção momentânea originada no elemento chaveável a montante de 1 int./ano.
    4. Também é simulada uma interrupção sustentada a partir do elemento chaveável, reduzindo-se primeiro a interrupção sustentada a partir do dispositivo de proteção a montante: decrementa-se a interrupção sustentada originada na proteção a montante por 1 int./ano e $\lambda_8^p(r_8 - s_8) = 45$ min., incrementa-se a interrupção sustentada originada no elemento chaveável do mesmo valor.
    5. Não há chaves abertas a jusante, logo não é possível realizar restauração a jusante.

- **Nó 11**

  - **Falha temporária (λ_{11}^t = 4 falhas/ano)**

    1. Há um religador a montante (nó 1): incrementa-se a interrupção momentânea originada do religador a montante de $\lambda_{11}^t = 4$ interrupções/ano.

  - **Falha permanente (λ_{11}^p = 1 falha/ano, r_8 = 90 minutos)**

1. Há um religador a montante (nó 1) e um dispositivo de proteção a montante diferente (nó 10): incrementa-se a interrupção momentânea originada no religador a montante de $\lambda^t_{11} = 4$ interrupções/ano, decrementa-se a interrupção momentânea originada na proteção a montante de $\lambda^t_{11} = 4$ interrupções/ano, incrementa-se a interrupção sustentada originada na proteção a montante por 1 int./ano e $\lambda^p_{11} r_{11} = 90$ minutos.
2. O primeiro elemento chaveável a montante é o próprio nó 11, com tempo de chaveamento s_{11} de 45 minutos.
3. Como $s_{11} < r_{11}$, é simulada uma interrupção momentânea no trecho entre o dispositivo de proteção a montante e o elemento chaveável: incrementa-se a interrupção momentânea originada na proteção a montante (nó 10) de 1 int./ano, e decrementa-se a interrupção momentânea originada no elemento chaveável a montante de 1 int./ano. Deve-se observar que neste exemplo esta operação tem efeitos nulos, dado que não há consumidores entre os nós 10 e 11.
4. Também é simulada uma interrupção sustentada a partir do elemento chaveável, reduzindo-se primeiro a interrupção sustentada a partir do dispositivo de proteção a montante: decrementa-se a interrupção sustentada originada na proteção a montante por 1 int./ano e $\lambda^p_{11}(r_{11} - s_{11}) = 45$ min., incrementa-se a interrupção sustentada originada no elemento chaveável do mesmo valor. Novamente, devido à ausência de consumidores entre os nós 10 e 11, a operação tem efeito nulo.
5. Não há chaves abertas a jusante, logo não é possível realizar restauração a jusante.

Nas Tabelas 4.4 e 4.5, os resultados da simulação das falhas estão sintetizados.

Tabela 4.4: Interrupções sustentadas (número, duração) a partir de cada nó do grafo para o sistema exemplo.

Nó	Nó 3 (temp.)	Nó 3 (perm.)	Nó 8 (temp.)	Nó 8 (perm.)	Nó 11 (temp.)	Nó 11 (perm.)
0	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0
1	0, 0	1, 90	1, 90	2, 135	2, 135	2, 135
2	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0
3	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0
4	0, 0	0, -30	0, -30	0, -30	0, -30	0, -30
5	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0
6	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0
7	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0
8	0, 0	0, 0	0, 0	0, 45	0, 45	0, 45
9	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0
10	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0	1, 45
11	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0	0, 45
12	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0	0, 0

Tabela 4.5: Número de interrupções momentâneas a partir de cada nó do grafo para o sistema exemplo.

Nó	Nó 3 (temp.)	Nó 3 (perm.)	Nó 8 (temp.)	Nó 8 (perm.)	Nó 11 (temp.)	Nó 11 (perm.)
0	0	0	0	0	0	0
1	3	3	7	7	11	12
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	-1
11	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0

Cálculos das interrupções e índices

A última coluna da Tabela 4.4 representa as interrupções sustentadas que ocorrem a partir de cada nó ao final da simulação de falhas. O mesmo é válido para a Tabela 4.5 e interrupções momentâneas. Para calcular as interrupções totais em cada nó, é necessário propagar as interrupções a partir de sua origem. Para isso, é realizada uma busca em profundidade onde é mantido um estado corrente que é propagado através do grafo. A cada nó descoberto, o estado corrente é atualizado, calculando-se as interrupções sustentadas e momentâneas para o nó. Ao finalizar o nó, o valor corrente anterior à descoberta do nó é restaurado.

Como o procedimento de percorrer o grafo e aplicar os eventos é similar ao procedimento de busca de elementos, foi omitido. Os resultados finais, após o cálculo das interrupções, encontram-se na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Interrupções por ano finais após propagação pelo grafo.

Nó	Interrupções sustentadas	Duração de interrupção sustentada (minutos)	Interrupções momentâneas
0	0	0	0
1	2	135	12
2	2	135	12
3	2	135	12
4	2	105	12
5	2	105	12
6	2	105	12
7	2	105	12
8	2	180	12
9	2	180	12
10	3	150	11
11	3	195	11
12	3	195	11

4.5.1 Comparação do tempo de execução

A título de demonstrar a importância da redução da complexidade de tempo computacional alcançada pela elaboração da formulação aprimorada do algoritmo de simulação analítica, as simulações necessárias para confeccionar as Figuras A.7 a A.9 do Apêndice A, foram realizadas utilizando as duas versões do algoritmo. No total, são executadas $\binom{32}{2} = 496$ simulações. Os resultados estão disponíveis na Tabela 4.7. Foi empregado o tempo médio para a formulação aprimorada a fim de evitar problemas de precisão na cronometragem, visto que cada execução tem duração curta.

Tabela 4.7: Tempo de simulação para a análise de 496 cenários de um sistema reduzido.

Formulação do algoritmo	Tempo total (s)	Tempo por simulação (ms)	Tempo (%)
Clássica (tempo mínimo, 1 de 10 execuções)	1,03	2,08	100,00
Aprimorada (tempo médio por execução, 100 execuções)	0,0088	0,018	0,85

Como pode ser observado na Tabela 4.7, mesmo para um sistema de tamanho reduzido como o utilizado para os exemplos do Capítulo 1, o algoritmo aprimorado consegue alcançar uma redução de mais de 99% do tempo de simulação. Devido às características de complexidade das duas versões do algoritmo, a redução é ainda mais significativa para sistemas de grande porte, tornando o uso do método clássico inviável para sistemas reais não reduzidos e simplificados.

4.6 Aplicação a um sistema de grande porte

Para exemplificar a aplicação dos métodos desenvolvidos a um sistema de grande porte, foi utilizado uma rede baseada em dados reais, complementados com dados típicos quando necessário.

O sistema em estudo consiste de 8 alimentadores, totalizando mais de 22 mil barras ou nós elétricos. Os principais dados do sistema estão apresentados na Tabela 4.8 e o diagrama do sistema está reproduzido na Figura 4.10, cuja legenda de componentes está mostrada na Figura 4.9. A subestação é representada nos diagramas como um marcador quadriculado e os disjuntores que conectam os alimentadores à subestação apresentam a funcionalidade de religamento automático. Neste sistema, há várias chaves de manobra entre os próprios alimentadores do sistema, como evidenciado na ampliação reproduzida na Figura 4.11, e também entre os alimentadores e sistemas externos. Os religadores operam na estratégia de religamento automático para preservar os fusíveis (*fuse saving*).

As informações sobre os consumidores em cada ponto de carga não foram completamente fornecidas e, para contornar a falta de informações, usou-se uma distribuição baseada na carga total do ponto de conexão (a qual foi fornecida para todos os pontos de carga), respeitando-se o número total de consumidores em cada alimentador. Assumiu-se a operação trifásica de chaves, isto é, não há dispositivos chaveáveis trifásicos capazes de chavear cada fase de forma independente.

Em geral, pode-se estudar cada alimentador separadamente, porém o sistema completo foi utilizado como exemplo para demonstrar a capacidade de solução dos métodos propostos.

Tabela 4.8: Principais dados do sistema.

Cor/nome	Carga (MW)	Consumidores	Religadores	Nós elétricos
Alimentador 1	2,31	7.011	0	1.041
Alimentador 2	4,80	6.895	4	9.767
Alimentador 3	1,88	2.714	2	3.434
Alimentador 4	2,28	7.516	0	1.067
Alimentador 5	2,18	6.837	0	1.100
Alimentador 6	1,51	3.680	0	609
Alimentador 7	2,82	5.873	1	3.094
Alimentador 8	1,94	2.786	1	1.929
Sistema completo	19,73	43.312	8	22.035

Figura 4.9: Legenda dos componentes mostrados nos diagramas georreferenciados.

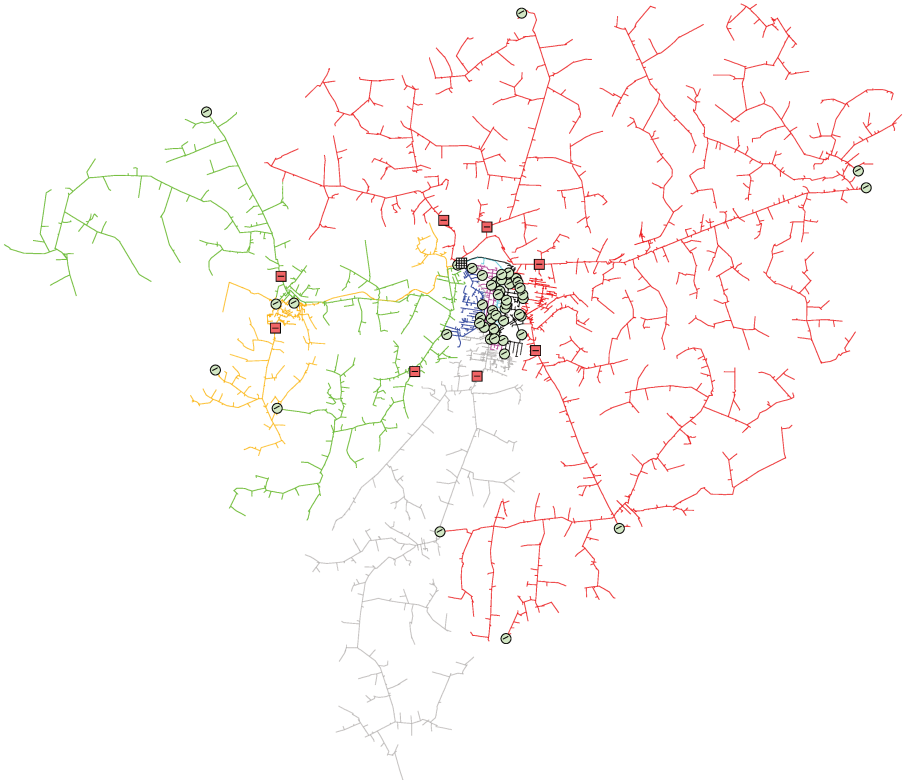

Figura 4.10: Sistema de grande porte avaliado neste capítulo.

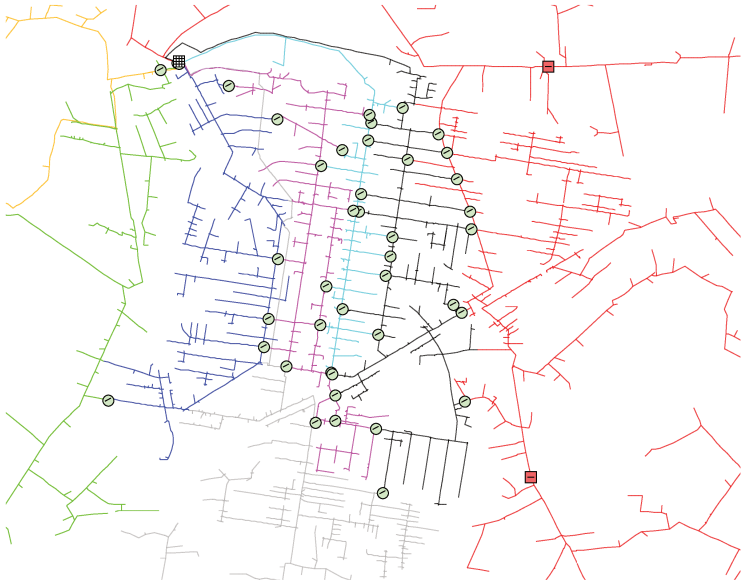

Figura 4.11: Ampliação da região central da Figura 4.10.

4.6.1 Simulação analítica

O desempenho da implementação da formulação aprimorada do algoritmo de simulação analítica foi explorado através da simulação do sistema completo e de diversas outras combinações de alimentadores. Os resultados estão reproduzidos na Tabela 4.9 e na Figura 4.12.

Tabela 4.9: Tempo de simulação médio para diversas combinações de alimentadores.

Nome	Nós (elétricos)	Nós (confiabilidade)	Tempo total (ms)	Tempo de simulação (ms)
Sistema completo	22.035	49.314	87,8	17,08
Alimentador 1	1.041	2.361	3,67	0,53
Alimentador 2	9.767	21.673	35,91	4,95
Alimentador 3	3.434	7.632	11,78	1,65
Alimentador 4	1.067	2.413	3,8	0,53
Alimentador 5	1.100	2.520	3,91	0,56
Alimentador 6	609	1.414	2,20	0,32
Alimentador 7	3.094	6.930	10,75	1,50
Alimentador 8	1.929	4.382	6,73	0,96
Alimentadores 2 e 3	13.200	29.303	48,8	7,90
Alimentadores 2 e 6	10.375	23.085	37,8	5,50
Alimentadores 2, 3, 5, 7 e 8	19.321	43.132	74,9	14,47

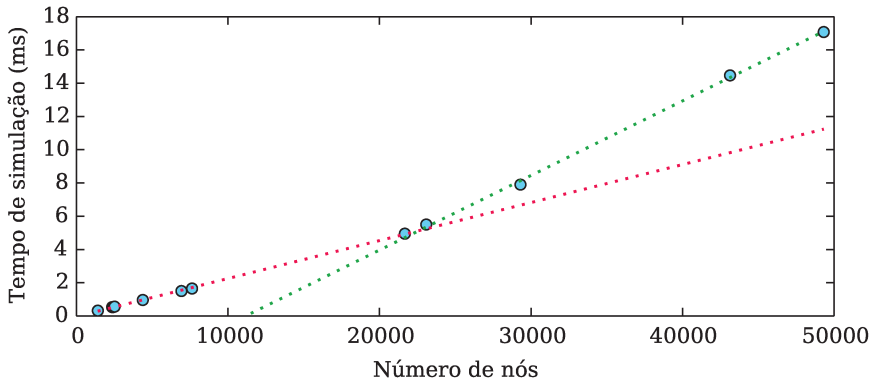

Figura 4.12: Tempo de simulação da formulação aprimorada de simulação analítica em função do número de nós.

É possível observar que o tempo total, incluindo a preparação dos dados, é bem maior que o tempo de simulação. Como nos estudos de otimização não é necessário preparar os dados novamente, o tempo de cada configuração de religadores analisada é mais próximo do tempo de simulação, disponível na última coluna da Tabela 4.9.

A partir da Figura 4.12, observam-se duas regiões lineares do tempo de simulação de acordo com o número de nós. A primeira região, com menor inclinação da reta, ocorre antes de 8.000 nós e sua regressão linear apresenta um coeficiente de correlação de 0,9997. A segunda região ocorre

a partir de cerca de 20.000 nós, cuja regressão linear tem coeficiente de correlação de 0,9995. As curvas referentes às regressões estão traçadas com linha pontilhada na Figura 4.12. Conjectura-se que a diferença de comportamento seja devido ao mecanismo de *cache* do processador empregado nos testes, Intel i7-3770 ([54]).

Apesar da presença das duas regiões onde a linearidade é mais aparente, o tempo de simulação tem relação aproximadamente linear com o número de nós das redes simuladas, como esperado através da análise da formulação aprimorada do algoritmo de simulação analítica.

4.7 Comentários

Em geral, consideram-se sistemas com cerca de uma centena de nós como de grande porte, dado que as metodologias clássicas tornam-se inviáveis para redes maiores. Nos últimos anos e também nos anos futuros, através da modernização dos sistemas de gerenciamento de dados das concessionárias, assim como estímulos relacionados à implantação de redes inteligentes, o volume e a qualidade de dados disponíveis tendem a crescer. Neste novo cenário, uma representação mais direta da rede, sem a necessidade de realizar transformações e simplificações, é de grande importância. Este capítulo mostrou que esta representação é viável e torna-se possível caso métodos adequados sejam criados.

Explorando as propriedades da busca em profundidade, foi possível criar uma versão do algoritmo de simulação analítica com complexidades temporal e espacial lineares com o número de nós do sistema. A redução da complexidade temporal é de grande importância visto que o alvo deste trabalho são sistemas reais de grande porte e são realizadas milhares ou milhões de simulações durante a etapa de otimização. O algoritmo mostrou-se rápido mesmo para as maiores redes e confirmou a expectativa de tempo linear com o número de nós.

Capítulo 5

Alocação de dispositivos de proteção

Diversos métodos têm sido utilizados para abordar o problema da alocação de dispositivos de proteção em alimentadores de distribuição. Como, em geral, não é viável explorar todas as combinações possíveis devido ao fenômeno da explosão combinatorial, métodos heurísticos ([63]) como *simulated annealing* ([64–66]), colônia de formigas ([67–69]), e algoritmos genéticos apresentam bons resultados, apesar de não garantirem a localização da configuração ótima global.

Neste trabalho, decidiu-se empregar algoritmos genéticos, com implementação baseada em trabalhos de sucesso disponíveis na literatura ([70–73]). As principais características do modelo e da metodologia de solução são listadas neste capítulo.

Para validação da abordagem de algoritmo genético escolhida, é realizada uma amostragem de posições candidatas para alocação de religadores, de forma a possibilitar a enumeração e análise de todas as combinações dentro deste conjunto amostrado. A validação do algoritmo para uma rede real de grande porte também é apresentada. Uma heurística que resulta em soluções de qualidade possivelmente inferior mas com tempo de execução bastante reduzido foi desenvolvida e testada em conjunto à implementação do algoritmo genético.

Análises parciais empregando os dados do sistema de grande porte já apresentado no Capítulo 4 são expostas ao longo deste capítulo com o intuito de facilitar a exposição e a compreensão das características do problema de alocação, enquanto um estudo de realocação empregando um dos alimentadores do sistema é realizado para ilustrar características complementares.

5.1 Função objetivo

Na literatura, as funções objetivo apresentam as mais diversas formas. Brown ([1]) emprega uma função considerando apenas os índices de confiabilidade. Em [44], como mostrado na Seção 2.2.7, é necessário fornecer valores alvos para cada índice. Há trabalhos que consideram o custo esperado das interrupções para os consumidores, assim como o custo dos equipamentos ([74]) como alvo de minimização.

Após revisão da literatura, decidiu-se abordar o problema de otimização como a maximização da função objetivo definida na forma mostrada em (5.1.1), composta por duas parcelas principais,

uma relativa aos índices a otimizar, e a outra relativa à quantidade de equipamentos disponíveis:

$$f = \sum_i w_i \left(\frac{I_{i,0} - I_i}{I_{i,0}} \right) + \sum_j c_j \left(E_{j,0} - E_j \right) \tag{5.1.1}$$

onde:

- w_i é o fator de ponderação empregado para um determinado índice.
- c_j é o fator de ponderação empregado para um determinado elemento de proteção, geralmente associado a seu custo.
- o subscrito 0 indica os valores iniciais do sistema base, sem alterações.
- I é um índice a ser otimizado (SAIFI, MAIFI, etc.).
- E representa a quantidade de elementos de proteção alocados (religadores, fusíveis, etc.).

A forma de função objetivo apresentada é genérica o suficiente para contemplar uso de diferentes índices e incluir considerações de custos relativos. A melhor formulação é dependente de questões como disponibilidade de dados e qual o objetivo primário a alcançar, por exemplo, reduzir os índices globalmente ou apenas alcançar um valor alvo para um dos índices determinado por um órgão regulador.

Conforme apresentado na Seção 2.2.7, a análise de custos empregada para a definição de SMAIF, o custo de uma interrupção momentânea é em média cerca de metade do custo de uma interrupção sustentada. Desta forma, sem restrições extras, a minimização apenas de SMAIF é suficiente. No entanto, caso o sistema apresente uma alta frequência de interrupções momentâneas, não é desejável aumentar significativamente a ocorrência de interrupções sustentadas para reduzir a frequência de interrupções momentâneas. Visto que SAIFI é um índice universalmente acompanhado pelas agências reguladoras, sua presença na função objetivo é importante. A forma final empregada para os estudos e testes apresentados neste capítulo emprega peso unitário para o SMAIF, permitindo a variação do peso do SAIFI, assumindo peso nulo para os índices restantes e também para a alocação de novos dispositivos. A função objetivo toma a forma mostrada em (5.1.2):

$$f = w_{\text{SAIFI}} \left(\frac{\text{SAIFI}_0 - \text{SAIFI}}{\text{SAIFI}_0} \right) + \left(\frac{\text{SMAIF}_0 - \text{SMAIF}}{\text{SMAIF}_0} \right) \tag{5.1.2}$$

Nesta forma, apenas o valor de um peso precisa ser ajustado. Em geral, observou-se que o peso unitário é suficiente para evitar a deterioração do SAIFI para melhorar o MAIFI. Por outro lado, caso a ênfase do problema seja melhorar o SAIFI, sem aumentar bruscamente o índice de interrupções momentâneas, pode ser empregado um valor mais alto.

5.2 Análise exaustiva

Para avaliar o desempenho do algoritmo genético apresentado na próxima seção, foi implementado um método de força bruta para alocar 1, 2 ou até 3 religadores, enumerando todas as

combinações de posições candidatas. No entanto, devido ao fenômeno da explosão combinatorial, combinações de 2 e 3 posições tornam-se inviáveis mesmo utilizando a formulação aprimorada do algoritmo de simulação analítica. Decidiu-se adotar a amostragem de posições de forma a viabilizar a análise exaustiva. É importante observar que a análise exaustiva pode ser útil para análises mais rápidas de alimentadores menores e com um número reduzido de religadores disponíveis.

5.2.1 Amostragem de posições

Em muitos trabalhos é comum realizar a redução a blocos chaveáveis ([1, 50, 51]). Neste tipo de redução, todos os elementos entre duas chaves principais do sistema são simplificados em um único nó, desprezando grande parte das características do sistema. Além de limitar as posições candidatas a chaves já existentes, a redução não permite simular a política que permite o chaveamento de trechos para realizar restauração do fornecimento de energia e elementos como fusíveis que fazem parte de ramificações do bloco são removidos.

A abordagem deste trabalho é tentar manter o máximo dos dados dos equipamentos disponíveis. No entanto, para viabilizar a validação do algoritmo genético apresentado na próxima seção através da comparação com a análise exaustiva das combinações em tempo aceitável, foi necessário reduzir o espaço de busca das posições candidatas. Para tanto, decidiu-se realizar amostragem automática das posições. Baseado em informações da topologia e taxas de falha dos componentes, pode-se selecionar posições candidatas para o procedimento de alocação de dispositivos de proteção.

Com as informações das taxas de falhas, pode-se estimar os efeitos das interrupções no pior caso. Os índices para o pior caso são aqueles resultantes da ausência de qualquer proteção ao longo do alimentador e qualquer falha resulta em uma interrupção a todos os consumidores. Assim, os valores máximo de SAIFI e MAIFI são limitados ao somatório de todas as taxas de falha, enquanto para SAIDI o valor é dado pela soma de todas as durações médias de reparo, ou seja, a duração do reparo multiplicada pela taxa de falha permanente para cada componente.

Esta observação permite calcular o pior efeito possível da falha de um determinado conjunto de componentes, sem a necessidade de incluir a lógica de resposta da proteção. Assumindo um valor de tolerância para o incremento do valor máximo do índice resultante para um conjunto de elementos, pode-se percorrer o grafo do sistema e alocar posições candidatas a posicionamento de religadores sempre que o somatório dos elementos alcançar um múltiplo da tolerância. O valor da tolerância em porcento, utilizado como parâmetro de entrada, é multiplicado pelo valor total máximo para o índice em questão para obter o valor real a ser comparado.

Em termos de topologia, seleciona-se todos os nós com mais de duas ramificações a jusante, desde que o efeito total das falhas a jusante atinja o valor da tolerância. O primeiro nó em cada ramificação à jusante também é selecionado como posição candidata.

A título de ilustração, empregando diferentes valores de tolerância para os índices MAIFI e SAIFI, o método de seleção de posições candidatas foi aplicado para o sistema de grande porte modelado geograficamente apresentado na Seção 4.6, com total de 49418 nós. O número de nós selecionados para cada valor é mostrado na Tabela 5.1. Observa-se que, ao empregar valores de tolerância igual ou maior que 1%, a redução do número de posições candidatas é drástica.

Tabela 5.1: Número de nós selecionados para diferentes parâmetros de tolerância de amostragem incremental MAIFI-SAIFI.

Tolerância (%)	Número de nós	Porcentagem de nós do sistema (%)
0,001	16346	33,07
0,01	8003	16,19
0,05	2969	6,01
0,1	1612	3,26
1	228	0,46
2	121	0,24
10	31	0,06

5.2.2 Análise exaustiva de um sistema de grande porte

Nesta subseção, foi empregado peso unitário para SAIFI ($w_{\text{SAIFI}} = 1$) e efetuada a análise exaustiva para o sistema de grande porte completo, apresentado no Capítulo 4. São realizadas análises exaustivas para 1 e 2 religadores, visto que não é possível enumerar todas as combinações para 3 ou mais religadores sem realizar uma redução drástica do número de posições candidatas.

Um religador, diferentes valores de tolerância

A análise exaustiva foi realizada utilizando diferentes valores para o parâmetro de tolerância de amostragem SAIFI-MAIFI, de 0% (sem amostragem) a 1%. Empregando implementação serial (sem uso de paralelismo), o estudo sem amostragem leva cerca de 6 minutos, enquanto para tolerância de 1% são necessários apenas 4 segundos. Os resultados da amostragem sobre a função objetivo são mostrados nas Figuras 5.1 a 5.5. Nestas figuras, o marcador circular indica o valor ótimo. Como a ordem dos nós é resultado da ordem da visita no grafo, ela é consistente entre as figuras, contudo a numeração de cada nó entre as figuras é diferente e não pode ser utilizada como comparação direta.

O caso base apresenta SAIFI de 3,79 e MAIFI de 55,5 interrupções/ano. A solução ótima (função objetivo de 0,048) foi encontrada para tolerâncias de até 0,5%, reduzindo SAIFI para 3,77 e MAIFI para 52,8 interrupções/ano, representando uma redução de 0,4% no SAIFI e de 5% no MAIFI. Para a tolerância de 1%, a solução ótima não foi encontrada, sendo que a melhor solução encontrada (função objetivo de 0,045) não apresenta redução significativa de SAIFI, reduzindo MAIFI por cerca de 5%. A melhor posição encontrada para tolerância de 1,0% está indicada por um marcador circular na Figura 5.6, enquanto a posição ótima está representada a Figura 5.7. As duas posições são distintas topológica e geograficamente.

Para ilustrar o comportamento dos índices e não apenas da função objetivo, os resultados para SAIFI (MAIFI) são mostrados nas Figuras 5.8 (5.10) e 5.9 (5.11), para o espaço sem amostragem e com tolerância de 0,05%, respectivamente. Para tolerância de 0,05%, o espaço de busca é reduzido a 6% do original, ainda assim mantendo as principais características do espaço sem amostragem. Observa-se que, como esperado, a posição ótima da função objetivo não coincide com os mínimos de cada gráfico, visto que é necessário encontrar uma solução de compromisso.

Conclui-se que valores de tolerância de até 0,5% podem ser aceitáveis. Para tais valores, observa-se que, enquanto posições que apresentam, comparativamente, baixa influência nos índices

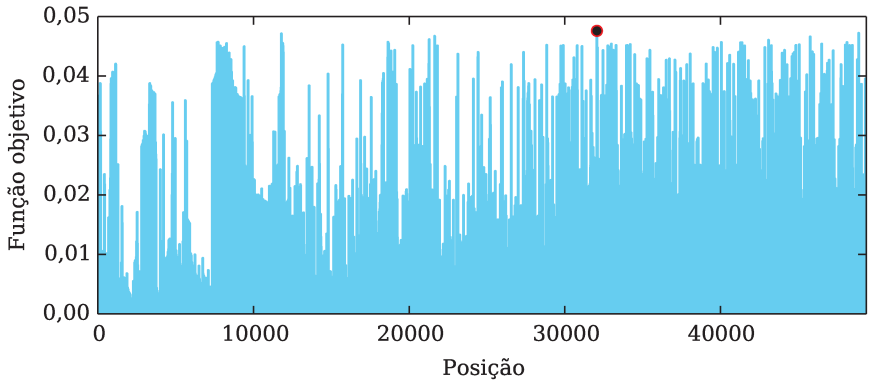

Figura 5.1: Função objetivo resultante da alocação de um religador em cada posição candidata: sem amostragem.

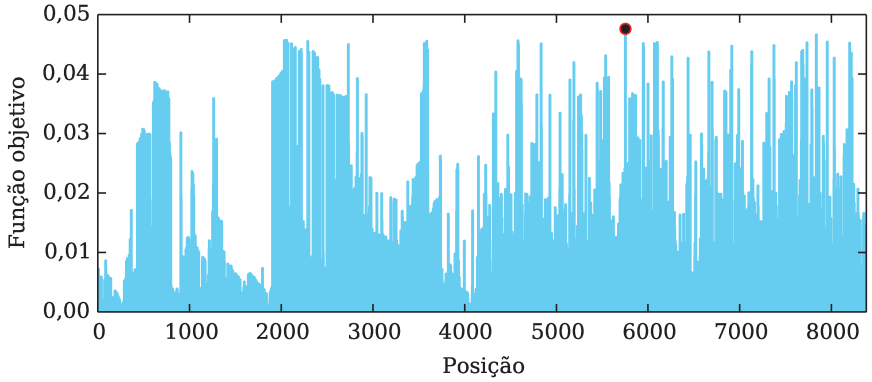

Figura 5.2: Função objetivo resultante da alocação de um religador em cada posição candidata: tolerância de 0,01%.

são excluídas do espaço de busca, as principais posições candidatas são preservadas diretamente ou através do seu agrupamento com posições topologicamente próximas. Mesmo valores de tolerância mais altos, a exemplo do valor de 1% empregado para a Figura 5.5, podem ser úteis em análises qualitativas do sistema.

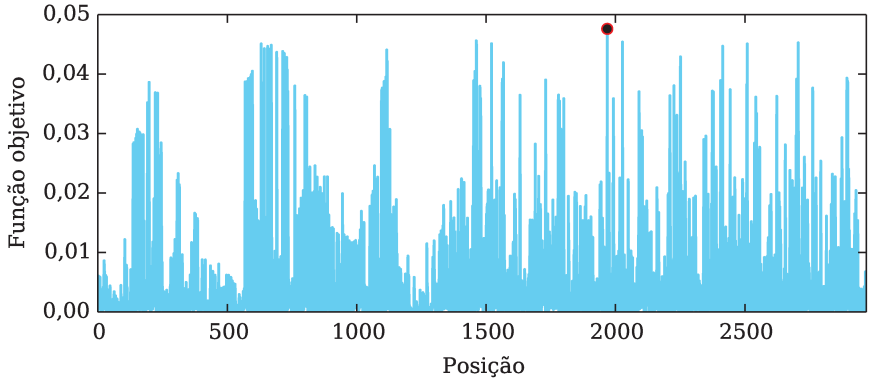

Figura 5.3: Função objetivo resultante da alocação de um religador em cada posição candidata: tolerância de 0,05%.

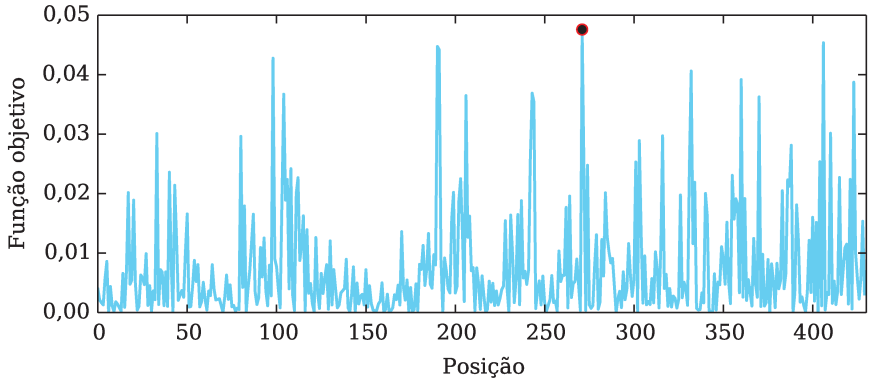

Figura 5.4: Função objetivo resultante da alocação de um religador em cada posição candidata: tolerância de 0,5%.

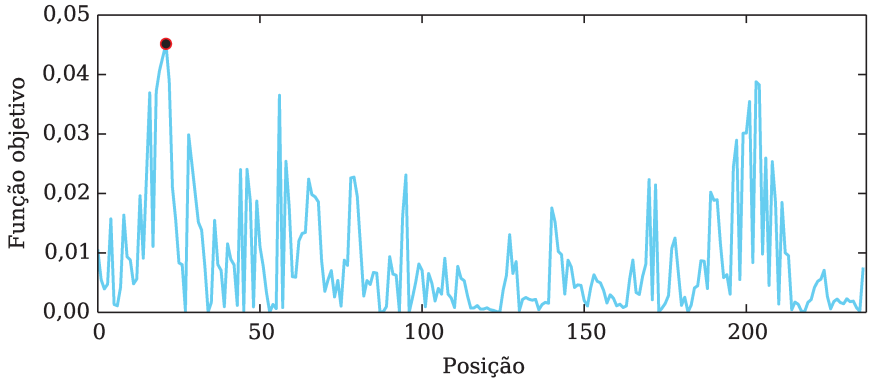

Figura 5.5: Função objetivo resultante da alocação de um religador em cada posição candidata: tolerância de 1,0%.

Figura 5.6: Melhor posição de alocação de 1 religador com amostragem empregando tolerância de 1,0%.

Figura 5.7: Posição de alocação ótima de 1 religador (sem amostragem e tolerâncias de 0,01%, 0,05%, 0,5%).

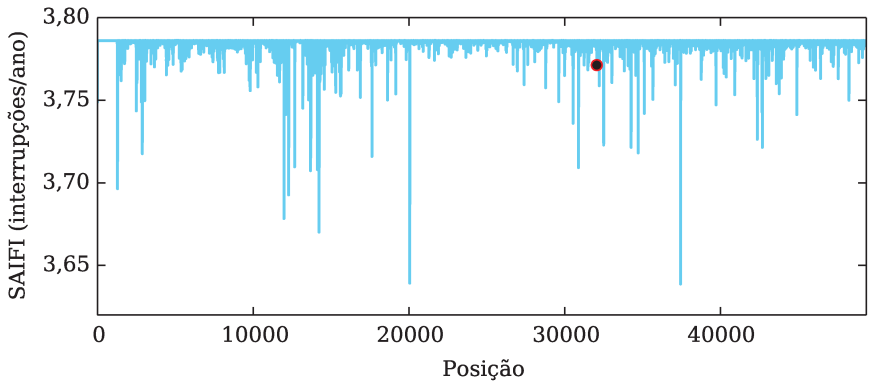

Figura 5.8: SAIFI resultante da alocação de um religador em cada posição candidata: sem amostragem.

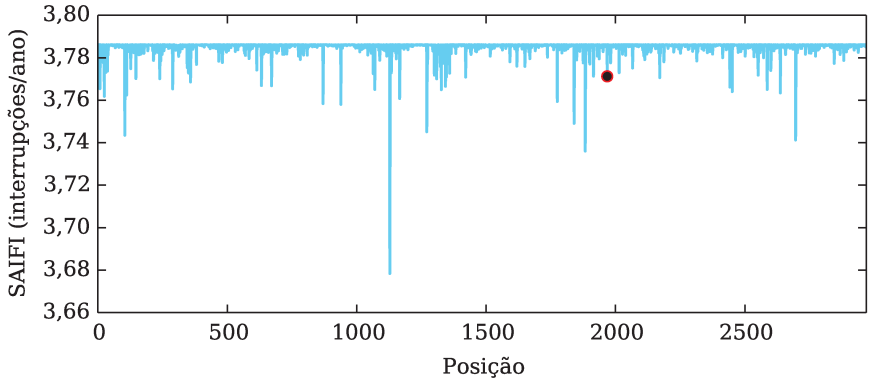

Figura 5.9: SAIFI resultante da alocação de um religador em cada posição candidata: tolerância de 0,05%.

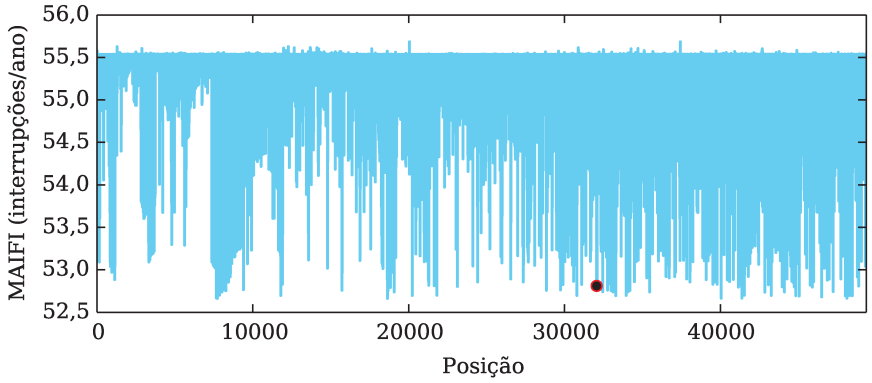

Figura 5.10: MAIFI resultante da alocação de um religador em cada posição candidata: sem amostragem.

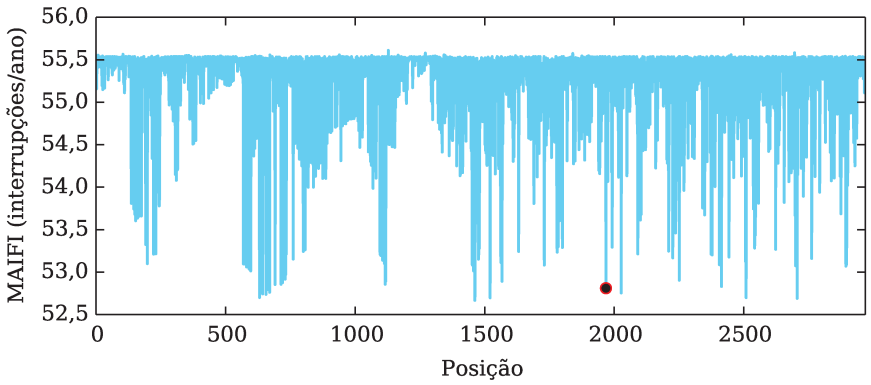

Figura 5.11: MAIFI resultante da alocação de um religador em cada posição candidata: tolerância de 0,05%.

Dois religadores, diferentes valores de tolerância

Para dois religadores, mesmo empregando métodos paralelos (Apêndice B), não é possível enumerar todas as combinações possíveis em tempo e consumo de memória práticos. Foram empregados valores de 0,5% e 0,05% de tolerância, resultando em tempos totais de 5 minutos e 4 horas realizando a simulação paralela de 4 cenários simultaneamente. Os resultados são representados em forma de mapas de cores nas Figuras 5.12 e 5.17, os quais representam matrizes simétricas, com os elementos da diagonal ausentes. Para estas figuras, cada par de coordenadas representa a alocação de um par de religadores nas posições equivalentes, com o valor da função em questão (função objetivo, SAIFI ou MAIFI) resultante indicado pela cor corresponde, de acordo com a legenda de cada figura. Por exemplo, as coordenadas (10, 11) e (11, 10) representam o mesmo valor, correspondente à alocação de um religador na posição candidata 10 e outro na posição candidata 11. Como não foi permitida a alocação de dois religadores na mesma posição, a diagonal não é preenchida.

Para a Figura 5.12 foi empregada tolerância de 0,5%. Com valor da função objetivo de 0,0929, a combinação de posições está indicada por um marcador circular na figura e apresenta SAIFI de 3,77 e MAIFI de 50 interrupções/ano, redução de 0,4% e 10%, respectivamente. Já para a Figura 5.12, utilizando tolerância de 0,05%, a função objetivo alcançou um valor incrementalmente melhor (0,0931), contudo os valores dos índices são aproximadamente os mesmos. Em ambas as figuras, observa-se que uma grande parte das combinações apresenta valores baixos de função objetivo, enquanto apenas uma pequena parcela aproxima-se do valor ótimo. Ainda assim, há múltiplas combinações com valores próximos do valor ótimo, ou seja, efetivamente há diversas soluções práticas que alcançam os mesmos índices.

Devido ao grande volume de dados, não é possível representar e visualizar fielmente todas combinações diretamente nos mapas de cores apresentados. Como complemento, para ilustrar a distribuição das combinações, foram criados os histogramas das Figuras 5.18 e 5.19, para tolerâncias de 0,5% e 0,05%, respectivamente. Estes histogramas representam o número total de soluções que resultam em determinado valor de função objetivo, divididas em diversas faixas de valores, dentre todas as soluções possíveis para o determinado nível de tolerância. Além da redução do número de amostras, observa-se que um valor mais alto de tolerância resulta em um número reduzido de soluções com valores próximos a 0 para a função objetivo. A distribuição geral é próxima, preservando inclusive as soluções próximas à ótima.

Os pares de posições ótimas encontradas com tolerância de 0,5% e 0,05% estão mostradas nos diagramas das Figuras 5.20 e 5.21, respectivamente. A posição mais próxima da subestação é a mesma já encontrada no estudo de alocação de 1 religador e coincide para os dois valores de tolerância. A segunda posição de cada par é diferente entre os resultados e, apesar de serem topológica e geograficamente próximas, o número de consumidores afetados pela mudança de posição não é exposto pelo diagrama do sistema – uma ramificação pequena em termos geográficos pode alimentar mais consumidores que uma ramificação longa, por exemplo, trechos urbanos e rurais, respectivamente.

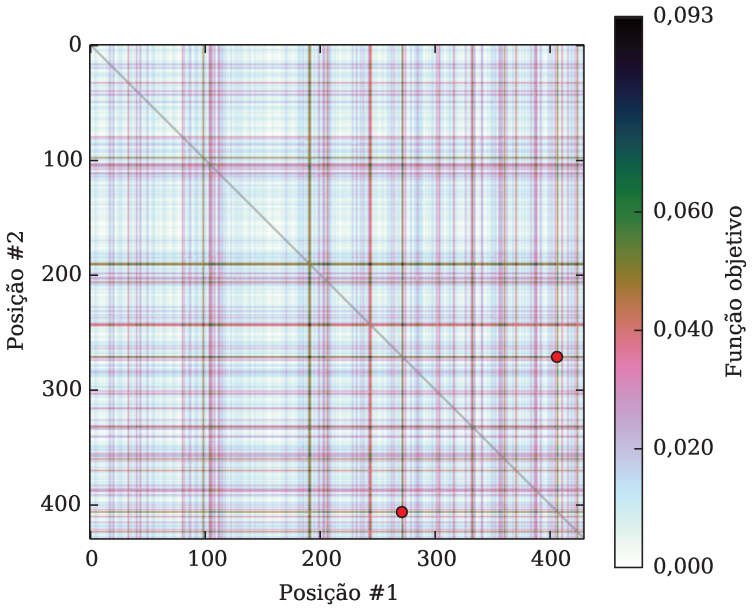

Figura 5.12: Função objetivo resultante da alocação de 2 religadores, espaço de busca amostrado com tolerância de 0,5%.

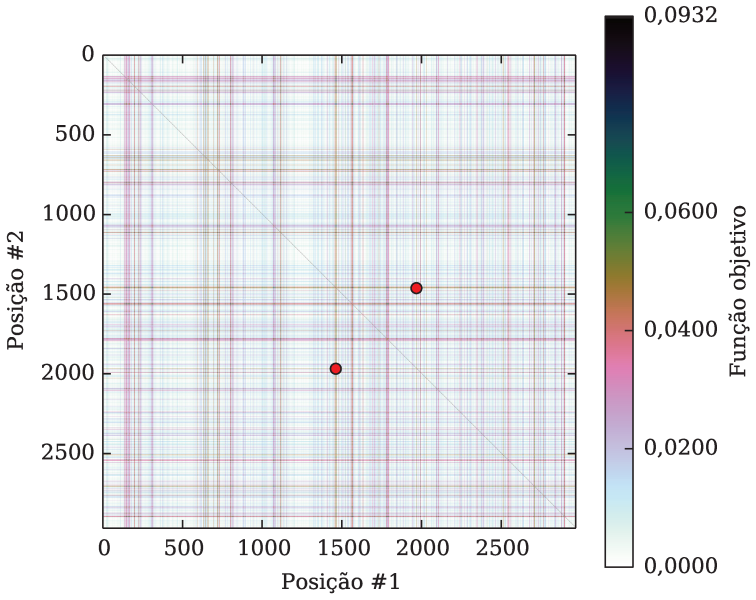

Figura 5.13: Função objetivo resultante da alocação de 2 religadores, espaço de busca amostrado com tolerância de 0,05%.

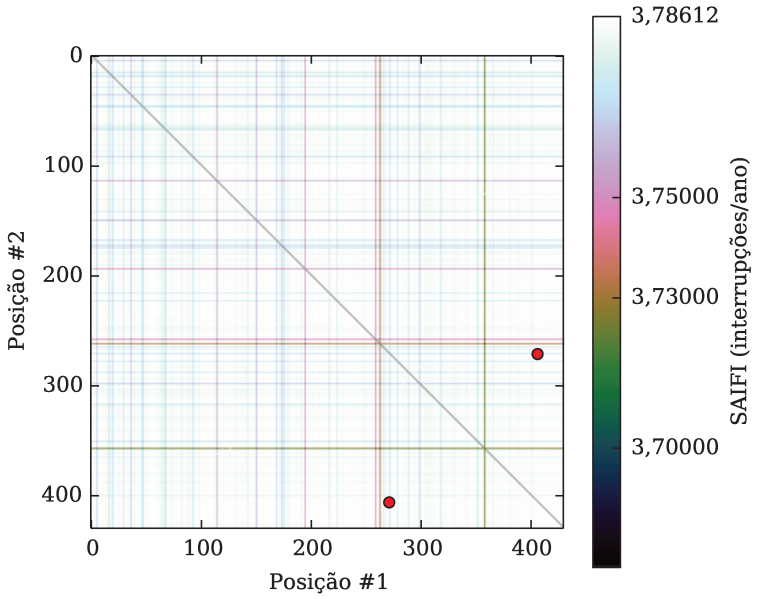

Figura 5.14: SAIFI resultante da alocação de 2 religadores, espaço de busca amostrado com tolerância de 0,5%.

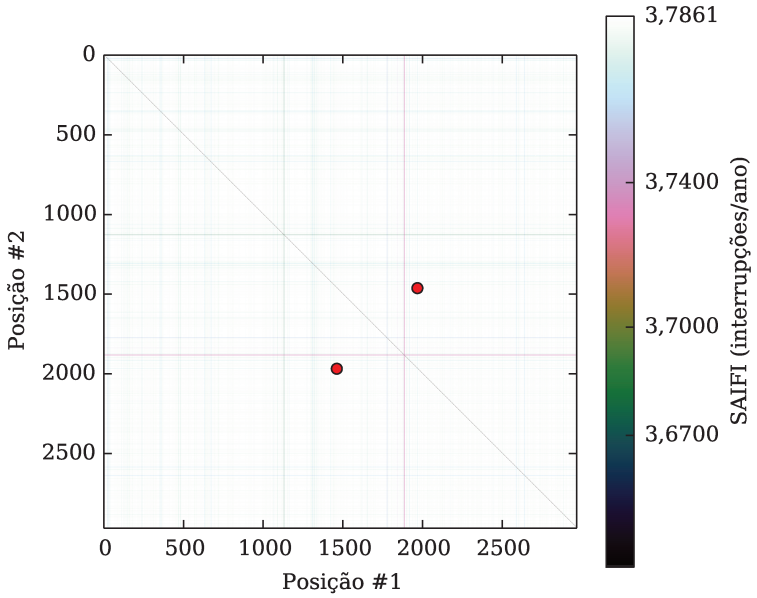

Figura 5.15: SAIFI resultante da alocação de 2 religadores, espaço de busca amostrado com tolerância de 0,05%.

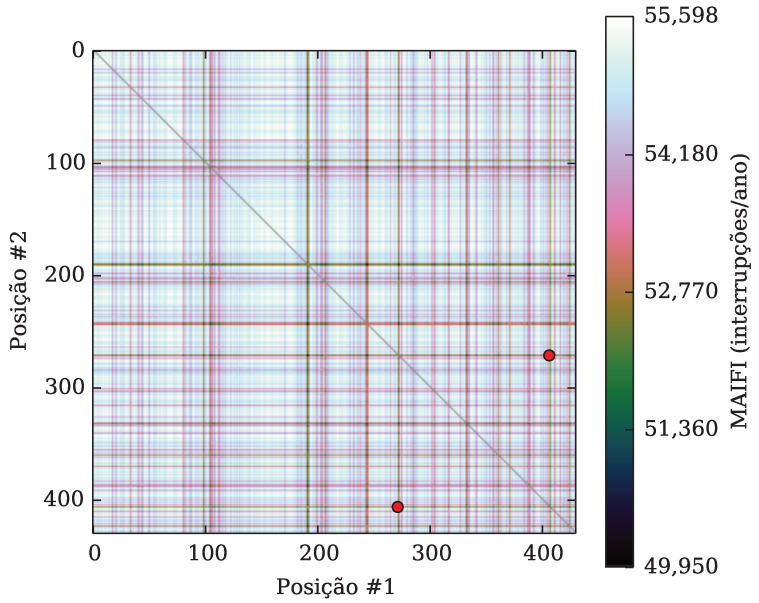

Figura 5.16: MAIFI resultante da alocação de 2 religadores, espaço de busca amostrado com tolerância de 0,5%.

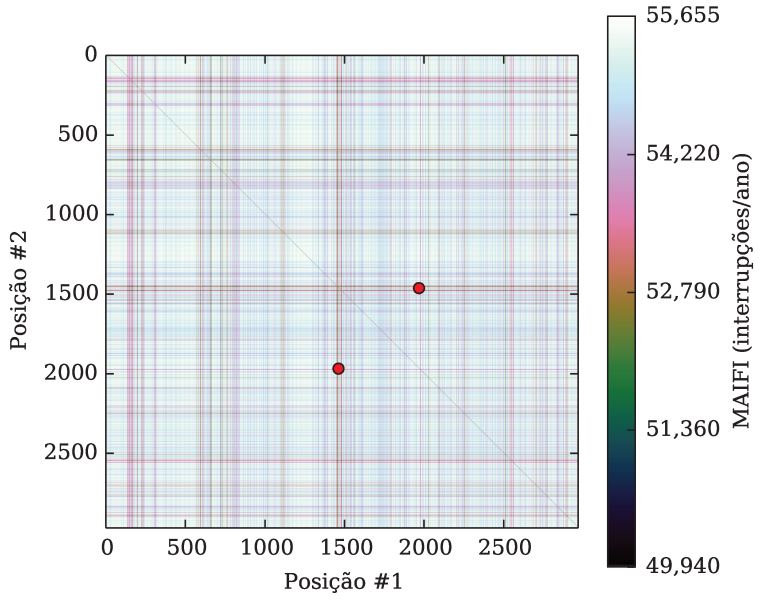

Figura 5.17: MAIFI resultante da alocação de 2 religadores, espaço de busca amostrado com tolerância de 0,05%.

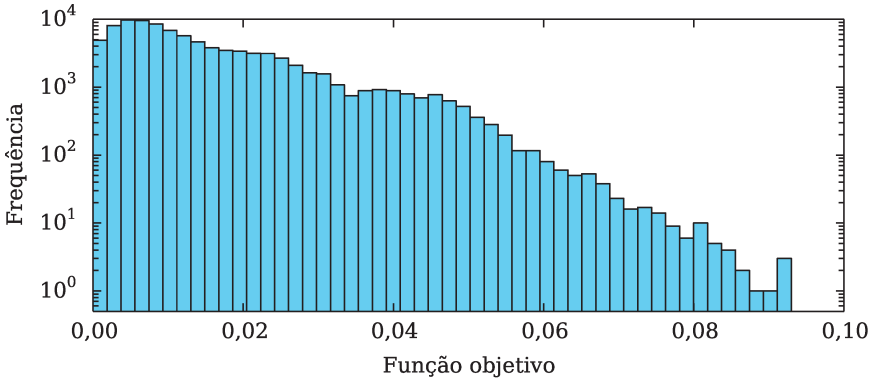

Figura 5.18: Histograma dos valores da função objetivo da alocação exaustiva de 2 religadores, espaço de busca amostrado com tolerância de 0,5%.

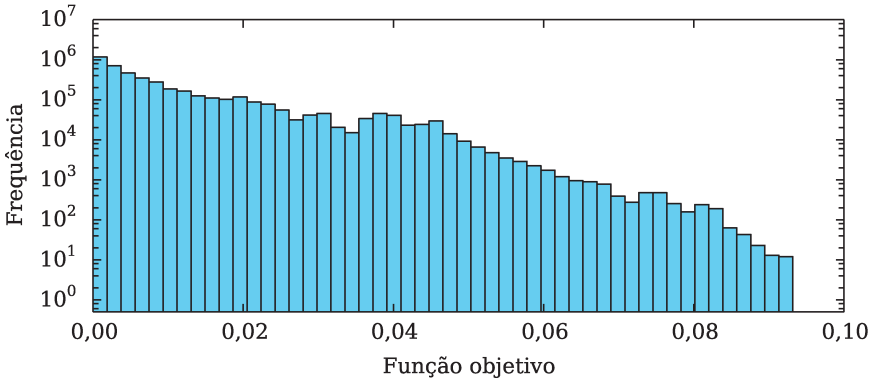

Figura 5.19: Histograma dos valores da função objetivo da alocação exaustiva de 2 religadores, espaço de busca amostrado com tolerância de 0,05%.

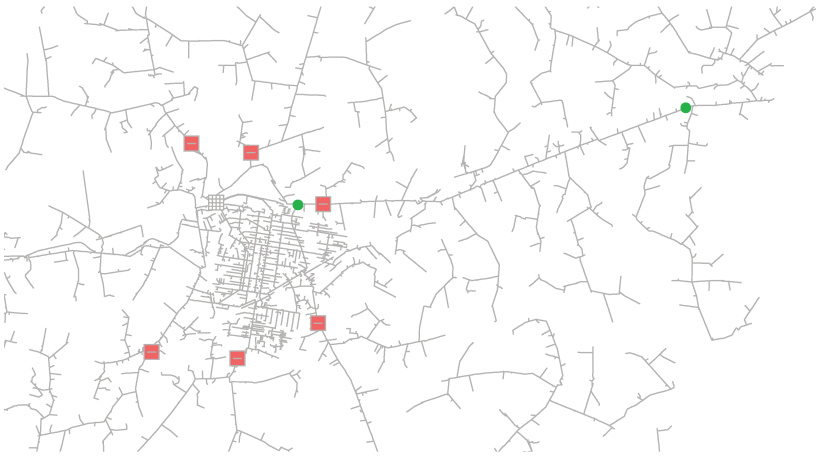

Figura 5.20: Par de posições ótimas para alocação de 2 religadores, com tolerância de amostragem de 0,5%.

Figura 5.21: Par de posições ótimas para alocação de 2 religadores, com tolerância de amostragem de 0,05%.

5.3 Método incremental para alocação de religadores

Os procedimentos de alocação manual de dispositivos de proteção, em especial de religadores automáticos, em geral seguem o procedimento empregado no exemplo da Seção A.2. Ou seja, para a alocação de n religadores:

1. Um ramo principal do alimentador é escolhido como local de instalação.
2. O ramo é dividido em $(n + 1)$ secções.
3. Cada um dos n religadores é alocado ao final da n-ésima secção.

Como alimentadores reais não são, em sua maioria, simétricos, o procedimento não é ótimo. Ainda assim, a instalação dos religadores, mesmo sub-ótima, pode trazer benefícios ao sistema. Com a aplicação dos algoritmos de alocação por análise exaustiva e algoritmo genético, observou-se que algumas características são respeitadas para os sistemas estudados:

1. Para sistemas de grande porte sem religadores, a alocação ótima é realizada empregando os primeiros religadores nos alimentadores (ou ramos de alimentadores) com o maior número de consumidores.
2. A instalação em ramais não principais é realizada apenas após a exaustão das possibilidades de instalação nos alimentadores principais. Para um sistema de grande porte, isto ocorre somente com um número muito elevado de religadores.

Enquanto a análise exaustiva é inviável para a alocação de mais de dois religadores em sistemas com um número elevado de nós elétricos, ela pode ser empregada para obter uma boa solução para o problema de alocação, tendo em vista as características de alocação ótima observadas.

Considerando-se a alocação de n religadores, com n baixo (por exemplo, $n \leq 3$), o método heurístico de alocação incremental consiste nas etapas do fluxograma reproduzido na Figura 5.22. Aloca-se um dispositivo por vez, de acordo com a melhor posição resultante da análise exaustiva, desde que sua alocação implique em melhoria no valor da função objetivo.

Para sistemas com muitos alimentadores ou ramais, supondo a alocação de um conjunto pequeno de religadores (algumas unidades), esta heurística apresenta bons resultados com um baixo custo computacional, apresentando tempo de execução linear com o número de dispositivos. Nos outros casos, recomenda-se a utilização de um método mais robusto como o algoritmo genético apresentado. A limitação do método incremental a um número baixo de religadores se deve ao fato de não serem analisadas combinações de religadores. Em cada passo de alocação do método, apenas uma posição de alocação é escolhida, independente das posições seguintes e sem impacto nas posições já escolhidas pelo método.

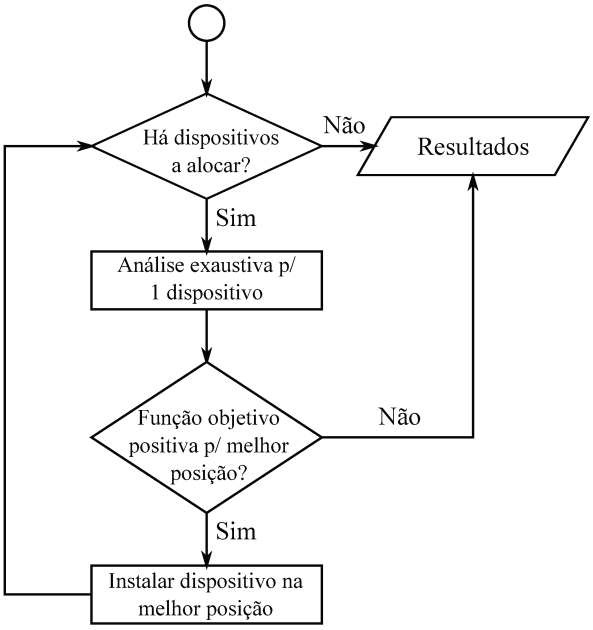

Figura 5.22: Método heurístico incremental para alocação de dispositivos.

5.3.1 Exemplo de aplicação em sistema de grande porte

Para ilustrar o funcionamento da heurística incremental, foi utilizada amostragem de posições empregando tolerância de 0,05% e peso de SAIFI unitário, como na Seção 5.2.2. A solução encontrada é a solução ótima encontrada naquela seção, indicando a utilidade do método em alguns cenários. Os valores da função objetivo, SAIFI e MAIFI através das etapas do método estão mostrados nas Figuras 5.23 a 5.25, onde o posição de alocação selecionada na etapa está indicada por um valor numérico ("1" para as primeira etapa, e "2" para a segunda etapa).

A função objetivo, Figura 5.23, aumenta incrementalmente com a alocação do primeiro religador, na posição indicada por "1". Os efeitos da alocação do primeiro religador são apenas locais: enquanto posições vizinhas em termos topológicos não apresentam mais efeitos positivos significativos se for alocado um religador em uma delas, os efeitos da alocação em outros nós ainda são positivos e mesmo inalterados. Para o SAIFI, como mostrado na Figura 5.24, observa-se que a alocação do primeiro religador reduz o valor do índice de cerca de 3,78 para 3,77 interrupções/ano, enquanto o segundo religador mantém o valor próximo de 3,77 interrupções/ano. Para o MAIFI, Figura 5.25, a alocação dos dois religadores reduz o valor do índice, no total de 10% do valor inicial de 55,5 interrupções/ano.

A fim de explorar os resultados gerais do método para um número maior de religadores, foi confeccionada a Figura 5.26 com a execução para 6 religadores. Neste cenário, que resulta em SAIFI de 3,76 e MAIFI de 43 interrupções/ano, observa-se que a alocação a partir do terceiro equipamento apresenta ganhos cada vez menores, o que sugere que o método não é adequado para um número alto de religadores. Nota-se que não há melhoria significativa do SAIFI ao usar o peso unitário, enquanto o MAIFI foi reduzido em 22,5%. Como alternativa, foi criada a Figura 5.27

utilizando o peso de 3 para SAIFI ($w_{\text{SAIFI}} = 3$). Com um peso maior, o SAIFI foi reduzido para 3,59 interrupções/ano, enquanto o MAIFI foi reduzido para 48 interrupções/ano, representando redução de 5% e 14%, respectivamente. Este exemplo mostra que o ajuste do peso do SAIFI é suficiente para controlar o processo de alocação.

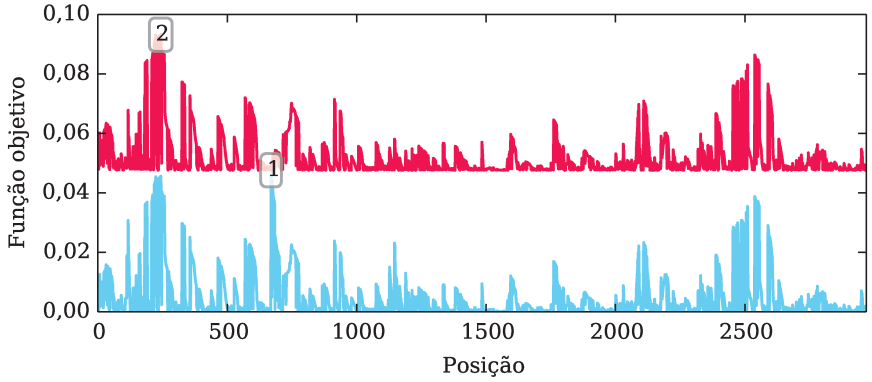

Figura 5.23: Função objetivo para a alocação de 2 religadores, tolerância de 0,05%, empregando o método incremental.

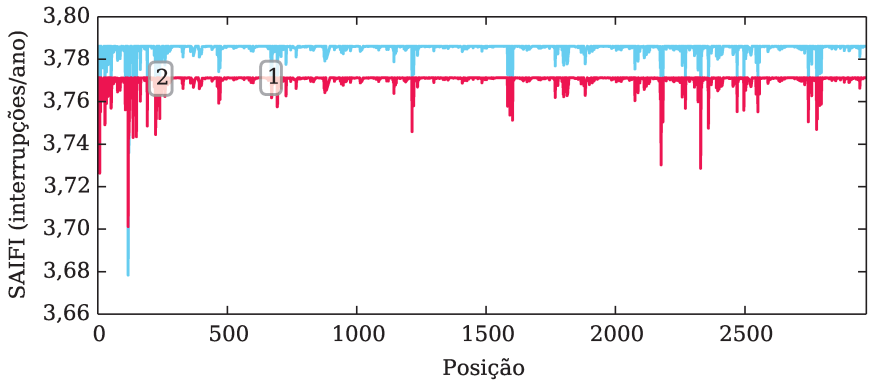

Figura 5.24: SAIFI para a alocação de 2 religadores, tolerância de 0,05%, empregando o método incremental.

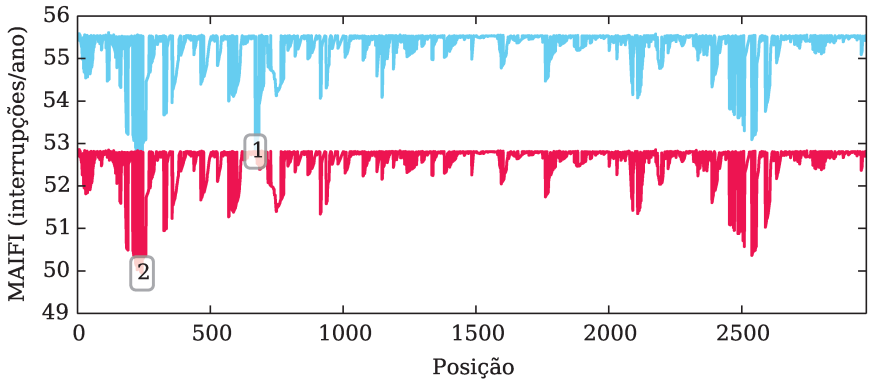

Figura 5.25: MAIFI para a alocação de 2 religadores, tolerância de 0,05%, empregando o método incremental.

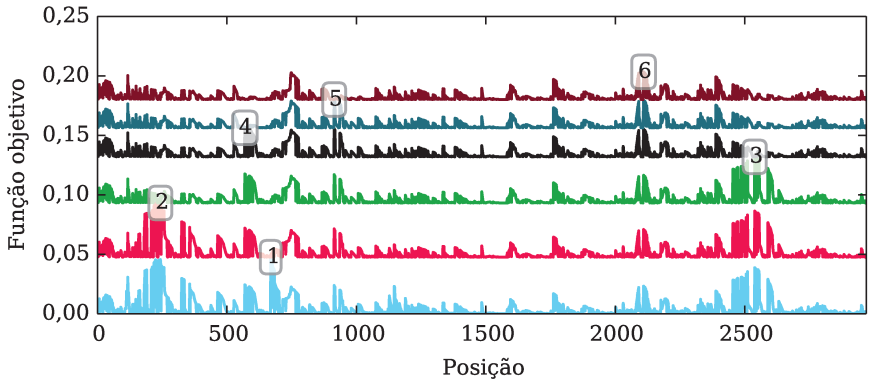

Figura 5.26: Método incremental: alocação de 6 religadores, tolerância de 0,05%.

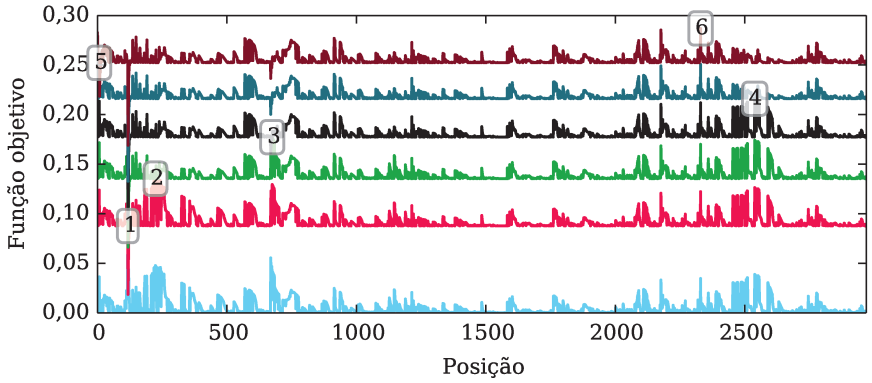

Figura 5.27: Método incremental: MAIFI com peso 3, alocação de 6 religadores, tolerância de 0,05%.

5.4 Algoritmo genético

Algoritmos genéticos têm sido aplicados com sucesso a problemas de alocação de dispositivos ([70–73]). Sua capacidade de exploração do espaço de busca de soluções permite obter soluções de boa qualidade, em muitos casos alcançando o ótimo global. Podem ser implementados das mais diversas formas, e podem ser aplicados com mais ou menos sucesso a determinado problema. A versão empregada neste trabalho consiste em um algoritmo genético com múltiplas (três) populações e foram testadas várias modalidades de seleção.

Em um algoritmo genético, que é um processo originalmente bioinspirado, uma população inicial de indivíduos (soluções candidatas) sofre transformações como filtragem (seleção) e mistura (recombinação e migração), podendo também ser parcialmente corrompida (mutação). Através de um processo iterativo que inclui tais transformações, espera-se que o processo artificial de evolução dos indivíduos alcance melhores soluções ao longo das iterações (gerações). O variação implementada do algoritmo foi estruturada como esquematizado na Figura 5.28. Após a preparação dos dados e criação de uma população inicial, são repetidas iterações do processo de cálculo da função objetivo, seleção, recombinação, mutação e migração até o critério de parada seja alcançado.

Os parâmetros de taxas de mutação e de recombinação são diferentes entre as três populações, que totalizam 100 indivíduos: uma população emprega as taxas nominais, uma emprega taxas mais baixas (metade dos valores nominais) e a última emprega taxas mais altas (dobro dos valores nominais).

Como resultados da execução do algoritmo, além da melhor solução encontrada, também é mantido um conjunto das 20 melhores soluções encontradas ao longo das gerações. Sempre que uma solução melhor que a encontrada até o momento é encontrada, ela é gravada neste conjunto. O conjunto de soluções é útil por permitir que conhecimentos de engenheiros especialistas sejam empregados para selecionar a solução final, mesmo que sub-ótima em termos de função objetivo. Além disso, podem existir restrições não modeladas quanto à instalação em um determinado local.

Após a apresentação da codificação dos indivíduos, as etapas do algoritmo são descritas nas subseções a seguir.

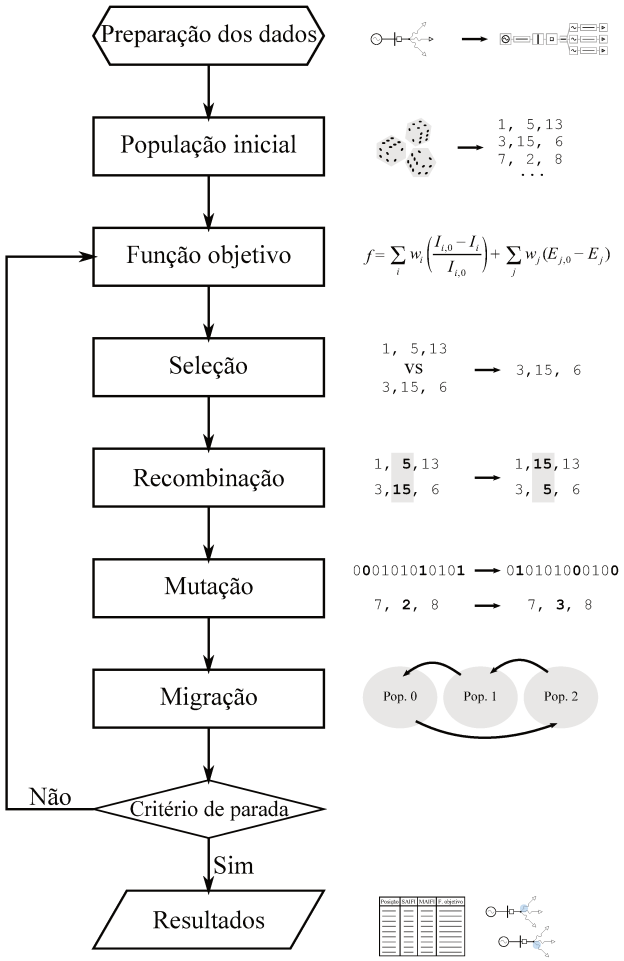

Figura 5.28: Fluxograma do algoritmo genético.

5.4.1 Codificação dos indivíduos

Na representação dos indivíduos, emprega-se a representação de inteiros tradicional, onde cada inteiro representa uma posição candidata. Cada indivíduo, por sua vez, contém um vetor com um número máximo de indivíduos.

Utilizam-se n bits para codificar cada posição candidata e são permitidos um máximo de p posições para os equipamentos, como representado na Figura 5.29. Cada posição válida de equipamento equivale a um índice de nó onde o equipamento é instalado.

O valor de n é dado pelo número de bits necessários para representar, como um número inteiro, o número de posições candidatas. Por exemplo, para 79 posições, são necessários 7 bits. Dado que $2^7 = 128$, a faixa numérica desejada é sobre-representada. Os valores numéricos acima de 79

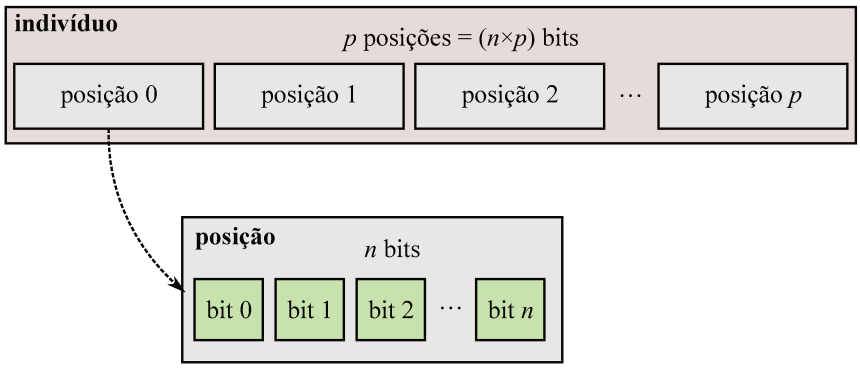

Figura 5.29: Representação de um indivíduo.

representam posições inválidas, mas são ainda assim mantidos. Posições inválidas não são contadas como equipamentos a alocar. Um exemplo mais detalhado considerando um total de seis posições candidatas (0 a 5) está apresentado na Figura 5.30.

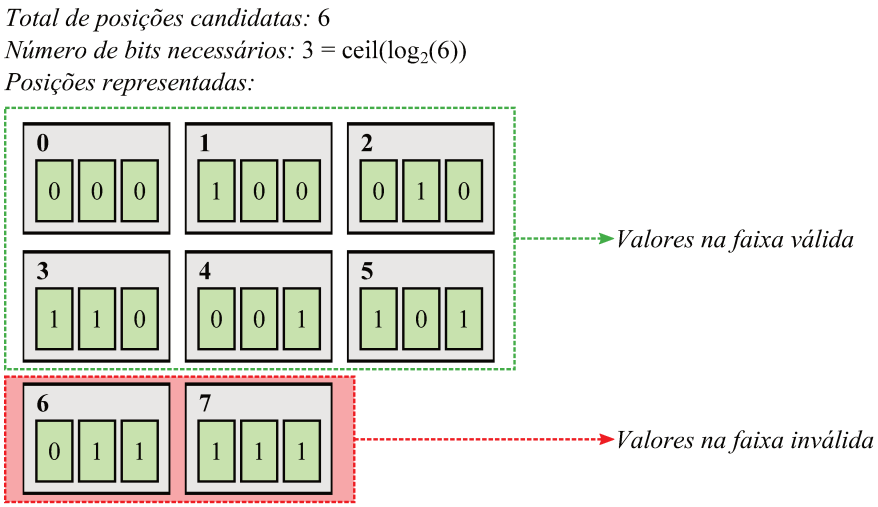

Figura 5.30: Exemplo da representação de 6 posições candidatas utilizando 3 bits.

5.4.2 População inicial

A população inicial pode ser criada por três mecanismos, descritos a seguir.

Configuração atual: Restrito a estudos de realocação, pode-se empregar indivíduos que representam a configuração de alocação já presente nos dados do sistema como uma parcela da população inicial.

Resultados do método incremental: Assim como o uso da configuração atual, a configuração de alocação resultante do método heurístico incremental pode ser empregada para iniciar a execução do algoritmo genético com uma população de boa qualidade.

Indivíduos gerados de forma aleatória: Um conjunto de indivíduos cada um com um número aleatório, porém válido, de posições aleatórias é gerado. Este mecanismo é responsável por gerar a maior parcela da população.

Em geral, observou-se que o uso de 10% da população baseada na configuração atual, 10% baseada nos resultados da heurística incremental, com os indivíduos restantes gerados de forma aleatória, apresenta bons resultados.

5.4.3 Cálculo da função objetivo

O algoritmo de simulação analítica é executado para cada indivíduo, seguido do cálculo da função objetivo. Trata-se da etapa mais custosa em termos computacionais. Para acelerar esta etapa, podem ser utilizados os métodos paralelos expostos no Apêndice B.

5.4.4 Seleção

Diversas variações para o procedimento foram testadas: classificação ou *ranking* linear, ranking exponencial, seleção truncada, e torneio. A seleção por torneio mostrou-se a mais promissora e é a utilizada para os resultados apresentados neste capítulo.

5.4.5 Recombinação

Cada indivíduo selecionado pode sofrer recombinação com um dos outros indivíduos da seleção. Caso ocorra, uma das posições do vetor de alocações, escolhida de forma aleatória, é trocada entre os indivíduos. Para indivíduos com total de posições diferentes, pode ocorrer da posição escolhida ser maior que o tamanho do vetor de posições do menor indivíduo. Neste caso, a posição é simplesmente acrescentada ao indivíduo com vetor menor. A taxa de recombinação empregada foi de 50%.

5.4.6 Mutação

Dois mecanismos de mutação são empregados:

Mutação global: A mutação global é realizada através da mutação dos bits que representam cada posição alocada. Cada bit que representa os indivíduos tem certa probabilidade de sofrer mutação. O bit é negado caso a mutação ocorra. Este mecanismo é chamado de mutação global pois permite que indivíduos com características bastante diferentes dos indivíduos originais sejam gerados.

Mutação local: Cada posição alocada tem a possibilidade de sofrer um deslocamento para uma das posições candidatas vizinhas em termos do grafo de confiabilidade do sistema. Como a grande maioria dos elementos de sistemas de distribuição são conectados a apenas um ou dois outros elementos, são empregados os vizinhos de até terceira ordem.

Os mecanismos são complementares. Através de diversos testes, observou-se que a taxa de mutação global deve ser mais baixa que a taxa de mutação local para permite que a vizinhança das soluções sub-ótimas seja explorada, possivelmente encontrando a solução ótima. Por outro lado, caso um ótimo local seja encontrado, a mutação global permite que diferentes espaços de soluções sejam explorados e o ótimo global seja encontrado ao longo das gerações. Empregou-se taxa de 1% de mutação global e 5% de mutação local.

5.4.7 Migração

Existe a possibilidade de indivíduos migrarem entre as três subpopulações. Na migração, o pior indivíduo de cada subpopulação é substituído pelo melhor indivíduo da subpopulação vizinha. A taxa de migração empregada foi de 20%.

5.4.8 Critérios de parada e renovação parcial da população

Os critérios de parada mais utilizados para algoritmos genéticos, também implementados na versão documentada, são:

- Número total de gerações;
- Tempo de execução;
- Número de gerações sem aprimoramento da solução.

Este último critério, número de gerações sem aprimoramento, é também conhecido como *stall*. Como opção a este critério, pode ser utilizado um mecanismo de renovação parcial da população, consistindo na substituição de uma parcela dos indivíduos da população atual por novos indivíduos gerados aleatoriamente. Assim, ao detectar o número limite de gerações sem aprimoramento, a população é parcialmente modificada, a execução do algoritmo segue normalmente e novas soluções aprimoradas podem ser encontradas.

5.4.9 Validação em um sistema de grande porte

Para realizar validação da implementação, o algoritmo genético foi aplicado ao sistema completo para alocação de 2 novos religadores, de forma a tentar reproduzir a solução ótima encontrada pela análise exaustiva, conforme a Seção 5.2.2. Visto que o método incremental já havia alcançado o valor ótimo para este teste e o objetivo da execução com o algoritmo genético é demonstrar que ele também é capaz de encontrar a solução ótima, a população inicial foi gerada inteiramente de forma aleatória, sem uso dos resultados do método incremental. Três valores de tolerância para

amostragem das posições candidatas foram usados – 0,05%, 0,01% e 0% (sem amostragem) – e cada teste foi realizado com 10 sementes aleatórias diferentes. O critério de parada foi de 1000 gerações sem aprimoramento da melhor solução encontrada. Os resultados estão sintetizados na Tabela 5.2. Os valores dos índices são de cerca de 3,77 interrupções/ano para SAIFI e 50 interrupções/ano para MAIFI, com diferenças incrementais a partir da segunda casa decimal. Para a tolerância de 0,01% e para o caso sem amostragem, a melhor solução encontra é a mesma. Já para a tolerância de 0,05%, a melhor solução encontrada é confirmada como ótima pelo resultado da Seção 5.2.2.

Tabela 5.2: Síntese dos resultados dos testes do algoritmo genético com três valores de tolerância de amostragem e 10 sementes aleatórias.

Tolerância de amostragem (%)	0,05	0,01	0
Tempo médio de execução serial (s)	93	390	545
Número médio de gerações até encontrar a melhor solução	182	981	1460
Número máximo de gerações até encontrar a melhor solução	547	3066	3941
Melhor valor para função objetivo	0,0932	0,0933	0,0933

5.5 Estudo de caso: realocação com remoção de *fuse saving* da subestação

Nos testes previamente apresentados neste capítulo, os disjuntores que conectam os alimentadores à subestação apresentam a funcionalidade de religamento automático e operam sob a política de *fuse saving*. Nesta seção, investiga-se a possibilidade de trocar a política de *fuse saving* por *fuse clearing* no religador da subestação, realocando os demais religadores. A remoção total da política de *fuse saving*, que minimizaria o SAIFI, é inviável. Contudo, a remoção da política na subestação, mantendo-a nos religadores restantes, é viável e pode trazer benefícios em sistemas com um número alto (maior que algumas unidades) de religadores.

Para este estudo, será empregado o maior alimentador do sistema, Alimentador 2, conforme apresentado na Seção 4.6, que é também o alimentador com piores índices. No caso base, o alimentador apresenta 4 religadores dedicados (i.e., instalados ao longo do circuito), SAIFI de 7,70 e MAIFI de 158 interrupções/ano. Ambos índices são altos e, como é desejado que o SAIFI seja reduzido com prioridade, será atribuído um peso de 5 ao índice ($w_{\text{SAIFI}} = 5$). Será atribuído um valor de 0,01% para a tolerância do procedimento de amostragem.

A análise da alocação de um novo religador, sem permitir realocação daqueles já instalados e sem modificação da política da subestação, pode ser realizada através da análise exaustiva e reduz SAIFI para 6,91 interrupções/ano (redução de 10%), aumentando MAIFI para 159 interrupções por ano. Isto é um indicativo que o sistema não se encontra em sua configuração ótima em termos de religadores.

Para este estudo, o método incremental não apresenta bons resultados. Como pode ser visto na Figura 5.31, o primeiro religador é adicionado diretamente na posição 0, ou seja, é novamente adicionado um religador (com *fuse saving*) na subestação. O resultado final alcança os valores de 7,30 interrupções/ano para SAIFI e 149 interrupções/ano para MAIFI, reduções de 5,2% e 5,9%, respectivamente.

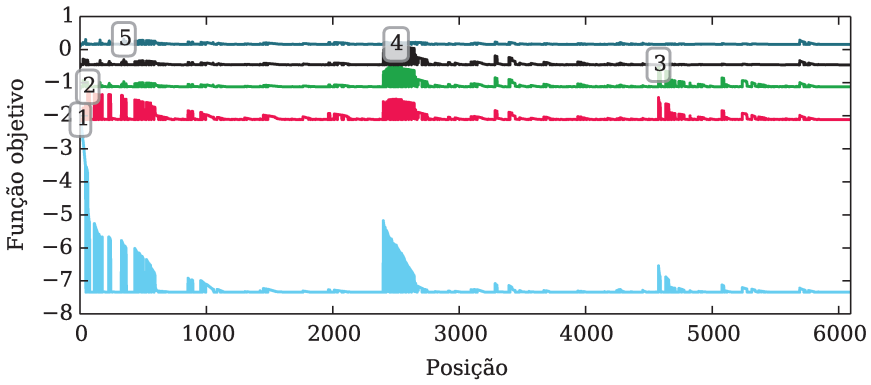

Figura 5.31: Método incremental: MAIFI com peso 5, alocação de 6 religadores no Alimentador 2, tolerância de 0,01% para amostragem.

Em vista do resultado da análise exaustiva para alocação de 1 religador, e assumindo que o resultado do método incremental é subótimo neste cenário, o algoritmo genético foi executado para refinar os resultados. A população inicial foi povoada com 10% de indivíduos baseados no resultado do método incremental, 10% de indivíduos baseados na configuração original, e os 80% restantes gerados de forma aleatória. Empregou-se um número fixo de 30.000 gerações, com renovação parcial de 20% da população a cada 100 gerações sem melhoria no valor da função objetivo, resultando em cerca de 44 minutos de execução com a simulação paralela dos cenários (em 4 *threads*, computador dedicado). A melhor solução encontrada apresenta SAIFI de 6,72 interrupções/ano e MAIFI de 156 interrupções/ano, com função objetivo de 0,626. Em relação ao caso base, ocorreu uma redução de 13% do SAIFI e 1,5% do MAIFI. Este resultado mostra que, com a mudança da política de operação do disjuntor da subestação, é possível encontrar uma solução melhor tanto em termos do SAIFI quanto MAIFI. Através da representação mostrada na Figura 5.32, observa-se que os 4 religadores originais foram realocados para o mesmo tronco onde haviam sido instalados originalmente, contudo todos são deslocados. Com a remoção de *fuse saving* na subestação, o primeiro religador à esquerda é movido para o início do alimentador, cobrindo uma parte maior do alimentador, e o novo religador assume uma posição central entre os outros religadores. A ampliação em torno deste novo religador, mostrada na Figura 5.33, evidencia que sua instalação é proposta no ramo lateral, não no tronco principal como sugerido na Figura 5.32. Isto significa que a parte do sistema a montante dos religadores opera em *fuse clearing*.

Como mencionado na descrição do algoritmo genético, a implementação empregada mantém as 20 melhores soluções encontradas ao longo do processo. Mesmo que muitas das soluções sejam próximas, elas podem ser inspecionadas ao final do processo. Uma das soluções mais distintas encontradas, apresentando SAIFI de 6,51 interrupções/ano, MAIFI de 189 interrupções/ano, com 0,578 como valor da função objetivo, está representada na Figura 5.34. Esta solução alternativa consegue reduzir o SAIFI em 15,5% ao custo de aumentar o MAIFI em 19%. Comparando as posições indicadas na Figura 5.34 àquelas mostradas na Figura 5.32, observa-se que o primeiro religador à esquerda foi movido para uma posição distinta. Isto significa que a parte coberta originalmente pelo religador opera totalmente com a política *fuse clearing*.

Figura 5.32: A solução de melhor qualidade encontrada pelo algoritmo genético.

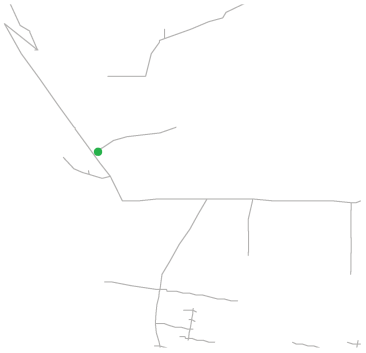

Figura 5.33: Ampliação da Figura 5.32 em torno do religador central.

Este estudo permite concluir que, para o alimentador explorado, a remoção seletiva da política de religamento *fuse saving*, pode reduzir os índices de interrupções sustentadas sem deteriorar os índices de interrupções momentâneas. Além disso, a realocação de religadores para posições próximas às originais indica que a remoção total dos religadores e de *fuse saving* não é viável.

Figura 5.34: Uma das soluções alternativas, de pior qualidade, encontrada ao longo da evolução pelo algoritmo genético.

5.6 Comentários

Métodos de (re)alocação que podem ser aplicados para diferentes contextos foram desenvolvidos neste capítulo. Todos os métodos são baseados numa função objetivo que pode ser ajustada através de fatores multiplicativos para cada índice calculado.

Através da análise de um sistema de grande porte, mostrou-se que o conflito entre confiabilidade e qualidade de energia está sempre presente, mesmo que alteradas políticas de operação. Enquanto alternativas disponíveis na literatura requerem a escolha de múltiplos valores para pesos usados na função objetivo, a versão apresentada permite o ajuste das prioridades entre a redução da frequência de interrupções sustentadas e de interrupções momentâneas através de um único peso.

Caso seja necessário a inclusão de um ou dois religadores, pode ser empregada a análise exaustiva. Desenvolvido inicialmente para a validação do método incremental e do algoritmo genético, o método de análise exaustiva apresenta tempos de execução aceitáveis para tais cenários de utilização graças à formulação aprimorada do algoritmo de simulação analítica da confiabilidade, apresentado no Capítulo 4, em combinação com o procedimento de amostragem de posições candidatas baseado em uma tolerância do máximo valor de SAIFI e MAIFI. O procedimento de amostragem mostrou-se útil tanto para estudos iniciais e qualitativos ao empregar valores altos de tolerância (e.g. 1%) quanto para estudos detalhados, que devem empregar tolerâncias mais baixas (e.g. 0,05%).

Para a alocação de um número não muito elevado de religadores e uma rede de grandes dimensões, é possível utilizar o método heurístico incremental de aplicação repetida da análise exaustiva para obter resultados rapidamente. Estes resultados podem ser indicativos de que há potencial para a alocação de dispositivos na rede de distribuição em estudo.

Para cenários gerais, quando há necessidade de investigar mudanças mais profundas da política de operação, ou o cenário de estudo apresenta um grande número de religadores para alocação ou outros equipamentos de proteção devem ser alocados, pode-se aplicar o algoritmo genético de-

senvolvido. Através da escolha de mecanismo de seleção, taxas de mutação e recombinação, além de diferentes critérios de parada, o algoritmo pode ser aplicado nos mais diferentes contextos. O método pode ser aplicado desde uma análise rápida com um critério de parada que limite o tempo de execução até mesmo uma análise de reconfiguração que inclua a realocação dos religadores disponíveis na rede para tentar melhorar a performance do sistema frente aos índices de confiabilidade. Graças às melhorias do tempo de simulação e a abordagem de codificação dos indivíduos, o algoritmo genético apresenta resultados em cerca de uma hora para a maior rede, obtendo bons resultados tanto para a alocação quanto realocação de religadores.

Capítulo 6

Conclusões

As principais contribuições desta tese foram:

- Investigar o impacto do uso generalizado de religadores nos índices de qualidade de energia e confiabilidade simultaneamente empregando dados históricos de uma concessionária de energia elétrica e via simulação computacional. Neste aspecto, foi observado que tal política pode ter um impacto adverso na qualidade de energia, de forma que estudos são necessários para determinar a melhor estratégia.
- Desenvolver uma metodologia de processamento de dados históricos típicos. O processamento de dados históricos foi capaz de indicar o impacto de religadores em sistemas reais. Num futuro em que medidores e sensores devem ser ubíquos, variações da metodologia desenvolvida poderão ser base para ferramentas de análise para dados coletados *online*, além de ser possível sua aplicação a dados históricos para extração de diversas informações sobre o comportamento do sistema ao longo do tempo.
- Desenvolver um algoritmo analítico com uma nova estrutura e características únicas. Evidenciando as características de operação radial dos sistemas de distribuição, a reformulação do algoritmo de simulação trouxe grandes ganhos em tempo de execução, viabilizando estudos exaustivos, de otimização e estatísticos.
- Investigar métodos de alocação e realocação de religadores. Baseada no método de simulação e análise de falhas empregado no algoritmo de simulação analítica, a análise da alocação e realocação de dispositivos pôde ser executada em tempo factível, sem necessidade de simplificar o sistema. O método de amostragem de posições candidatas para estudos de alocação mostrou-se útil por permitir uma redução de posições redundantes ou mesmo condensar características principais do sistema com milhares de nós em algumas centenas de posições.

Estas contribuições permitem alcançar o objetivo inicial da análise da política de religamento automático em diferentes níveis para sistemas de grande porte, sem empregar métodos de simplificação clássicos como a redução a blocos chaveáveis. Com o emprego dos métodos apresentados no Apêndice B, no qual são investigados métodos de computação paralela e distribuída, mesmo os estudos mais longos são reduzidos a dezenas de minutos para sistemas de grande porte, enquanto

métodos clássicos requerem até mesmo dias para a análise de sistemas reduzidos que comumente se encontram removidos da realidade.

6.1 Ferramenta integrada

Um dos resultados do trabalho apresentado no decorrer dos capítulos anteriores é um protótipo de uma ferramenta interativa que implementa os métodos desenvolvidos para avaliação da política do uso de religadores integrando a análise das interrupções momentâneas e sustentadas:

Simulação analítica: Por ser a base de todos os métodos, a formulação aprimorada tornou viável explorar a alocação em sistemas de grande porte. Seu baixo custo computacional mesmo para sistemas de grande porte (ordem de décimos de segundo) permite que seja empregada para análises *online* durante o estudo e planejamento de sistemas.

Alocação por enumeração exaustiva: A posição ótima para alocação de um equipamento é possível em tempo viável (alguns minutos) em sistemas de grande porte. A alocação de mais equipamentos requer a redução do sistema ou amostragem de posições.

Alocação heurística incremental de religadores: Observou-se bons, às vezes mesmo ótimos, resultados para sistemas de grande porte e número baixo de religadores. Em sistemas de grande porte, o método, por ser uma aplicação repetida da alocação por enumeração, apresenta tempo de execução que pode chegar a dezenas de minutos se não forem realizadas reduções como a amostragem de posições candidatas.

Alocação por algoritmo genético: Apresenta bons resultados para sistemas de porte grande ou pequeno. Permite a análise da alocação de outros equipamentos além de religadores.

A ferramenta é apresentada através de uma interface gráfica que disponibiliza funções como importação e edição de dados das redes de distribuição, diferentes modos de visualização dos resultados, além da execução dos principais métodos de forma integrada e interativa.

6.2 Possíveis trabalhos futuros

Durante o desenvolvimento deste trabalho, tópicos relacionados mostrarem-se interessantes, no entanto sua importância não se mostrou suficiente para justificar sua investigação ou não foi possível investigá-los devido a restrições de tempo. Listam-se a seguir tópicos que se mostram promissores para possíveis trabalhos futuros.

Testes mais gerais e possível extensão dos métodos de alocação: O método de redução de espaço de busca mostrou-se eficiente para a amostragem de posições candidatas sem desprezar dados do sistema em estudo. Testes mais gerais de alocação empregando outros equipamentos além de religadores não foram explorados nesta tese. O potencial dos métodos de amostragem e alocação podem ser melhor investigados em situações de alocação mais gerais.

Equivalente chaveável para estudos de confiabilidade: Como não é possível manter as características de chaveamento ao aplicar reduções série e paralelo, é necessário desenvolver um método que permita condensar todas as informações de chaveamento do ponto de vista da fronteira do grupo de elementos que será representado por um equivalente. Conjectura-se que a coleta de informações extras durante a etapa de análise dos dispositivos de proteção (Seção 4.4.2) seja uma possível forma de obter tal equivalente.

Topologia dinâmica: Apesar de os métodos expostos neste trabalho poderem ser aplicados a redes com topologia dinâmica frente a um custo computacional extra, acredita-se que seja possível estendê-los para cenários com topologia dinâmica. Assim como a reutilização dos dados da DFS pode ser vista como análoga à etapa simbólica da fatoração matricial em métodos de esparsidade (Seção 4.4.4), a alteração de topologia é análoga aos métodos de refatoração parcial. Desta forma, acredita-se que seja possível reutilizar os conceitos dos métodos de esparsidade para concretizar um modelo mais eficiente da análise de confiabilidade em redes de distribuição com topologia dinâmica.

Tratamento de redes fracamente malhadas: A maioria das redes de distribuição é operada radialmente. Há, no entanto, redes que operam em anel às quais não pode-se aplicar diretamente os métodos desenvolvidos.

Referências

[1] R. E. Brown. *Electric Power Distribution Reliability, Second Edition*. Power Engineering (Willis). Taylor & Francis, 2008. ISBN: 9780849375682.

[2] N. Jenkins *et al. Embedded Generation*. 2000. URL: http://digital-library.theiet.org/content/books/rn/pbpo031e.

[3] Sang-Yun Yun e Jae-Chul Kim. "An evaluation method of voltage sag using a risk assessment model in power distribution systems". Em: *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 25.10 (2003), pp. 829–839. ISSN: 0142-0615. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/S0142-0615(03)00063-2.

[4] T. A. Short. *Electric power distribution: handbook*. The electric power engineering series / series editor Leo L. Grigsby. CRC Press, 2004. ISBN: 9780849317910.

[5] H.L. Willis. *Power Distribution Planning Reference Book, Second Edition*. Power Engineering (Willis). Taylor & Francis, 2004. ISBN: 9780824748753.

[6] C. M. Warren. "The effect of reducing momentary outages on distribution reliability indices". Em: *Power Delivery, IEEE Transactions on* 7.3 (1992), pp. 1610–1617. ISSN: 0885-8977. DOI: 10.1109/61.141881.

[7] M. H. Bollen. *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions*. IEEE - TP 139-0. Wiley, 2000. ISBN: 9780780347137.

[8] "IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices". Em: *IEEE Std 1366-2003 (Revision of IEEE Std 1366-1998)* (2004), pp. 1–50. DOI: 10.1109/IEEESTD.2004.94548.

[9] H. Markiewicz e A. Klajn. "Voltage Disturbances Standard EN 50160 - Voltage Characteristics in Public Distribution Systems". Em: ENY-ARTICLE-2008-194 (2004). Power Quality Application Guide, 5.4.2, (C) European Copper Institute, Wroclaw University of Technology and Copper Development Association., 16p.

[10] "IEEE Recommended Practice for Evaluating Electric Power System Compatibility With Electronic Process Equipment". Em: *IEEE Std 1346-1998* (1998). DOI: 10.1109/IEEESTD.1998.87816.

[11] "IEEE Guide for Service to Equipment Sensitive to Momentary Voltage Disturbances". Em: *IEEE Std 1250-1995* (2013), pp. 1–64. DOI: 10.1109/IEEESTD.2013.6471845.

[12] "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality". Em: *IEEE Std 1159-1995* (1995). DOI: 10.1109/IEEESTD.1995.79050.

[13] Agência Nacional de Energia Elétrica. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica*. 2011.

[14] T. A. Short. *Distribution Reliability and Power Quality*. Electrical engineering. Taylor & Francis, 2005. ISBN: 9781420036480.

[15] J. J. Burke e D. J. Lawre. "Characteristics of Fault Currents on Distribution Systems". Em: *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on* PAS-103.1 (jan. de 1984), pp. 1–6. ISSN: 0018-9510. DOI: 10.1109/TPAS.1984.318566.

[16] B. D. Coate e D. C. Wareham. "Decreasing momentary outages with specific distribution feeder improvements". Em: *Rural Electric Power Conference, 2000*. 2000, A2/1–A2/5. DOI: 10.1109/REPCON.2000.848035.

[17] J. C. Gomez *et al.* "Behavior of induction motor due to voltage sags and short interruptions". Em: *Power Delivery, IEEE Transactions on* 17.2 (2002), pp. 434–440. ISSN: 0885-8977. DOI: 10.1109/61.997914.

[18] *ITI (CBEMA) Curve Application Note*. 2000. URL: http://www.itic.org/technical/iticurv.pdf (acesso em 2005).

[19] "IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems". Em: *ANSI/IEEE Std 242-1986* (1986). DOI: 10.1109/IEEESTD.1986.81071.

[20] L.M. Anderson e K.B. Bowes. "The effects of power-line disturbances on consumer electronic equipment". Em: *Power Delivery, IEEE Transactions on* 5.2 (1990), pp. 1062–1065. ISSN: 0885-8977. DOI: 10.1109/61.53122.

[21] "IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems (Gold Book)". Em: *IEEE Std 493-1997 (IEEE Gold Book)* (1998), pp. 1–464. DOI: 10.1109/IEEESTD.1998.89291.

[22] Kristina Hamachi LaCommare e Joseph H. Eto. "Understanding the Cost of Power Interruptions to U.S. Electricity Consumers". Em: (nov. de 2004), p. 70.

[23] R. N. Billinton. *Reliability Evaluation of Power Systems*. Springer, 1996. ISBN: 9780306452598.

[24] J. Manson e R. Targosz. *European Power Quality Survey Report*. Rel. téc. Leonardo Energy, nov. de 2008.

[25] D. Lineweber, S. McNulty e Electric Power Research Institute. *The Cost of Power Disturbances to Industrial & Digital Economy Companies*. EPRI, 2001.

[26] Leora Lawton *et al. A Framework and Review of Customer Outage Costs: Integration and Analysis of Electric Utility Outage Cost Surveys*. Berkeley: LBNL, 2003. URL: http://emp.lbl.gov/sites/all/files/REPORT%20lbnl%20-%2054365.pdf.

[27] J. M. Clemmensen. "Estimating the cost of power quality". Em: *IEEE Spectrum* (jun. de 1993), pp. 40–41.

[28] M. J. Sullivan *et al.* "Interruption costs, customer satisfaction and expectations for service reliability". Em: *Power Systems, IEEE Transactions on* 11.2 (1996), pp. 989–995. ISSN: 0885-8950. DOI: 10.1109/59.496185.

[29] Michael J. Sullivan, Matthew G. Mercurio e Josh A. Schellenberg. *Estimated Value of Service Reliability for Electric Utility Customers in the United States*. Berkeley: LBNL, 2009. URL: http://emp.lbl.gov/sites/all/files/REPORT%20lbnl-2132e.pdf.

[30] C. A. Warren, R. Ammon e G. Welch. "A survey of distribution reliability measurement practices in the US". Em: *Power Delivery, IEEE Transactions on* 14.1 (1999), pp. 250–257. ISSN: 0885-8977. DOI: 10.1109/61.736733.

[31] C. A. Warren, D. J. Pearson e M. T. Sheehan. "A nationwide survey of recorded information used for calculating distribution reliability indices". Em: *Power Delivery, IEEE Transactions on* 18.2 (2003), pp. 449–453. ISSN: 0885-8977. DOI: 10.1109/TPWRD.2002.803693.

[32] J. D. Kueck. *Measurement Practices for Reliability and Power Quality*. Maio de 2005. DOI: 10.2172/885961. URL: http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/885961.

[33] United Energy Distribution. *2006 Electricity Distribution Price-Service Offering*. Out. de 2004.

[34] T. Short. *Power Quality Implications of Distribution Construction*. Rel. téc. EPRI, mar. de 2004.

[35] S. F. Tan e S. K. Salman. "Investigation into the implementation of auto reclosing scheme in distribution networks with high penetration of DGs". Em: *Universities Power Engineering Conference, 2008. UPEC 2008. 43rd International*. 2008, pp. 1–5. DOI: 10.1109/UPEC.2008.4651550.

[36] Jong-Fil Moon, Sang-Yun Yun e Jae-Chul Kim. "Quantitative Evaluation of the Impact of Repetitive Voltage Sags on Low-Voltage Loads". Em: *Power Delivery, IEEE Transactions on* 22.4 (2007), pp. 2395–2400. ISSN: 0885-8977. DOI: 10.1109/TPWRD.2007.905405.

[37] Jung-Hwan Oh *et al.* "Particular characteristics associated with temporary and permanent fault on the multi-shot reclosing scheme". Em: *Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. IEEE*. Vol. 1. 2000, 421–424 vol. 1. DOI: 10.1109/PESS.2000.867623.

[38] L. Johnston *et al.* "An Analysis of VEPCO'S 34.5 KV Distribution Feeder Faults as Related to Through Fault Failures of Substation Transformers". Em: *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on* PAS-97.5 (1978), pp. 1876–1884. ISSN: 0018-9510. DOI: 10.1109/TPAS.1978.354683.

[39] D. G. Laverick. "Performance of the Manweb Rural 11-kV Network During Lightning Activity". Em: *International Conference on Lightning and Power Systems*. Jun. de 1984.

[40] G. E. Littler. "High Speed Reclosing and Protection Techniques Applied to Wood Pole Lines". Em: *Elec. Eng. Trans.* Ed. por Inst. Eng. Aust. Vol. EE1. Jun. de 1965.

[41] R. E. Brown *et al.* "Distribution system reliability assessment: momentary interruptions and storms". Em: *Power Delivery, IEEE Transactions on* 12.4 (1997), pp. 1569–1575. ISSN: 0885-8977. DOI: 10.1109/61.634177.

[42] F. Soudi e K. Tomsovic. "Optimized distribution protection using binary programming". Em: *Power Delivery, IEEE Transactions on* 13.1 (1998), pp. 218–224. ISSN: 0885-8977. DOI: 10.1109/61.660881.

[43] F. Soudi e K. Tomsovic. "Optimal trade-offs in distribution protection design". Em: *Power Delivery, IEEE Transactions on* 16.2 (2001), pp. 292–296. ISSN: 0885-8977. DOI: 10.1109/61.915498.

[44] M. T. Bishop *et al.* "Considering momentary and sustained reliability indices in the design of distribution feeder overcurrent protection". Em: *Transmission and Distribution Conference, 1999 IEEE*. Vol. 1. 1999, 206–211 vol.1. DOI: 10.1109/TDC.1999.755342.

[45] M. T. Bishop, C. A. McCarthy e J. Josken. "Considering reliability in the selection of distribution system overcurrent protection devices". Em: *Rural Electric Power Conference, 2000*. 2000, A3/1–A3/5. DOI: 10.1109/REPCON.2000.848036.

[46] Prof. T. Ortmeyer. "Comunicação privada". 2011.

[47] Haijun Liu, Hari Singh e D. Walder. "New Triple-Single reclosers improve distribution reliability". Em: *Rural Electric Power Conference, 2001*. 2001, pp. D2/1–D2/6. DOI: 10.1109/REPCON.2001.949525.

[48] S.-Y. Yun *et al.* "Reliability evaluation of radial distribution system considering momentary interruptions". Em: *Power Engineering Society General Meeting, 2003, IEEE*. Vol. 1. 2003, p. 485. DOI: 10.1109/PES.2003.1267224.

[49] N. Balijepalli *et al.* "Distribution system reliability assessment due to lightning storms". Em: *Power Delivery, IEEE Transactions on* 20.3 (2005), pp. 2153–2159. ISSN: 0885-8977. DOI: 10.1109/TPWRD.2005.848724.

[50] D. P. Ross, L. A. A. Freeman e R. E. Brown. "Overcoming data problems in predictive reliability distribution modeling". Em: *Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2001 IEEE/PES*. Vol. 2. 2001, pp. 742–748. DOI: 10.1109/TDC.2001.971330.

[51] E. Zambon. "Otimização de índices de confiabilidade em redes de distribuição de energia elétrica". Diss. de mestrado. PPGI/UFES, 2006.

[52] Thomas H. Cormen *et al. Introduction to Algorithms*. 3rd. The MIT Press, 2009. ISBN: 0262033844, 9780262033848.

[53] A.J. Monticelli e Centro de Pesquisas de Energia Eletrica (Brasil). *Fluxo de carga em redes de energia eletrica*. E. Blucher, 1983.

[54] *Desktop 3rd Generation Intel Core Processor Family – volume 1*. Intel Corporation. Jun. de 2012.

[55] A. L. Morelato e A. Monticelli. "Heuristic search approach to distribution system restoration". Em: *Power Delivery, IEEE Transactions on* 4.4 (1989), pp. 2235–2241. ISSN: 0885-8977. DOI: 10.1109/61.35652.

[56] Yuan-Yih Hsu *et al.* "Distribution system service restoration using a heuristic search approach". Em: *Power Delivery, IEEE Transactions on* 7.2 (1992), pp. 734–740. ISSN: 0885-8977. DOI: 10.1109/61.127075.

[57] S. Curcic, C. S. Ozveren e K. L. Lo. "Computer-based strategy for the restoration problem in electric power distribution systems". Em: *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-* 144.5 (1997), pp. 389–398. ISSN: 1350-2360. DOI: 10.1049/ip-gtd:19971355.

[58] K. N. Miu *et al.* "Fast service restoration for large-scale distribution systems with priority customers and constraints". Em: *Power Systems, IEEE Transactions on* 13.3 (1998), pp. 789–795. ISSN: 0885-8950. DOI: 10.1109/59.708643.

[59] I. H. Lim *et al.* "Distributed Restoration system applying Multi-Agent in distribution automation system". Em: *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE*. 2008, pp. 1–7. DOI: 10.1109/PES.2008.4596084.

[60] Timothy A. Davis e Ekanathan Palamadai Natarajan. "Algorithm 907: KLU, A Direct Sparse Solver for Circuit Simulation Problems". Em: *ACM Trans. Math. Softw.* 37.3 (set. de 2010), 36:1–36:17. ISSN: 0098-3500. DOI: 10.1145/1824801.1824814.

[61] Xiaoye S. Li. "An overview of SuperLU: Algorithms, implementation, and user interface". Em: *ACM Trans. Math. Softw.* 31.3 (set. de 2005), pp. 302–325. ISSN: 0098-3500. DOI: 10.1145/1089014.1089017.

[62] Yanqing Chen *et al.* "Algorithm 887: CHOLMOD, Supernodal Sparse Cholesky Factorization and Update/Downdate". Em: *ACM Trans. Math. Softw.* 35.3 (out. de 2008), 22:1–22:14. ISSN: 0098-3500. DOI: 10.1145/1391989.1391995.

[63] K. Y. Lee e M. A. El-Sharkawi. *Modern Heuristic Optimization Techniques: Theory and Applications to Power Systems*. IEEE Press Series on Power Engineering. Wiley, 2008. ISBN: 9780470225851.

[64] R. Billinton e S. Jonnavithula. "Optimal switching device placement in radial distribution systems". Em: *Power Delivery, IEEE Transactions on* 11.3 (1996), pp. 1646–1651. ISSN: 0885-8977. DOI: 10.1109/61.517529.

[65] A. Moradi, M. Fotuhi-Firuzabad e M. Rashidi-Nejad. "A Reliability Cost/Worth Approach to Determine Optimum Switching Placement in Distribution Systems". Em: *Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, 2005 IEEE/PES*. 2005, pp. 1–5. DOI: 10.1109/TDC.2005.1547169.

[66] V. C. Zamborlini *et al.* "Otimização da alocação de religadores em larga escala". Em: *II CBEE - Congresso Brasileiro de Eficiência Energética*. 2007.

[67] Wiwat Tippachon e Dulpichet Rerkpreedapong. "Multiobjective optimal placement of switches and protective devices in electric power distribution systems using ant colony optimization". Em: *Electric Power Systems Research* 79.7 (2009), pp. 1171–1178. ISSN: 0378-7796. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2009.02.006.

[68] Lingfeng Wang e C. Singh. "Reliability-Constrained Optimum Placement of Reclosers and Distributed Generators in Distribution Networks Using an Ant Colony System Algorithm". Em: *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on* 38.6 (2008), pp. 757–764. ISSN: 1094-6977. DOI: 10.1109/TSMCC.2008.2001573.

[69] H. Falaghi, M. Haghifam e C. Singh. "Ant Colony Optimization-Based Method for Placement of Sectionalizing Switches in Distribution Networks Using a Fuzzy Multiobjective Approach". Em: *Power Delivery, IEEE Transactions on* 24.1 (2009), pp. 268–276. ISSN: 0885-8977. DOI: 10.1109/TPWRD.2008.2005656.

[70] Gregory Levitin, Shmuel Mazal-Tov e David Elmakis. "Optimal sectionalizer allocation in electric distribution systems by genetic algorithm". Em: *Electric Power Systems Research* 31.2 (1994), pp. 97–102. ISSN: 0378-7796. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/0378-7796(94)90086-8.

[71] H. H. Dezaki *et al.* "Optimized Switch Allocation to Improve the Restoration Energy in Distribution Systems". Em: *Journal of Electrical Engineering* 63.1 (jan. de 2012).

[72] L. G. W. da Silva, R. A. F. Pereira e J. R. S. Mantovani. "Optimized allocation of sectionalizing switches and control and protection devices for reliability indices improvement in distribution systems". Em: *Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2004 IEEE/PES*. 2004, pp. 51–56. DOI: 10.1109/TDC.2004.1432350.

[73] Zhang Li, Xu Yuqin e Wang ZengPing. "Research on optimization of recloser placement of DG-enhanced distribution networks". Em: *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2008. DRPT 2008. Third International Conference on*. 2008, pp. 2592–2597. DOI: 10.1109/DRPT.2008.4523848.

[74] A. H. Hashim *et al.* "Determination of Auto-Recloser Location Using Cost Analysis in the Sabah Electricity Distribution Network". Em: *Power and Energy Conference, 2006. PECon '06. IEEE International*. 2006, pp. 587–590. DOI: 10.1109/PECON.2006.346719.

[75] OpenMP Architecture Review Board. *OpenMP Application Program Interface Version 2.0*. Mar. de 2002. URL: http://www.openmp.org/mp-documents/cspec20.pdf.

[76] Barbara Chapman, Gabriele Jost e Ruud van der Pas. *Using OpenMP: Portable Shared Memory Parallel Programming (Scientific and Engineering Computation)*. The MIT Press, 2007. ISBN: 0262533022, 9780262533027.

[77] Khronos Group. *The OpenCL Specification Version 1.1*. Set. de 2010.

[78] *Beanstalk*. URL: http://kr.github.io/beanstalkd/.

[79] GNU Project. *GCC, the GNU Compiler Collection*. Free Software Foundation. URL: http://www.gnu.org/software/gcc/gcc.html.

[80] *clang: a C language family frontend for LLVM*. URL: http://clang.llvm.org/.

[81] ISO. *ISO/IEC 14882:2011 Information technology — Programming languages — C++*. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 28 de fev. de 2012, 1338 (est.) URL: http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=50372.

[82] NVIDIA Corporation. *NVIDIA CUDA Programming Guide 2.0*. 2008.

[83] Khronos Group. *The OpenCL Specification Version 2.0*. Nov. de 2013.

[84] Chris Lattner e Vikram Adve. "LLVM: A Compilation Framework for Lifelong Program Analysis & Transformation". Em: *Proceedings of the 2004 International Symposium on Code Generation and Optimization (CGO'04)*. Palo Alto, California, mar. de 2004.

[85] K. Rupp, F. Rudolf e J. Weinbub. "ViennaCL - A High Level Linear Algebra Library for GPUs and Multi-Core CPUs". Em: *Intl. Workshop on GPUs and Scientific Applications*. 2010, pp. 51–56.

[86] *Cygwin: Linux-like environment for Windows making it possible to port software running on POSIX systems to Windows*. URL: http://cygwin.org/.

[87] *Gearman*. URL: http://gearman.org/.

[88] *Celery: Distributed Task Queue*. URL: http://www.celeryproject.org/.

[89] Marc Snir *et al. MPI-The Complete Reference, Volume 1: The MPI Core*. 2nd. (Revised). Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1998. ISBN: 0262692155.

[90] *Boost Serialization*. URL: ttp://www.boost.org/doc/libs/1_55_0/libs/serialization/doc/index.html.

[91] Microsoft Corporation. *Visual Studio 2008*. Nov. de 2007.

[92] *The boost graph library: user guide and reference manual*. Boston, MA, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 2002. ISBN: 0-201-72914-8.

[93] J. Maurer e S. Watanabe. *Boost.Random*. Out. de 2013. URL: http://www.boost.org/doc/libs/1_55_0/doc/html/boost_random.html.

[94] Makoto Matsumoto e Takuji Nishimura. "Mersenne Twister: A 623-dimensionally Equidistributed Uniform Pseudo-random Number Generator". Em: *ACM Trans. Model. Comput. Simul.* 8.1 (jan. de 1998), pp. 3–30. ISSN: 1049-3301. DOI: 10.1145/272991.272995.

[95] J. D. Hunter. "Matplotlib: A 2D graphics environment". Em: *Computing In Science & Engineering* 9.3 (2007), pp. 90–95.

[96] Andreas Klöckner *et al.* "PyCUDA and PyOpenCL: A Scripting-Based Approach to GPU Run-Time Code Generation". Em: *Parallel Computing* 38.3 (2012), pp. 157–174. ISSN: 0167-8191. DOI: 10.1016/j.parco.2011.09.001.

Apêndice A

Exemplo: impacto do uso de religadores automáticos nos índices de confiabilidade e qualidade de energia

Neste apêndice, para ilustrar concretamente características principais do problema explorado nesta tese, são realizados estudos em uma rede reduzida que apresenta características típicas de uma rede de distribuição, permitindo obter observações gerais sobre a influência de equipamentos religadores nos índices de confiabilidade e qualidade de energia elétrica em sistemas de distribuição. É apresentado um estudo simplificado sobre os impactos do uso de religadores nos seguintes índices de confiabilidade e qualidade de energia para didaticamente ilustrar a motivação para os desenvolvimentos almejados nesta tese[1]:

- SAIDI: representa a duração média das interrupções sustentadas;
- SAIFI: representa a frequência média das interrupções sustentadas;
- MAIFI: representa a frequência média das interrupções momentâneas.

Adicionalmente, o impacto da localização dos religadores em tais índices é investigado, incluindo uma análise de sensibilidade de diversos parâmetros. Deve-se ressaltar que fatores econômicos como os custos monetários associados a interrupções momentâneas e sustentadas não são contemplados na análise uma vez que os mesmos são específicos de cada rede elétrica. O objetivo principal é mostrar que o uso de religadores tem um impacto significativo tanto nos índices de confiabilidade quanto nos de qualidade de energia e que tais impactos são conflitantes.

A.1 Rede teste

A rede selecionada para o estudo preliminar consiste de um sistema de distribuição urbano, no qual o alimentador principal está dividido uniformemente em 32 seções, como mostra a Figura A.1.

[1] A definição formal destes índices é apresentada e discutida no Capítulo 2.

Além disso, um ramo lateral está conectado ao fim de cada seção (ou seja, 32 ramos laterais no total). Como será mostrado a seguir, os estudos podem incluir a presença de uma fonte de energia (subestação) alternativa e as seções do alimentador principal podem ser seccionáveis. A fonte alternativa permite restauração do fornecimento de energia para consumidores a jusante da falta e a presença de seccionadoras no alimentador principal permite restauração do serviço aos consumidores a montante da falta. O disjuntor da subestação não é considerado um religador no contexto de sistemas de proteção, embora tipicamente tenha capacidade de religamento automático. Portanto, não há religadores no sistema teste original. Os parâmetros necessários para os estudos de confiabilidade e de qualidade de energia associados a esta rede são apresentados na Tabela A.1([6]). Os parâmetros são reproduzidos diretamente de [6] e, mesmo que não representem dados reais, são suficientes para observar o comportamento dos índices.

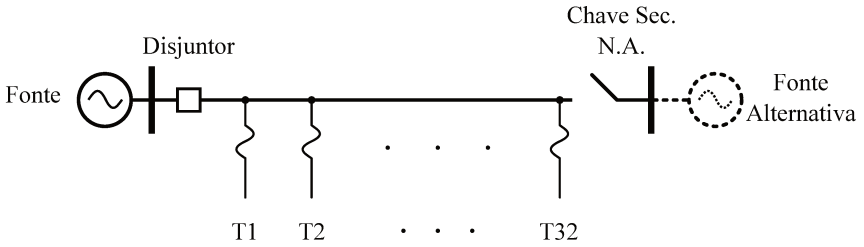

Figura A.1: Configuração de um alimentador urbano simplificado.

Tabela A.1: Parâmetros do alimentador em estudo.

	Taxa de falha permanente (faltas/ km/ano)	Taxa de falha temporária (faltas/ km/ano)	Consumidores	Comprimento (km)	Tempo de chaveamento (h)	Tempo de reparo (h)
Seções do alimentador (1 até 32)	0,1	0,3	25	0,25	0,5	1,5
Ramos laterais (1 até 32)	0,25	0,75	80	0,75	–	3

Inicialmente, três índices de qualidade de energia e confiabilidade (SAIDI, SAIFI e MAIFI) são calculados para quatro configurações:

(A) Sem a fonte alternativa de energia e sem seccionamento ao longo do alimentador;

(B) Sem a fonte alternativa de energia e com seccionamento ao longo do alimentador;

(C) Com a fonte alternativa de energia e sem seccionamento ao longo do alimentador;

(D) Com a fonte alternativa de energia e com seccionamento ao longo do alimentador.

Os resultados obtidos para o sistema da Figura A.1 sem a presença de religadores são mostrados na Tabela A.2. A tabela mostra, como esperado, que o caso com a subestação alternativa e o

seccionamento do alimentador principal resulta em valores mais baixos dos índices SAIDI e SAIFI e valores moderados do MAIFI. Assim, a configuração (D) será utilizada nas seções seguintes como o caso base.

Tabela A.2: Valores dos principais índices de confiabilidade para diferentes configurações do sistema teste.

Configuração	SAIDI (horas/ano)	SAIFI (interrupções/ano)	MAIFI (interrupções/ano)
(A)	1,63	3,77	0,00
(B)	1,24	3,38	0,39
(C)	1,43	3,77	0,00
(D)	1,05	3,38	0,39

A.2 Impacto do número de religadores

O objetivo desta subseção é avaliar o impacto da presença de religadores do sistema da Figura A.1 considerando a presença da subestação alternativa e do seccionamento do alimentador principal (i.e., configuração (D)).

A.2.1 Um religador

Um religador é instalado no meio do alimentador principal, ou seja, antes do 16º ramo lateral, como mostrado na Figura A.2. Com isso, os índices de confiabilidade SAIDI, SAIFI e MAIFI com a inclusão do religador são recalculados e os respectivos valores são mostrados na Tabela A.3.

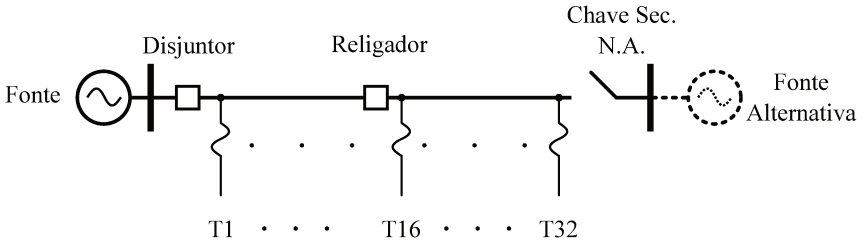

Figura A.2: Caso base após a instalação de um religador.

Tabela A.3: Valores dos índices de confiabilidade após a inclusão de um religador no meio do alimentador principal do sistema teste.

Número de Religadores	SAIDI (horas/ano)	SAIFI (interrupções/ano)	MAIFI (interrupções/ano)
0	1,05	3,38	0,39
1	0,94	1,97	6,72

Como esperado, os valores dos índices relacionados com interrupções sustentadas (SAIDI e SAIFI) são reduzidos na presença do religador. Por outro lado, qualquer falta que ocorra na

segunda metade do alimentador principal irá resultar em interrupções momentâneas para todos os consumidores a jusante do religador. Isto pode ser observado na Tabela A.3, na qual o valor do MAIFI aumentou de 0,39 para 6,72 interrupções momentâneas por ano.

A.2.2 Dois religadores

Neste caso, dois religadores são adicionados ao caso base; um instalado após 1/3 e outro após 2/3 do alimentador principal em relação à subestação principal, como mostra a Figura A.3. Os resultados associados a essa configuração são mostrados na Tabela A.4. Na presença de dois religadores, o número de interrupções sustentadas e, portanto, os índices SAIDI e SAIFI são reduzidos ainda mais. Entretanto, o número de interrupções momentâneas aumenta ainda mais, uma vez que um maior número de consumidores está exposto a interrupções momentâneas.

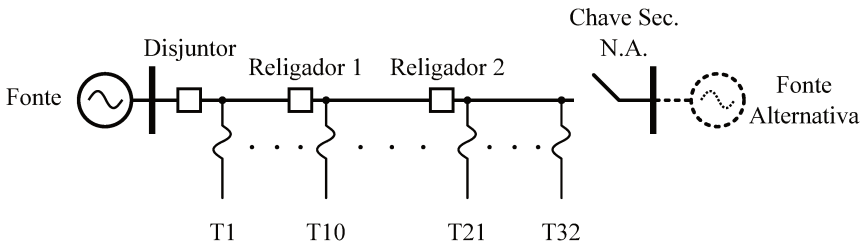

Figura A.3: Caso base após a instalação de dois religadores.

Tabela A.4: Valores dos índices de confiabilidade após a inclusão de um religador no meio do alimentador principal do sistema teste.

Número de Religadores	SAIDI (horas/ano)	SAIFI (interrupções/ano)	MAIFI (interrupções/ano)
0	1,05	3,38	0,39
1	0,94	1,97	6,72
2	0,90	1,44	9,38

A.2.3 Três e quatro religadores

Seguindo a mesma abordagem anterior para o posicionamento do religador, isto é, divisão do alimentador de maneira uniforme entre os religadores, três e quatro religadores foram consecutivamente adicionados ao caso base e os índices correspondentes foram recalculados. Como pode ser observado na Tabela A.5, cujos dados foram utilizados para confeccionar as Figuras A.4 a A.6, o efeito da inclusão de mais religadores é muito pequeno, mas a tendência é mantida, isto é, o uso (adição) de religadores tem um impacto positivo sobre os índices de confiabilidade (SAIDI e SAIFI) e um impacto negativo sobre o índice de qualidade de energia MAIFI. Os três índices avaliados apresentam pouca variação conforme o número de religadores ultrapassa dois.

Tabela A.5: Valores dos índices de confiabilidade após a inclusão de três e quatro religadores no alimentador principal do sistema teste.

Número de Religadores	SAIDI (horas/ano)	SAIFI (interrupções/ano)	MAIFI (interrupções/ano)
0	1,05	3,38	0,39
1	0,94	1,97	6,72
2	0,90	1,44	9,38
3	0,88	1,26	9,88
4	0,86	1,09	10,86

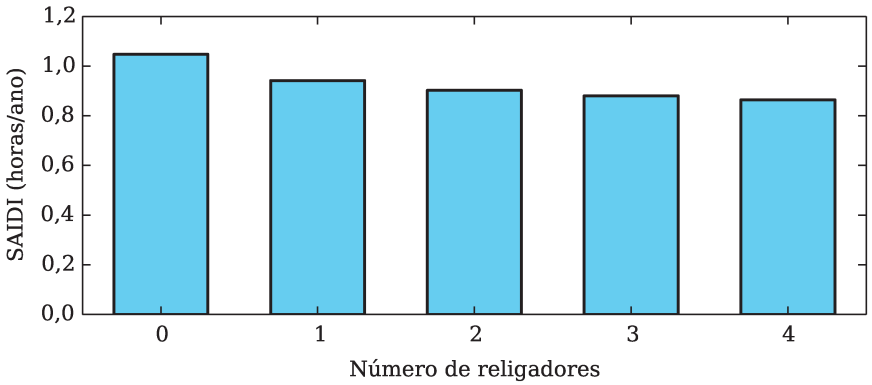

Figura A.4: Impacto do número de religadores no SAIDI.

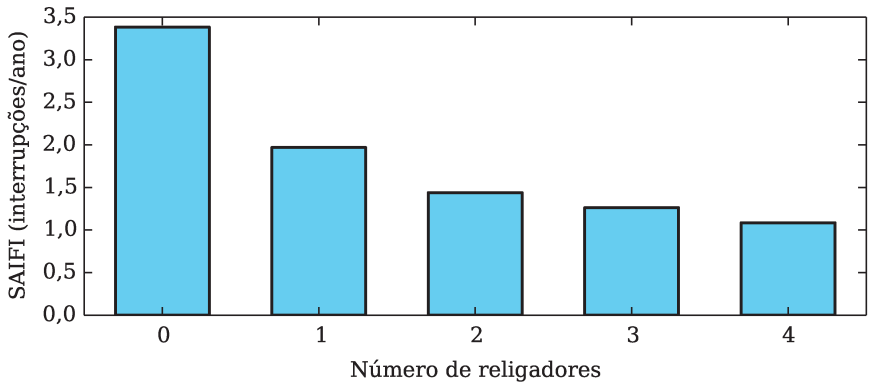

Figura A.5: Impacto do número de religadores no SAIFI.

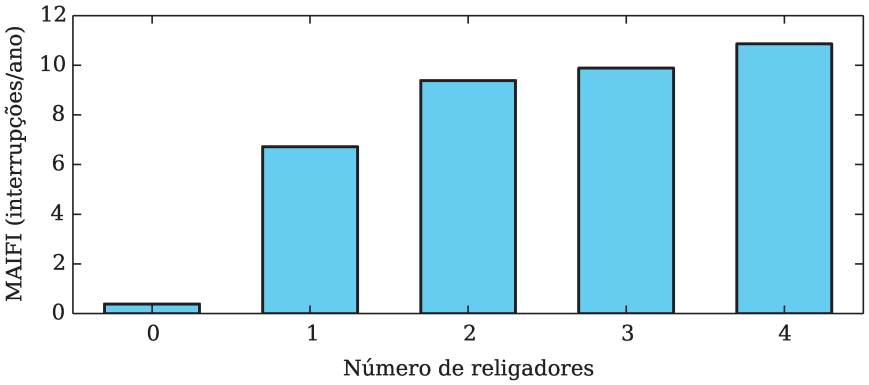

Figura A.6: Impacto do número de religadores no MAIFI.

A.3 Impacto do local de instalação do religador

Como mostrado na subseção anterior, a adoção de mais de dois religadores tipicamente não melhora de forma significativa os índices de confiabilidade (SAIDI e SAIFI) neste sistema teste para justificar o custo da instalação e, além disso, tem um impacto negativo no índice de qualidade de energia (MAIFI). Portanto, nesta subseção, o impacto do local de instalação do religador é avaliado.

A.3.1 Um religador

Os índices SAIDI, SAIFI e MAIFI foram calculados para diferentes posições de um único religador no sistema teste. O religador é instalado em 31 posições entre a subestação principal e o último ramo lateral. Os resultados são mostrados nas Figuras A.7 a A.9. Nessas figuras, a linha tracejada representa o valor do índice correspondente para o caso sem religadores. Além disso, a posição "0" no eixo horizontal da figura representa o ponto de instalação mais próximo da subestação principal e "30" o ponto mais afastado.

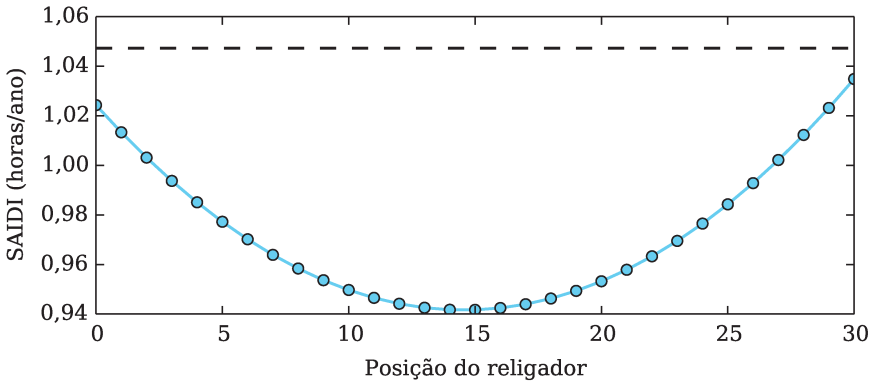

Figura A.7: Impacto da posição de um religador no índice SAIDI.

Com o objetivo de avaliar a solução que tenta minimizar simultaneamente os índices SAIDI, SAIFI e MAIFI, as curvas mostradas nas Figuras A.7 a A.9 foram normalizadas de tal maneira que os valores dos índices nessas figuras ficassem entre 0 e 1. Em seguida, a soma dessas curvas normalizadas é obtida e o resultado é mostrado na Figura A.10. O ponto de mínimo é obtido para a posição 15 e a curva segue o mesmo comportamento da curva SAIDI na Figura A.7. Para certificar-se de que os valores não são dominados pelo índice SAIDI, outra curva, mostrada na Figura A.11, foi criada incluindo a soma normalizada somente das curvas MAIFI e SAIFI. O comportamento das curvas mostradas nas Figuras A.10 e A.11 são muito semelhantes (apesar das escalas diferentes), e o mínimo é obtido para a mesma posição (15).

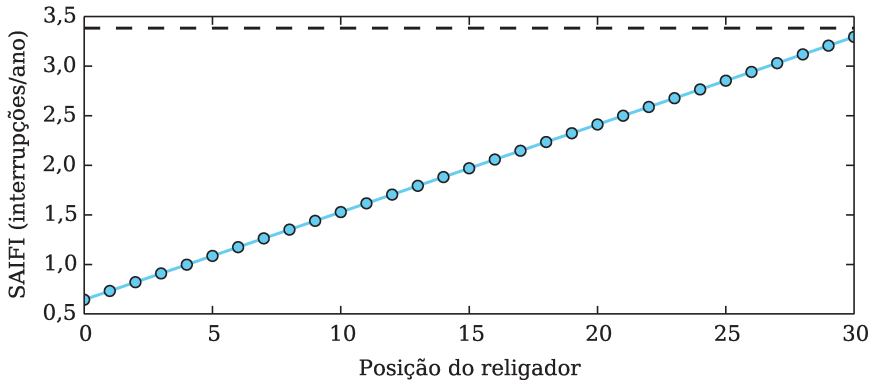

Figura A.8: Impacto da posição de um religador no índice SAIFI.

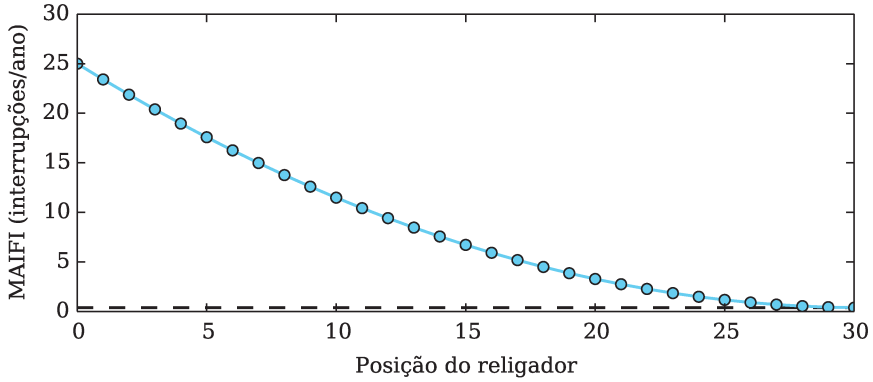

Figura A.9: Impacto da posição de um religador no índice MAIFI.

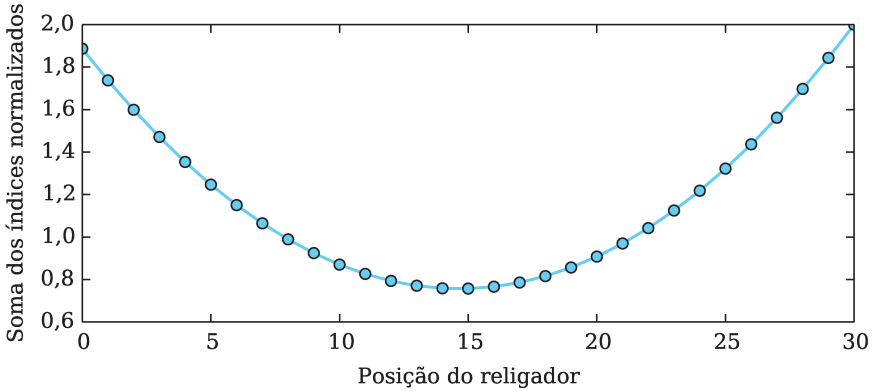

Figura A.10: Soma dos três índices (SAIDI, SAIFI e MAIFI) após normalização.

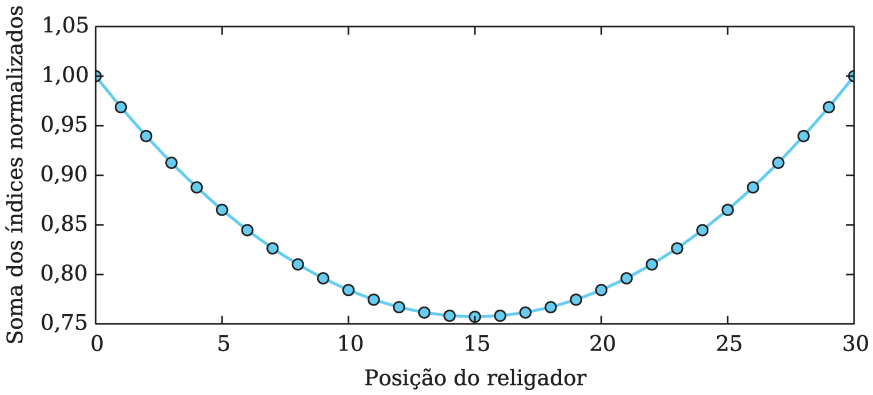

Figura A.11: Soma dos índices SAIFI e MAIFI após normalização.

A.3.2 Dois religadores

Neste caso, um segundo religador é adicionado, porém sempre em posição distante do primeiro religador. Em seguida, os índices são calculados para todas as posições possíveis. Os resultados são mostrados nas Figuras A.12 a A.14. Como pode ser observado na Figura A.13, quanto mais próximo da subestação (posição "0") os dois religadores estiverem, mais baixo é o valor do índice SAIFI. Este comportamento é exatamente oposto ao do índice MAIFI (Figura A.14), confirmando mais uma vez a relação conflitante entre tais índices e, consequentemente, entre confiabilidade e qualidade de energia.

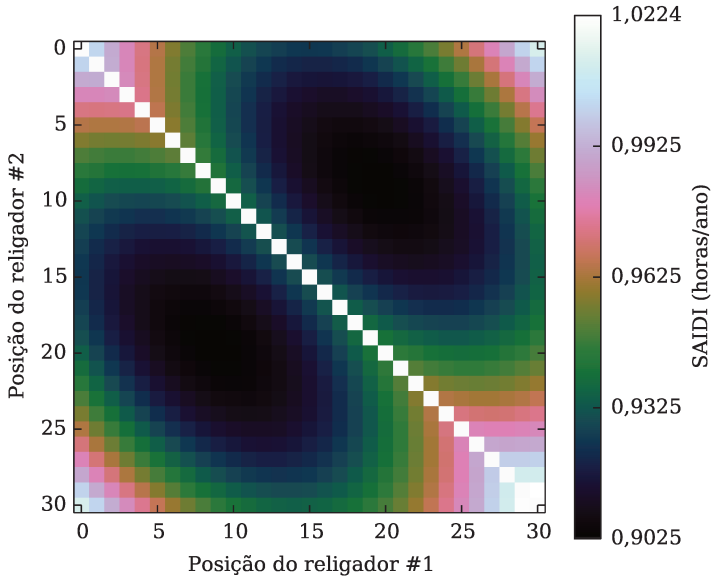

Figura A.12: Valores do SAIDI para diferentes posições dos dois religadores.

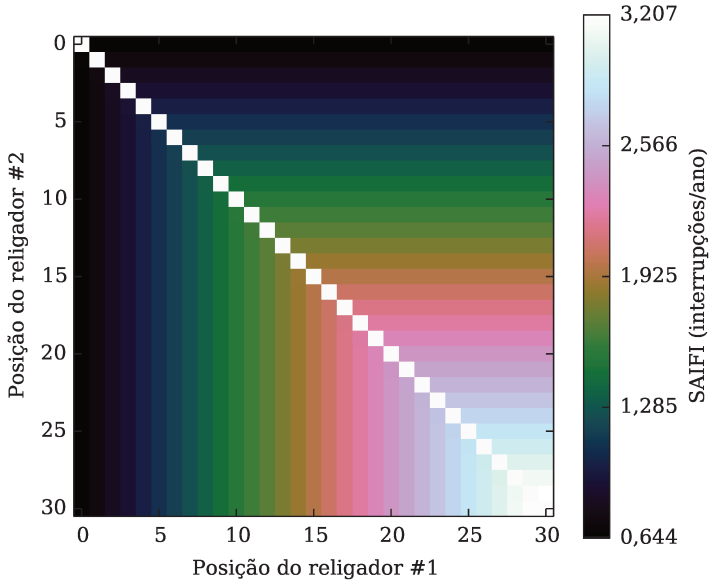

Figura A.13: Valores do SAIFI para diferentes posições dos dois religadores.

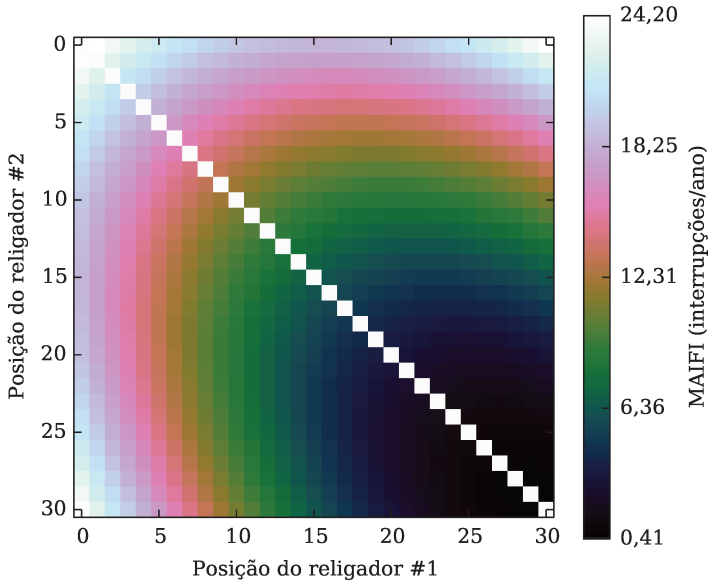

Figura A.14: Valores do MAIFI para diferentes posições dos dois religadores.

Seguindo o mesmo procedimento de normalização realizado na subseção anterior, o gráfico para a soma normalizada dos três índices para cada combinação das posições dos religadores é obtido e mostrado na Figura A.15. O valor mínimo da soma é obtido quando um religador está na posição “9” e outro na posição “20”, cujas coordanadas equivalentes estão marcadas por pontos

na Figura A.15. Novamente, também foi confeccionada uma versão excluindo da soma o SAIDI, resultando na Figura A.16.

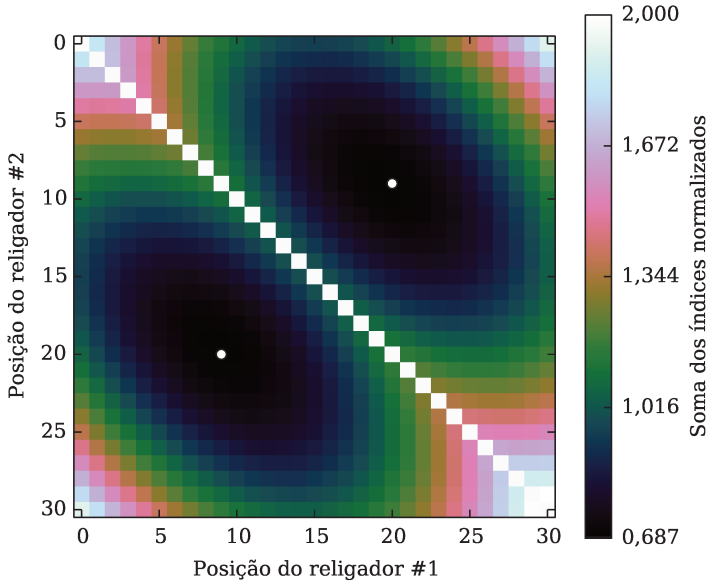

Figura A.15: Soma dos três índices após normalização.

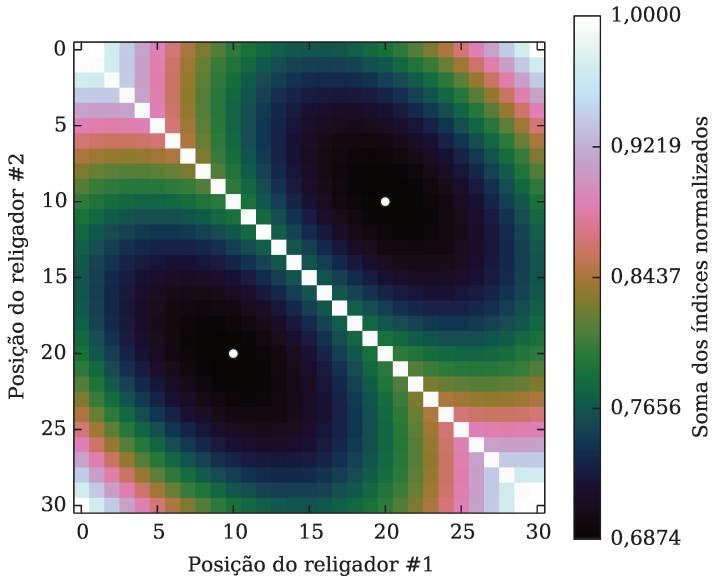

Figura A.16: Soma dos índices SAIFI e MAIFI após normalização.

A.3.3 Análise de sensibilidade

Para explorar o comportamento dos índices de confiabilidade para diferentes conjuntos de dados para um mesmo sistema, foi realizada uma análise de sensibilidade dos diferentes parâmetros da simulação analítica, como taxas de falhas e tempos de chaveamento, repetindo-se o estudo de posicionamento de um religador para cada parâmetro modificado de forma independente. Esta análise pode ajudar na interpretação dos resultados da análise da confiabilidade de um sistema com dados de falha e chaveamento incertos, como para sistemas sem registro de dados históricos disponíveis. Com exceção da distribuição dos consumidores, o procedimento para análise de sensibilidade consiste em ajustar o valor do parâmetro em questão por 75% e 125%, repetindo o estudo de posicionamento de um único religador para diferentes posições no alimentador.

Taxas de falha temporária: O impacto das taxas de falha temporária no SAIFI e no MAIFI é mostrado nas Figuras A.17 e A.18, respectivamente. Não há impacto no SAIDI. Para o SAIFI, observa-se que quanto maior a taxa de falha temporária, maior é o valor do índice, com diferença acentuada nas últimas posições. O MAIFI também aumenta com o aumento da taxa de falha temporária, no entanto as diferenças são acentuadas nas posições opostas àquelas do SAIFI. O comportamento dos dois índices ilustra novamente o conflito entre a otimização da confiabilidade e da qualidade de energia.

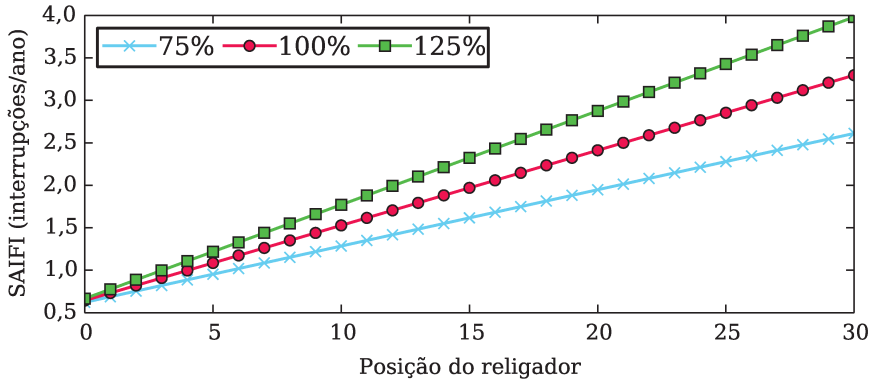

Figura A.17: Sensibilidade de SAIFI em função da taxa de falha temporária.

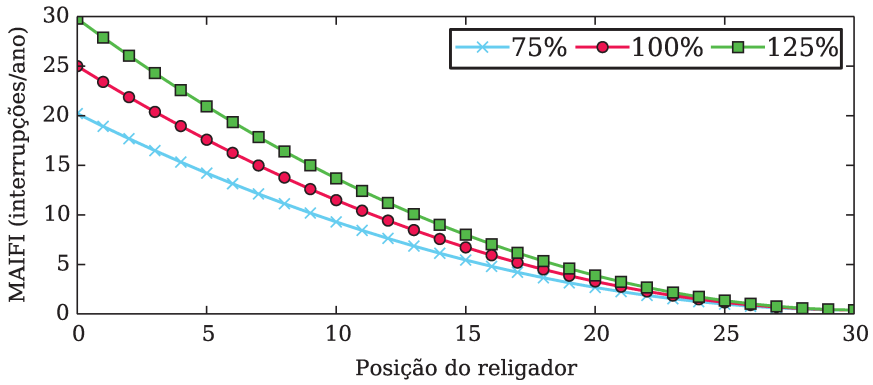

Figura A.18: Sensibilidade de MAIFI em função da taxa de falha temporária.

Taxas de falha permanente: O impacto do valor da taxa de falha permanente no SAIDI, no SAIFI e no MAIFI é mostrado nas Figuras A.19, A.20 e A.21, respectivamente. Para SAIDI e SAIFI, a curva é deslocada verticalmente, ao passo que maior o valor da taxa de falha permanente, maior o valor do índice. Já o impacto no MAIFI é menor, acentuado nas primeiras posições.

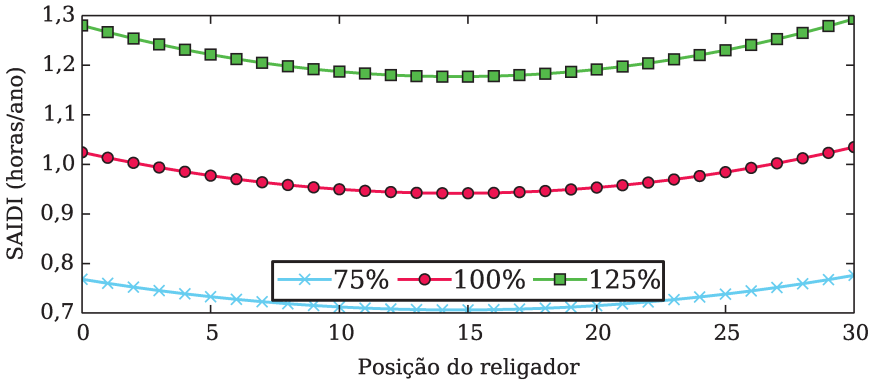

Figura A.19: Sensibilidade de SAIDI em função da taxa de falha permanente.

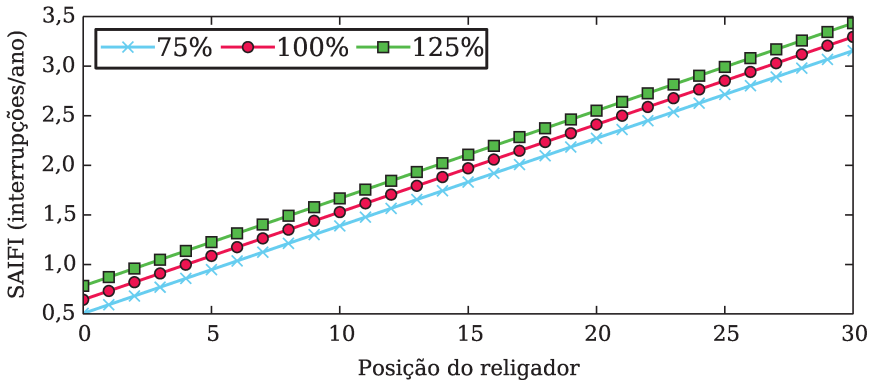

Figura A.20: Sensibilidade de SAIFI em função da taxa de falha permanente.

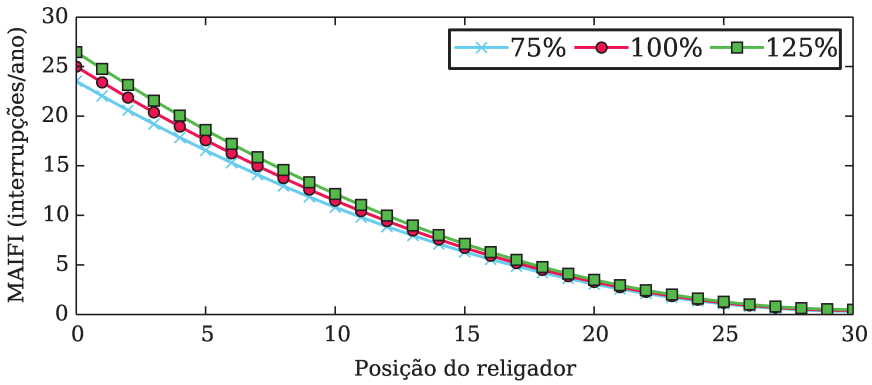

Figura A.21: Sensibilidade de MAIFI em função da taxa de falha permanente.

Tempo de chaveamento: Há impacto apenas no SAIDI, mostrado na Figura A.22. A curva é deslocada verticalmente. Quanto maior o tempo de chaveamento, maior o SAIDI.

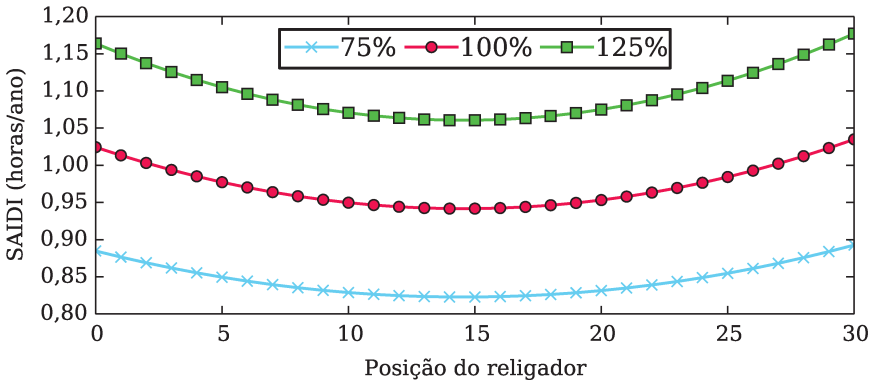

Figura A.22: Sensibilidade de SAIDI em função do tempo de chaveamento.

Tempo de reparo: Novamente há impacto apenas no SAIDI, mostrado Figura A.23. A curva é deslocada verticalmente. Quanto maior o tempo de reparo, maior o SAIDI.

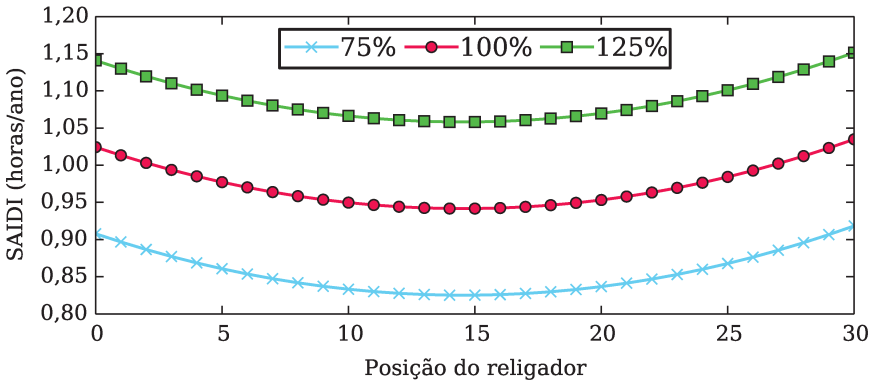

Figura A.23: Sensibilidade de SAIDI em função do tempo de reparo.

Distribuição dos consumidores ao longo do sistema: Além da distribuição uniforme dos consumidores no sistema base, foram criadas uma variação crescente e sua complementar decrescente. Na distribuição crescente, o número de consumidores por ponto de carga aumenta ao longo do alimentador de forma linear, enquanto na decrescente o número diminui. Em ambos os casos, o total de consumidores é mantido igual ao caso base. Os resultados são mostrados nas Figuras A.24, A.25 e A.26.

Para SAIDI, em termos gerais, observa-se que as curvas são deslocadas, implicando que independente da posição do religador, SAIDI será pior com consumidores concentrados mais longe da subestação, com o contrário válido para consumidores mais próximos. Com a distribuição crescente, nota-se que o índice apresentou valores com desvio pequeno em torno de 1,08 horas (65 minutos) por ano, enquanto as outras distribuições resultam em valores com maior

amplitude entre si. O mínimo de cada curva é deslocado para uma posição mais próxima da subestação na distribuição decrescente, e mais longe da subestação na distribuição crescente. Os valores do SAIFI e do MAIFI são menores para a distribuição decrescente e maiores para a crescente. No caso do SAIFI, nota-se que a diferença é minimizada caso a posição do religador seja central.

De forma geral, para os três índices, a distribuição decrescente, com os consumidores mais próximos da subestação, mostrou-se melhor, apresentando valores menores para os índices. O comportamento geral dos índices de acordo com a posição apresenta características comuns para as diferentes distribuições, com o conflito entre MAIFI e SAIFI sempre presente.

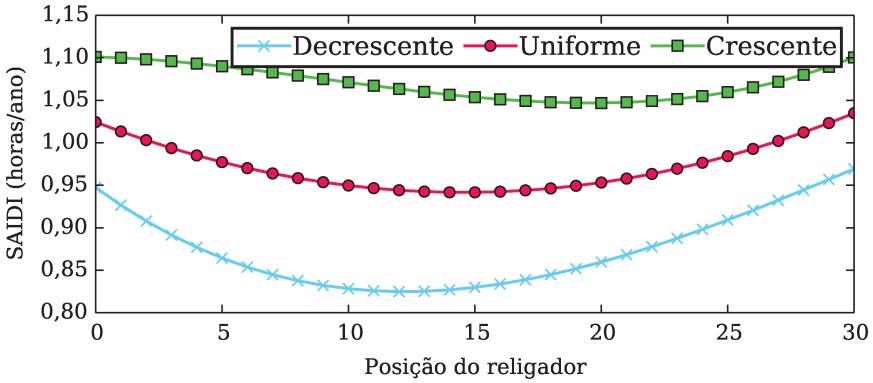

Figura A.24: Sensibilidade de SAIDI em função da distribuição dos consumidores.

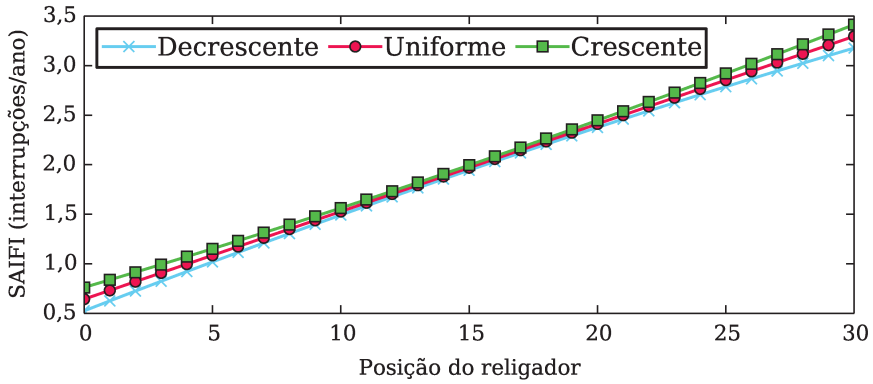

Figura A.25: Sensibilidade de SAIFI em função da distribuição dos consumidores.

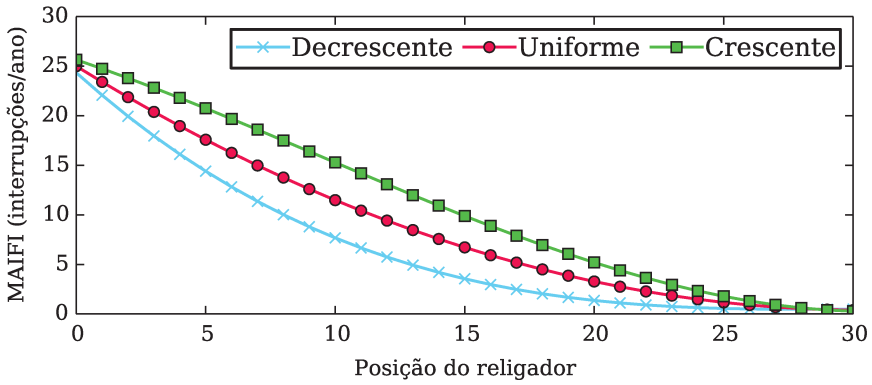

Figura A.26: Sensibilidade de MAIFI em função da distribuição dos consumidores.

A.4 Comentários

Apresentou-se um estudo preliminar sobre o impacto do religamento automático tanto na qualidade de energia quanto na confiabilidade em um alimentador urbano. No contexto deste alimentador simplificado, os resultados revelaram as seguintes conclusões:

- A presença de mais de dois religadores no alimentador não melhora significativamente os índices de confiabilidade de tal forma que justifique os custos extras dos religadores. Além disso, quanto maior o número de religadores, mais difícil é para manter a coordenação da proteção do alimentador.
- As frequências das interrupções momentâneas e sustentadas são inversamente relacionadas, ou seja, quando uma aumenta, a outra diminui. Com isto, os índices de confiabilidade e os de qualidade de energia não podem ser simultaneamente minimizados na presença de religadores, e, portanto, uma solução de compromisso interrupções momentâneas e sustentadas deve ser encontrada (uma solução ótima de Pareto deve ser obtida).
- Para este alimentador, as principais características do conflito entre as interrupções momentâneas e sustentadas estão presentes para as diversas variações apresentadas através do estudo de sensibilidade.

Estas conclusões compõem o contexto no qual são desenvolvidos os capítulos desta tese e representam os principais motivadores para a realização do trabalho.

Apêndice B

Métodos paralelos para sistemas de grande porte

Neste trabalho, considera-se como de grande porte um sistema da ordem de milhares a dezenas de milhares de nós, isto é, não são realizadas simplificações ou equivalentes para as análises. Apesar de a formulação aprimorada do algoritmo de simulação analítica apresentar bom desempenho, análises empregando estudos de alocação podem alcançar um tempo de execução maior que o desejado. Apesar das melhorias de tempo computacional do método de simulação analítica, a aplicação dos métodos apresentados neste trabalho a todos os alimentadores de uma concessionária torna-se inviável, requerendo dias ou mesmo semanas de simulação, caso se utilize apenas uma implementação serial. Mesmo se a aplicação seja reduzida a apenas um alimentador, o uso de técnicas de paralelização permite estudos mais diversos e detalhados, além de aumentar a produtividade do usuário.

Os testes deste trabalho utilizaram sistemas de pequeno e grande porte para ilustrar a aplicação dos métodos empregando implementações tanto seriais quanto paralelas. Neste apêndice apresentam-se a experiência e os resultados da implementação paralela e distribuída dos métodos discutidos nos capítulos anteriores quando aplicados a redes de grande porte, utilizando como exemplo o sistema já introduzido no Capítulo 4.

As implementações para execução paralela empregam duas tecnologias: OpenMP ([75, 76]), que facilita a programação de algoritmos paralelos em processadores tradicionais, e OpenCL ([77]), que possibilita também empregar os processadores gráficos das placas de vídeo modernas. A implementação para execução distribuída emprega Beanstalk ([78]), uma fila de tarefas. São apresentadas as principais peculiaridades de cada implementação e os resultados das diferentes versões são comparados, ilustrando suas vantagens no estudo de sistemas de grande porte. Informações sobre o ambiente de trabalho, incluindo especificação dos computadores e principais software utilizados, estão listadas no Apêndice C.

B.1 Considerações gerais

Os métodos apresentados nos capítulos anteriores foram desenvolvidos em torno da simulação da resposta a falhas nos componentes da rede. Na simulação analítica, simulam-se falhas em cada um dos componentes com taxas de falha do sistema. No simulação de Monte Carlo, falhas são aplicadas ao longo do tempo, empregando o mesmo algoritmo básico de simulação da resposta a falhas. Para os estudos de alocação, tanto através da análise exaustiva quanto empregando algoritmos genéticos, são executadas simulações analíticas para diferentes cenários que representam variações incrementais de um sistema base. Todos estes métodos apresentam possibilidades de execução paralela, seja através da análise paralela (independente) de cada cenário nos estudos de alocação, seja na análise paralela da resposta a falhas nos estudos de simulação analítica e de Monte Carlo.

Uma possível apresentação de uma abordagem serial tradicional para a simulação dos diferentes cenários nos estudos de alocação está esquematizada na Figura B.1, onde m representa o número total de cenários em análise e n é o número de elementos sujeitos a falha. A preparação inicial dos dados, incluindo montagem do grafo e análise da topologia é realizada uma única vez. Para cada um dos m cenários, os dados são adequados de acordo com a configuração dos dispositivos. Executa-se a simulação analítica, representada pela busca dos elementos de proteção, a simulação das n falhas e cálculo dos índices desejados. Neste processo são executadas $m \times n$ simulações de falhas.

Em computadores modernos, há vários núcleos de processamento, permitindo que threads e processos possam ser executados não apenas concorrentemente, mas também paralelamente. Em nível geral, um *thread* é um contexto de execução dentro de um processo de um aplicativo. Um processo pode conter diversos threads, cada um executando uma tarefa distinta, concorrentemente. Em sistemas operacionais tradicionais, a criação de threads e compartilhamento de informações entre threads de um mesmo processo apresentam menos barreiras que o equivalente para criação de diversos processos.

Em geral, o número de cenários é maior ou muito maior que o número de threads disponíveis em computadores tradicionais. Assim, supondo que há M threads disponíveis para a execução da análise dos cenários, a execução dos m cenários pode ser realizada de forma que cada thread representa um cenário independente, conforme ilustrado na Figura B.2.

Uma abordagem alternativa é executar a análise dos cenários de forma serial, empregando paralelismo na simulação das falhas, como ilustrado na Figura B.3. Por fim, dependendo da estrutura dos processadores disponíveis, pode ser vantajoso empregar uma terceira abordagem, ilustrada na Figura B.4, alocando um determinado número de threads para análise de cada cenário, nos quais se efetua a análise das falhas de forma paralela.

As decisões sobre qual abordagem a utilizar deve ser tomada frente a diversos fatores como as características de organização dos processadores disponíveis, limitações de volume e tempo de acesso da memória alocável, e a complexidade de execução de cada etapa dos algoritmos. Nas próximas seções são exploradas diferentes possibilidades para cada implementação dos métodos desenvolvidos nos capítulos anteriores em processadores atuais, empregando diferentes tecnologias.

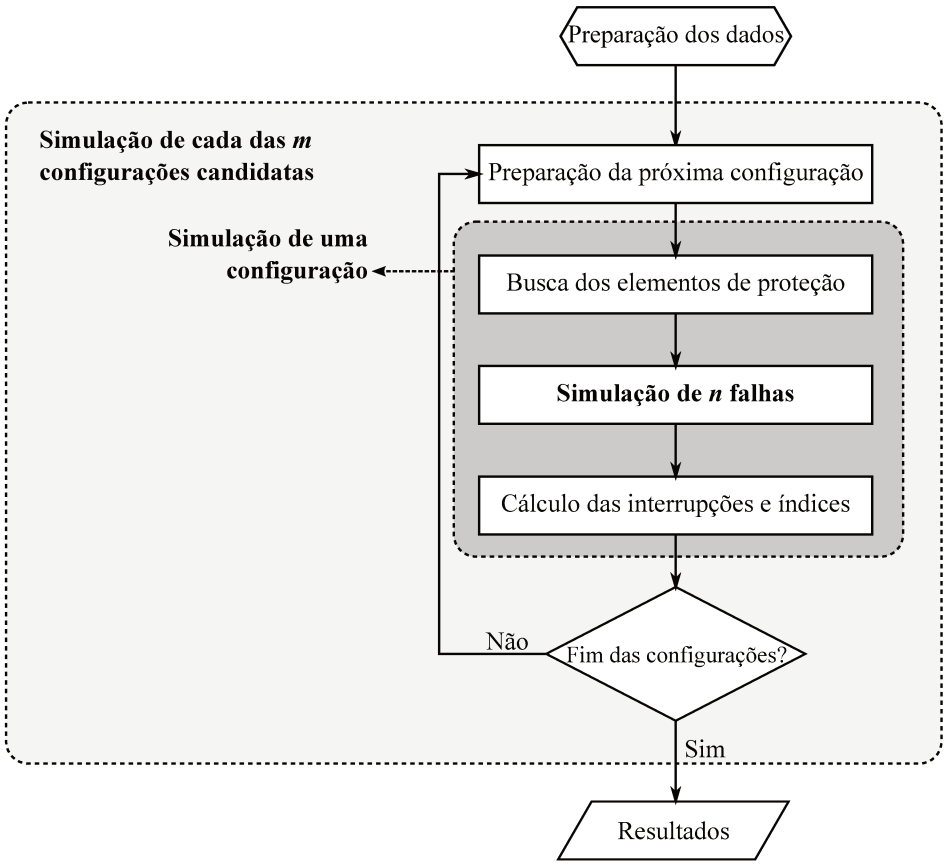

Figura B.1: Possível laço serial para simulação analítica de múltiplas configurações candidatas.

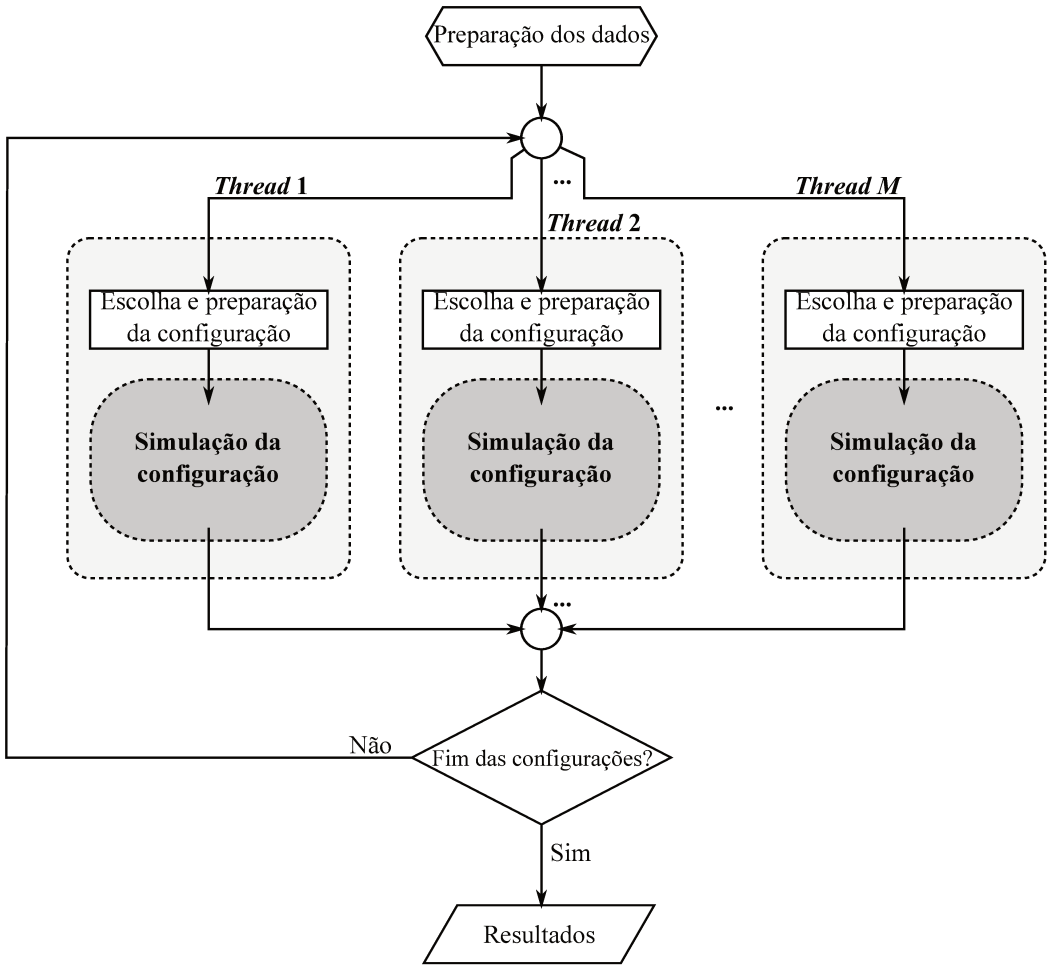

Figura B.2: Possível laço para simulação analítica de múltiplas configurações candidatas em paralelo.

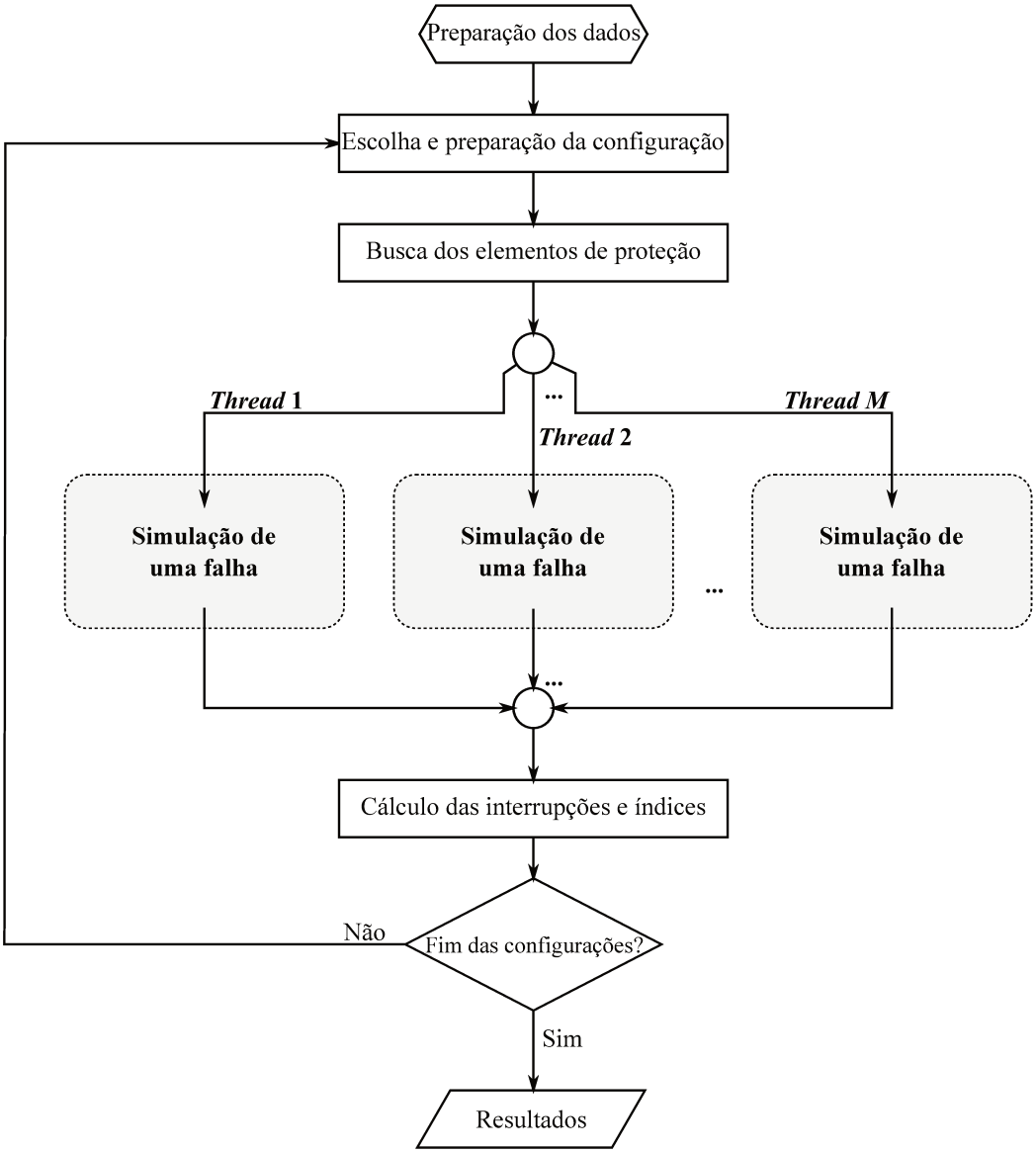

Figura B.3: Possível laço para simulação analítica de múltiplas configurações candidatas, com simulação paralela de falhas.

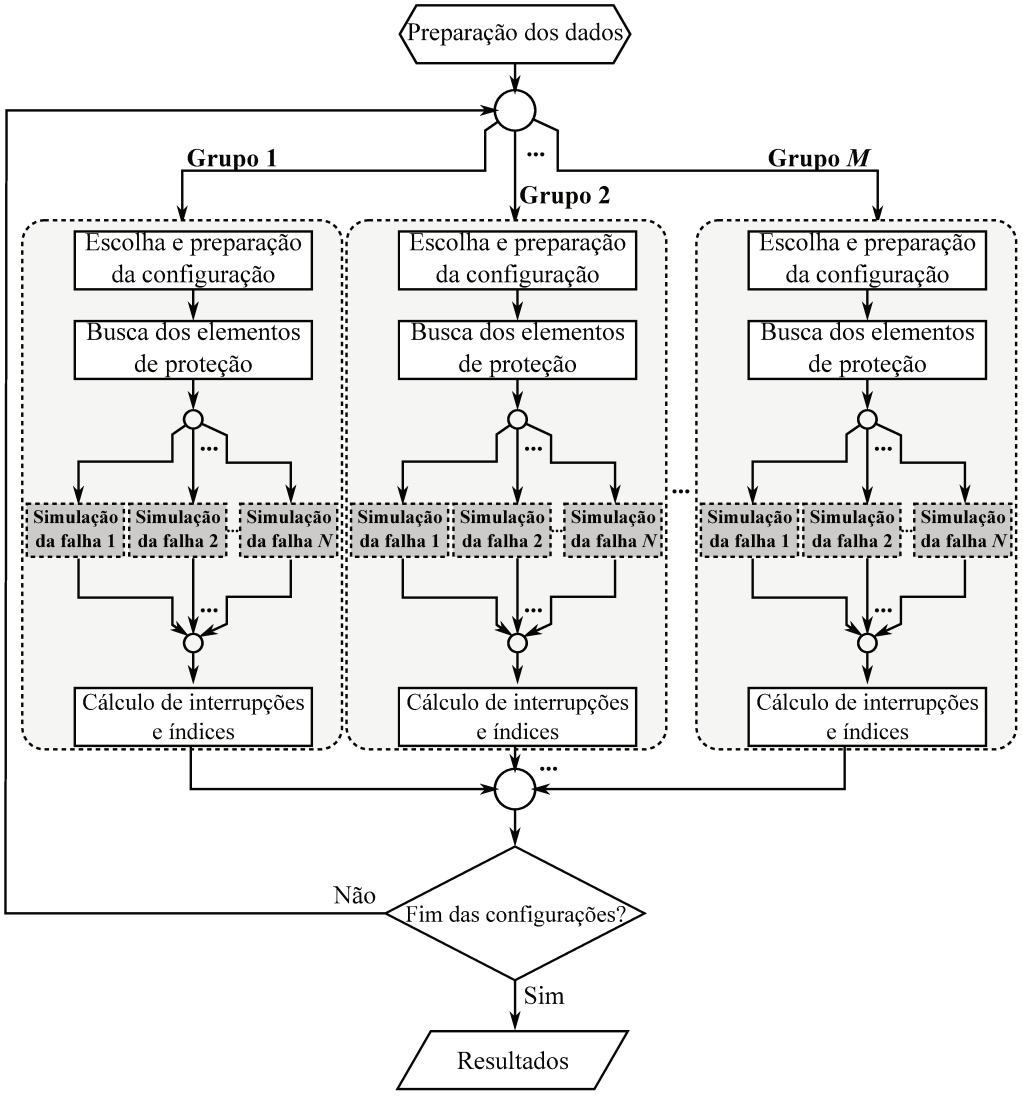

Figura B.4: Possível laço para simulação analítica de múltiplas configurações candidatas de forma paralela, com simulação paralela de falhas também paralela.

B.1.1 Tecnologias para paralelização

Threads tradicionais, OpenMP, MPI (*Message Passing Interface*), OpenCL, OpenACC, C++ AMP, CUDA, bibliotecas específicas como a *Intel Threading Building Blocks* são apenas algumas das tecnologias existentes que permitem explorar o paralelismo dos processadores modernos. Ou seja, não há consenso sobre a melhor forma geral de explorar os recursos paralelos.

Duas alternativas, OpenMP e OpenCL, foram investigadas para paralelização e execução concorrente das diversas etapas dos métodos desenvolvidos nos capítulos anteriores.

Paralelização através de OpenMP

OpenMP é uma tecnologia que permite empregar diretivas de compilação específicas para permitir que um trecho de código originalmente serial seja executado em vários threads de forma paralela. OpenMP tem suporte às linguagens C, C++ e Fortran. Caso o compilador empregado não suporte OpenMP, o código é compilado sem suporte ao paralelismo, mantendo-se assim uma boa portabilidade e também facilitando a validação do código paralelo.

Apesar de OpenMP ser um padrão aberto e em constante desenvolvimento, os compiladores mais empregados têm suporte limitado a versões antigas. Por exemplo, no ínicio de 2014, os compiladores da Microsoft, incluindo o Visual Studio 2013 (versão mais recente), suportam apenas OpenMP 2.0, apesar de já estar disponível a versão 4.0 da especificação. Compiladores *open-source* como GCC ([79]) e *clang* ([80]) suportam a versão 3.1, sendo que o GCC suporta parcialmente a recente versão 4.0. Há alguns compiladores comerciais, como os disponibilizados pela Intel, que suportam as versões mais recentes do padrão.

É importante destacar que a revisão 4.0 apresenta a possibilidade da execução de trechos de código em diferentes dispositivos, contudo ainda não existem implementações maduras devido a sua recente criação. Caso exista suporte suficiente dos compiladores e fabricantes, é possível que OpenMP possa vir a conter funcionalidades próximas ao do padrão OpenACC, o qual permite execução de código em processadores de placas de vídeo com abordagem próxima a OpenMP, porém com menor apoio da indústria.

Em termos de sua utilização na linguagem C++, deve-se atentar ao fato de que o padrão mais recente da linguagem ([81]), conhecido como C++11, apresenta incompatibilidades com o padrão OpenMP mais recente. Não se deve, por exemplo, empregar threads OpenMP em conjunto com threads tradicionais sob o risco de corromper o estado dos threads. Em casos de aplicações onde os cálculos são restritos a um único processo, gerenciado empregando apenas OpenMP para coordenação das tarefas, usar OpenMP traz benefícios sem causar conflitos.

Como foi empregado um computador pessoal tradicional, a abordagem de paralelização mais adequada ao utilizar OpenMP é a apresentada na Figura B.2. Cada thread de processamento executa uma das configurações em análise de forma concorrente, com um thread principal coordenando a alocação de configurações a analisar.

Paralelização através de OpenCL

A tendência do aumento do número de núcleos e do uso de processadores gráficos sugere a utilização de tecnologias como NVIDIA CUDA ([82]) e OpenCL ([77]). No contexto deste trabalho,

o uso de tais tecnologias pode liberar o processador principal para uso de tarefas secundárias e um maior detalhamento dos modelos. OpenCL, ao contrário de CUDA, pode ser utilizado tanto para processadores tradicionais quanto processadores gráficos, independente do fabricante. Desta forma, mesmo na ausência de uma placa de vídeo dedicada, o uso de OpenCL pode trazer melhorias.

OpenCL é um padrão suportado pelos principais fabricantes de processadores e placas de vídeo, incluindo dispositivos móveis com processadores de baixo consumo de energia e mesmo processadores programáveis do tipo FPGA (*Field Programmable Gate Array*). Cada fabricante disponibiliza um *driver* para uso dos recursos de seu dispositivo através de OpenCL. O driver OpenCL compila um trecho de código, comumente chamado de "núcleo" (ou *kernel*, em inglês), em tempo de execução. Atualmente, nas revisões 1.1 e 1.2 do padrão, o código deve ser escrito em um dialeto baseado em C, chamado de OpenCL C. O dialeto apresenta, por exemplo, palavras-chaves extras para definição do espaço de memória empregado pelos ponteiros, diversas funções matemáticas e tipos de dados específicos. Um dos recursos que não está presente em OpenCL é a alocação dinâmica — em geral, é necessário alocar toda a memória utilizada pelos núcleos antes de sua execução.

A revisão 2.0 da especificação de OpenCL ([83]), publicada em novembro de 2013, é promissora. Ela contém a referência à especificação da extensão OpenCL SPIR (*Standard Portable Intermediate Representation*), a qual representa a padronização de uma representação intermediária portátil baseada no projeto LLVM (*Low Level Virtual Machine* [84]), já empregada em diversos drivers de OpenCL disponíveis atualmente. Com esta padronização, acredita-se que será possível criar compiladores para outras linguagens de programação, removendo a necessidade de escrever código em OpenCL C. Por exemplo, a ferramenta PyOpenCL, um software escrito em linguagem Python capaz de gerar código OpenCL C dentro de algumas limitações, poderia gerar o código da representação portátil diretamente a partir de código escrito em Python, eliminando o intermediário de geração de OpenCL C.

Um dos aspectos de OpenCL, geralmente negligenciado, é a capacidade de manter o código do kernel neutro em relação ao conjunto de instruções SIMD ("*single instruction, multiple data*", ou em português "instrução única, dados múltiplos"), como as famílias SSE e AVX, dos processadores quando comparado a tecnologias e linguagens tradicionais. Em C tradicional, por exemplo, é frequentemente necessário empregar extensões específicas de cada compilador, criadas para um tipo de arquitetura específica. Como a cada ano são introduzidos novos conjuntos de instruções, torna-se difícil manter o código portátil e ao mesmo tempo explorar o potencial dos processadores modernos sem intervenção manual e alterações intrusivas no código. OpenCL pode vir a se tornar uma forma de utilizar instruções SIMD e ao mesmo tempo manter a portabilidade do código entre diferentes arquiteturas.

B.1.2 Exploração de processadores gráficos

A linguagem de programação de OpenCL, chamada de *OpenCL C*, é baseada em um dialeto da linguagem C com extensões para paralelismo. Em termos da implementação neste trabalho, as principais diferenças entre o código em OpenCL e código em C++ são a ausência de classes, operadores personalizados, *templates* e também *namespaces*. Desta forma, a maioria do código envolvido foi adaptado dentro destas limitações. A lógica principal de análise das faltas nos

dispositivos do sistema elétrico, no entanto, pode ser mantida sem grandes modificações.

Como tradicionalmente as placas de vídeo não apresentam bom desempenho em algoritmos de análise de grafos, sendo empregadas para algoritmos mais facilmente abordados de forma paralela, como tratamento de matrizes com desempenho bem superior ao conseguido em processadores tradicionais ([85]), optou-se por empregar a busca em profundidade compilada no processador principal conforme apresentado na Seção 4.4.4.

Além do próprio código da simulação analítica, é necessário preparar os dados, transferi-los para a placa de vídeo, requisitar a execução do núcleo e, finalmente, aguardar a transferência dos resultados. Para requisitar a execução, os diferentes dispositivos apresentam restrições como, por exemplo, número máximo de itens. Para contornar as limitações encontradas, são executados lotes menores (por exemplo, 1000 simulações) ao invés de um grande lote (por exemplo, 15000) contendo todas as simulações necessárias.

B.1.3 Computação distribuída

Dentro das condições do ambiente de desenvolvimento, decidiu-se empregar Beanstalk ([78]). Beanstalk emprega uma arquitetura cliente-servidor, na qual o servidor mantém diversas listas de recursos que são lidos e consumidos pelos clientes. Apesar de o servidor não ser disponibilizado para Windows oficialmente, apenas ambientes unix, o cliente apresenta diversas implementações em diversas linguagens de programação. É possível, também, empregar o servidor em Windows através do ambiente Cygwin ([86]). Como o ambiente de desenvolvimento apresenta máquinas com Linux, uma delas foi empregada como servidor.

Para requerimentos mais complexos de distribuição em nível de tarefas, há outras ferramentas, como Gearman ([87]) e Celery ([88]), além de MPI ([89]) e diversas *message queues* (filas de mensagens) que podem ser empregadas neste contexto. Gearman não foi empregado devido à falta de cliente compatível com o compilador empregado, enquanto Celery requer linguagem Python e apresenta instalação e configuração mais complexas. Os principais conceitos empregados para a implementação utilizando Beanstalk são aplicáveis aos sistemas alternativos.

A arquitetura de distribuição está representada na Figura B.5. As linhas tracejadas indicam os principais fluxos de dados para as filas, as quais são armazenadas no servidor. Nesta arquitetura, os processos distribuídos podem ser executados em segundo plano em diversas máquinas, que podem ser adicionadas ou removidas dinamicamente. No processo distribuído, ao iniciar a simulação de um bloco, verifica-se a presença dos dados do caso base em um *cache* em memória local. Caso não estejam presentes, são carregados através do endereço provido pelo processo principal nas instruções do bloco na fila de cenários. Como podem ser realizadas milhares de simulações em centenas de blocos, o cache dos dados é de grande importância para evitar saturação da rede. A inserção dos cenários e dos resultados nas respectivas filas, assim como leitura após retirada das filas, é precedida pela conversão dos itens através da biblioteca *Boost Serialization* ([90]). O tamanho de cada bloco é calculado por uma aproximação de quantas simulações podem ser executadas em um intervalo configurável de, por exemplo, 10 segundos.

Para os métodos estudados, um cenário trata-se de uma configuração incremental do sistema base com a inclusão de dispositivos em determinadas posições, além de ajustes gerais de configuração da execução dos algoritmos. Desta forma, a mesma estrutura de cenário pode ser empregada

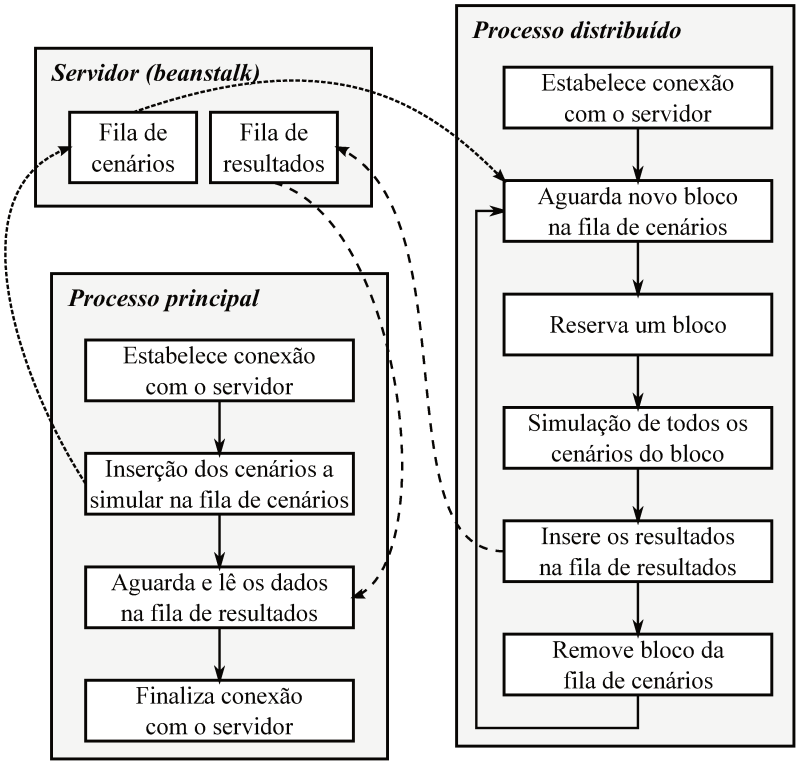

Figura B.5: Descrição em alto nível da arquitetura de distribuição de tarefas implementada.

para as análises através de enumeração, algoritmo genético e simulação de Monte Carlo. Os resultados, porém, são específicos de cada tipo de análise. Informações extras, como tempo de execução e máquina responsável pelo bloco, podem ser agregadas aos resultados para permitir a realização de estatísticas da execução distribuída.

B.2 Perfil de execução paralela

Implementações dos métodos de alocação empregando OpenMP e OpenCL foram realizadas de acordo com as informações apresentadas na Seção B.1. Os algoritmos genético e de enumeração podem, opcionalmente, empregar tais implementações para executar o cálculo da função objetivo para cada combinação de posições avaliadas em paralelo.

B.2.1 OpenMP

Os tempos totais da análise exaustiva para um religador e para diferentes redes, apresentadas na Seção 4.6, com execução em 1 thread (execução sequencial) a 8 threads estão listados nas Tabelas B.1 e B.2, em segundos e porcentagem do tempo de execução serial, respectivamente. O processador utilizado, Intel i7-3770, é composto por 4 núcleos físicos, apresentados como 8 núcleos ao sistema operacional graças à tecnologia *Hyper-Threading* da Intel. Além disso, o processador

pode operar em *clocks* acima do nominal automaticamente (*Intel Turbo Boost*), desde que se encontre dentro de sua faixa de operação de temperaturas.

Os resultados da Tabela B.1 apontam que o aumento do número de threads além do número de núcleos reais do processador apresentou benefícios consistentes: em geral, o aumento do número de threads reduz o tempo de simulação, contudo ocorreram situações em que o tempo foi aumentado. Além disso, é possível observar que empregando a menor rede, Alimentador 6, a redução de tempo foi mais acentuada que para os outros dois casos. É intuitivo supor que o uso de 2 threads permitiria reduzir o tempo de execução à metade do tempo de apenas 1 thread. Contudo, devido à tecnologia Turbo Boost, o processador opera em clocks mais altos com uma carga de 1 thread do que quando são empregados 2 threads. O comportamento observado a partir de 5 threads é explicado principalmente pelas características de Hyper-Threading: como há apenas 4 processadores reais e no cenário com 4 ou mais threads todos estão executando o mesmo tipo de cálculo, as unidades de processamento já apresentam carga efetiva alta, havendo poucas oportunidades para utilização de recursos através de Hyper-Threading. Já a diferença de perfil entre os diferentes sistemas pode ser explicada em grande parte pelos diversos mecanismos de cache envolvidos.

Tabela B.1: Tempo de execução (em segundos) da análise exaustiva da alocação de 1 religador em função do número de threads (C++/OpenMP).

Sistema / No. de threads	1	2	3	4	5	6	7	8
Sistema completo	366,1	222,8	173,7	149,9	143,6	139,8	137,7	133,0
Alimentador 2	49,3	31,0	27,3	24,7	24,5	24,3	25,2	25,5
Alimentador 6	0,225	0,114	0,092	0,075	0,073	0,066	0,055	0,049

Tabela B.2: Tempo de execução (porcentagem do tempo da execução serial) da análise exaustiva da alocação de 1 religador em função do número de threads (C++/OpenMP).

Sistema / No. de threads	1	2	3	4	5	6	7	8
Sistema completo	100,0	60,9	47,4	40,9	39,2	38,2	37,6	36,3
Alimentador 2	100,0	62,9	55,4	50,1	49,7	49,3	51,1	51,7
Alimentador 6	100,0	50,7	40,9	33,3	32,4	29,3	24,4	21,8

B.2.2 OpenCL

A implementação em OpenCL segue a abordagem descrita na Figura B.4. Para observar melhor o comportamento do tempo de execução, empregou-se a análise exaustiva para alocação de um religador, como feito na seção anterior. O resultado para o sistema completo está exposto na Tabela B.3.

No processador principal (Intel), foi observado que a execução é realizada em apenas dois núcleos e, ainda assim, é realizada em tempo menor que a versão empregando OpenMP com 8 threads, representando uma economia de cerca de 40% de tempo. Isto se deve tanto ao mecanismo de paralelização automática do compilador OpenCL do driver da Intel, quanto ao fato de a implementação em OpenCL apresentar código de melhor desempenho parcialmente pela necessidade do melhor gerenciamento dos recursos para permitir a sua execução.

Tabela B.3: Tempo de execução da análise exaustiva da alocação de 1 religador em diferentes dispositivos (OpenCL).

Dispositivo	Total (s)	Busca dos dispositivos de proteção (s)	Simulação de falhas (s)	Cálculo dos índices (s)
Intel i7-3770	78,7	57,0	11,1	10,6
AMD Radeon HD 7870	137,2	82,3	9,7	45,2

Comparando o desempenho nos dispositivos, observa-se que a simulação de falhas obteve um desempenho equivalente, apesar das arquiteturas distintas. Para o processador gráfico, o driver não conseguiu paralelizar o kernel da etapa de cálculo dos índices. Esta etapa é a mais facilmente paralelizável através de mudanças manuais, de forma que é possível melhorar seu desempenho. Por exemplo, pode-se empregar uma organização de memória diferente para possibilitar realizar operações matemáticas básicas como adição e multiplicação em grupos de 8 ou 16 valores numéricos em ponto flutuante.

Por último, observa-se que a etapa de busca de dispositivos tem pior desempenho no processador gráfico (AMD Radeon HD 7870). Na forma como foi abordada, esta etapa não explora possibilidades de paralelização, visto que é executada apenas uma vez por cenário a simular. Desta forma, grande parte dos elementos de processamento do acelerador gráfico ficam inutilizados. Como o processador gráfico não é especializado para o tipo de análise desta etapa, a não paralelização implica em desempenho inferior ao processador tradicional.

Todas as etapas alcançaram tempos de execução dentro da mesma ordem de grandeza quando comparados os diferentes dispositivos. Isto é um indicativo que o emprego de OpenCL é uma forma eficaz de empregar recursos subutilizados dos computadores modernos, com a possibilidade de abordar diferentes processadores de forma uniforme apesar de arquiteturas distintas.

B.3 Perfil de execução distribuída

Para avaliar a implementação de distribuída de tarefas empregando Beanstalk, as simulações foram executadas no total de quatro computadores. Três dos computadores estão instalados na mesma rede local, enquanto um é acessado através de uma rede privada virtual (VPN) através da internet.

O tempo necessário para a realização das simulações para o estudo exaustivo de alocação nos diversos computadores está reproduzido na Tabela B.4. Para maximizar o uso dos recursos computacionais, cada máquina pode empregar OpenMP para executar localmente cada bloco de tarefas recebido em paralelo. A última coluna da tabela inclui uma comparação do tempo de execução para cada configuração e o tempo de execução local no computador A, sem uso de recursos distribuídos, conforme a Seção B.2.2. Os tempos medidos não incluem o tempo de carregamento dos dados do sistema base.

Observa-se através dos resultados da Tabela B.4 que a abordagem de execução distribuída das simulações apresenta baixo *overhead* em termos de tempo de execução, como pode ser visto pela primeira linha da tabela apresentando um valor aproximado por 100% para a razão dos tempos.

Tabela B.4: Tempo de execução da análise exaustiva da alocação de 2 religadores (309 posições candidatas) em diferentes computadores e em conjunto.

Configuração	Rede	Tempo de execução (s)	Cenários por segundo	Razão (%)
Computador A	local	133	358	100
Computador B	local	144	330	108
Computador C	local	171	278	129
Computador D	remota	189	252	142
Computadores A, B, C	local	50	952	38
Computadores A, B, C e D	mista	40	1.187	30

Neste caso as simulações são executadas no mesmo computador, mas ainda é necessário enviar e receber instruções do servidor de tarefas.

Os computadores empregados apresentam desempenho próximo e observa-se que a adição de computadores para a execução distribuída implica em redução do tempo total de execução. Utilizando os computadores A, B e C em conjunto, obtém-se um número de cenários simulados por segundo próximo à soma dos cenários por segundo de cada máquina ($358+330+278 = 966 \approx 952$). Isto permite estimar o tempo total de simulação total pela soma individual do número de cenários por segundos. Como consequência, com 5 computadores com especificação igual ao computador A operando em conjunto, estima-se que o tempo de execução seja reduzido para valores próximos ao teórico de cerca de 20% do tempo individual. No cenário em análise, com 4 máquinas distintas com desempenho inferior ao computador A, obteve-se uma redução para 30% do tempo.

B.4 Comentários

O uso de recursos computacionais distribuídos, em conjunto com a exploração do paralelismo de cada máquina, permite reduzir ao tempo de execução, viabilizando uma análise ágil de sistemas de grande porte, sem a necessidade de realizar reduções e simplificações. A possibilidade de empregar OpenMP e OpenCL para utilizar os recursos de paralelismo dos computadores modernos permite reduzir significativamente o tempo necessário para realização das simulações necessárias para analisar o problema de alocação de dispositivos. OpenCL, em especial, tem diversas vantagens devido à sua versatilidade ao permitir execução de código em processadores tradicionais quanto processadores especializados como aqueles disponíveis em placas aceleradoras de vídeo, além de facilitar o uso de SIMD de forma portátil. A abordagem de distribuição de tarefas baseada em Beanstalk mostrou-se simples e efetiva, permitindo a utilização prática das máquinas disponíveis, mesmo remotamente, alcançando melhorias do tempo de execução próximas às teóricas.

Como um síntese dos resultados investigados, conclui-se que as três alternativas investigadas apresentam níveis de complexidade de implementação crescente, assim como possibilitam ganhos crescentes. OpenMP requer modificações mínimas no código, principalmente isolamento e pré-alocação de memória. Uma fila de tarefas como Beanstalk requer que os cenários e resultados sejam representados de uma forma simples, o que é facilitado por bibliotecas como a *Boost.Serialization*,

e que possibilite sua transmissão via rede. Finalmente, o uso de OpenCL requer que o código seja reescrito na sua linguagem, OpenCL C.

Apêndice C

Ambiente de trabalho

O ambiente de desenvolvimento e testes dos algoritmos e implementações foi composto por 4 máquinas para execução de tarefas, e uma máquina empregada apenas como servidor, conforme a listagem a seguir. Os computadores locais são conectados através de um switch 100 Mbps, enquanto a rede remota (máquina D) é limitada a 5 Mbps.

Foi empregada primariamente a linguagem C++, através do *Microsoft Visual Studio 2008* ([91]), em ambiente Windows. Para implementação dos algoritmos empregou-se a biblioteca de interface, manipulação e algoritmos genéricos de grafos *Boost Graph Library* ([92]). A geração de números aleatórios empregou a biblioteca *Boost.Random* ([93]), com um gerador pseudo-aleatório primário do tipo *Mersenne Twister 19937* ([94]).

Para a análise de resultados e experimentos com OpenCL, utilizou-se a linguagem Python, versão 2.7, com as bibliotecas Matplotlib ([95]) e PyOpenCL ([96]).

- Máquina principal (A):
  - Sistema operacional: Microsoft Windows 7 SP1
  - Processador: Intel i7-3770 @ 3,4 GHz
  - Memória RAM: 16 GB DDR3 PC3-12800 (*dual channel*)
  - Placa de vídeo: AMD Radeon HD 7870 (2 GB de memória GDDR5 dedicada).
  - Caches: 32 KB L1, 256 KB L2, 8 MB L3.
- Máquina auxiliar B:
  - Sistema operacional: Microsoft Windows 7 SP1
  - Processador: Intel Xeon X5570 @ 2,93 Ghz
  - Memória RAM: 12 GB DDR3 PC3-10600 (*triple channel*)
  - Caches: 32 KB L1, 256 KB L2, 8 MB L3.

- Máquina auxiliar C:
  - Sistema operacional: Microsoft Windows 7 SP1
  - Processador: Intel i7-870 @ 2,93 Ghz
  - Memória RAM: 8 GB DDR3 PC3-10600 (*dual channel*)
  - Caches: 32 KB L1, 256 KB L2, 8 MB L3.
- Máquina auxiliar D:
  - Sistema operacional: Microsoft Windows 7 SP1
  - Processador: Intel i7-875k @ 2,93 Ghz
  - Memória RAM: 8 GB DDR3 PC3-12800 (*dual channel*)
  - Caches: 32 KB L1, 256 KB L2, 8 MB L3.
- Servidor Beanstalk:
  - Sistema operacional: openSuse 12.3 GNU/Linux 3.7.10
  - Processador: Intel Core2 Duo 6700 @ 2,66 Hz

Apêndice D

Publicações

Os documentos a seguir representam os artigos redigidos para publicação durante o período de realização do doutorado do autor.

Publicações em revistas

1. Grilo, A.P.; **Meira, P.C.M.**; Vieira, J.C.M.; Freitas, W.; Bansal, R.C.; "Analytical tools to assess the voltage stability of induction-based distributed generators", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 36, no.1, Mar. 2012, doi: 10.1016/j.ijepes.2011.10.020

2. Dong, M.; **Meira, P.C.M.**; Xu, W.; Freitas, W.; "An Event Window Based Load Monitoring Technique for Smart Meters", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol.3, no.2, pp.787,796, Jun. 2012, doi: 10.1109/TSG.2012.2185522

3. Araujo, R.A.; **Meira, P.C.M.**; Almeida, M.C.; "Algorithms for Operation Planning of Electric Distribution Networks", *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, Jun. 2013, doi: 10.1007/s40313-013-0018-1

4. Dong, M.; **Meira, P.C.M.**; Xu, W.; Chung, C.Y.; "Non-Intrusive Signature Extraction for Major Residential Loads", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol.4, no.3, pp.1421,1430, Set. 2013, doi: 10.1109/TSG.2013.2245926

Submetido para publicação em revista

5. **Meira, P.C.M.**; Trindade, F.C.L.; Freitas, W.; "Using Outage Management Systems and Distributed Outage Sensors Databases to Determine the Feeder Faults Characteristics", submetido sob código de identificação TPWRS-00624-2014 para a *IEEE Transactions on Power Systems*.

Anais de congressos

6. Barbosa, E.A.C.; Trindade, F.C.L.; **Meira, P.C.M.**; Freitas, W.; "Análise da Influência da Prática de Eliminação de Faltas nos Principais Índices de Confiabilidade e Qualidade de Energia em Modernos Sistemas de Distribuição", *Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Automática*, 2010.

7. Morais, C.F.; Salles, D.; **Meira, P.C.M.**; Pavani, A.G.P.; Freitas, W. ; Xu, W.; "Método Prático Para a Avaliação do Impacto da Partida Direta de Motores de Indução no Afundamento de Tensão. In: Congresso Brasileiro de Automática", *Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Automática*, 2010.

8. Santos, E.P. ; Azevedo, A.T.; Soares, S.; **Meira, P.C.M.**; Silva Filho, D.; "A Decision Support Systems for DC Optimal Power Flow Analysis on a Large Scale Interconnected System". *Proceedings of 17th Power System Computation Conference (OSCC)*, 2011. v. 1.