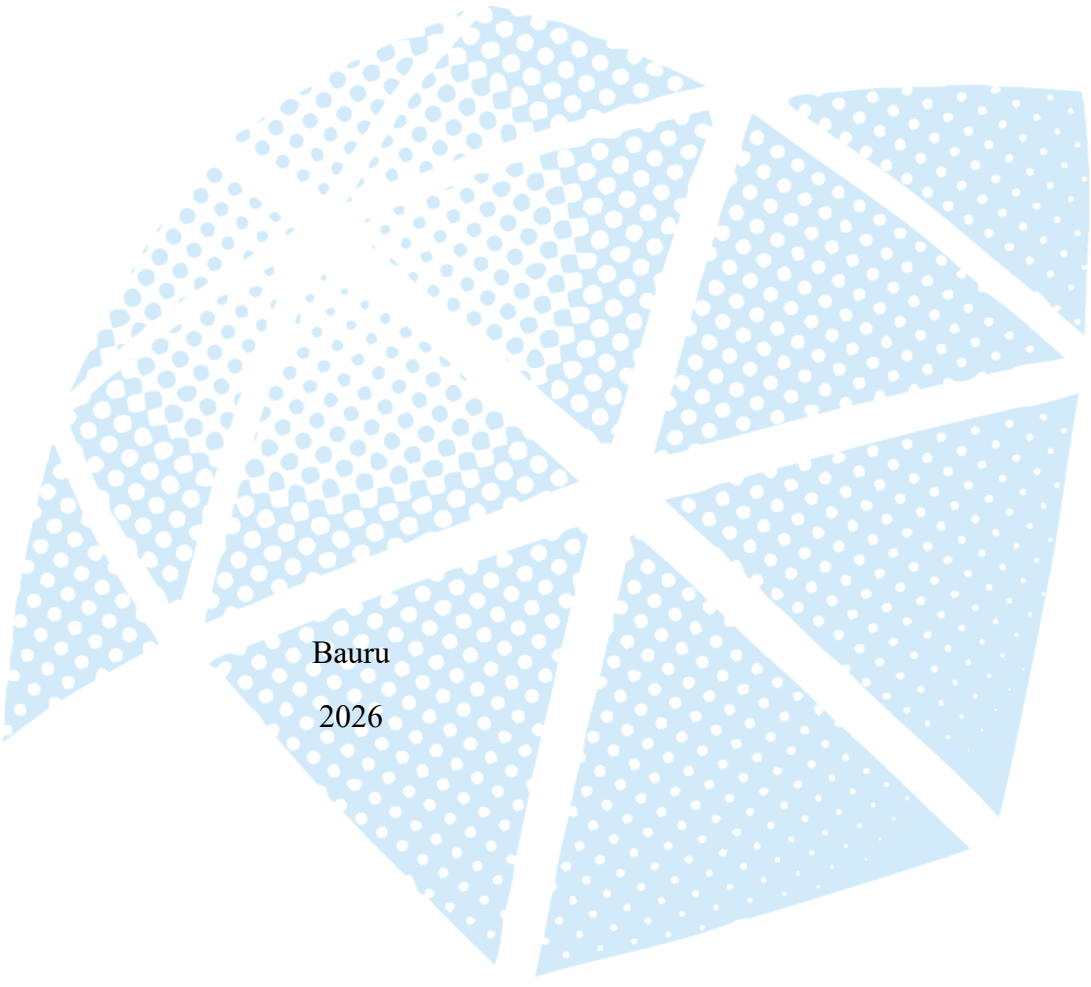
**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP**

**Faculdade de Engenharia de Bauru**

**CARLOS ALBERTO CARNEIRO**

# METODOLOGIA INTEGRADA DE RESTAURAÇÃO INTELIGENTE (ISRM) PARA O PLANEJAMENTO DA AUTOMAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO CONSIDERANDO RECURSOS ENERGÉTICOS DISTRIBUÍDOS E MICRORREDES



Bauru

2026

**CARLOS ALBERTO CARNEIRO**

# METODOLOGIA INTEGRADA DE RESTAURAÇÃO INTELIGENTE (ISRM) PARA O PLANEJAMENTO DA AUTOMAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO CONSIDERANDO RECURSOS ENERGÉTICOS DISTRIBUÍDOS E MICRORREDES

Tese apresentada à Universidade Estadual Paulista – UNESP, Faculdade de Engenharia de Bauru, para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Automação

Orientador: Prof. Dr. Helmo Kelis Morales Paredes

Coorientador: Prof. Dr. Juan Carlos Cebrian Amasifen

Bauru

2026

Carneiro, Carlos Alberto
Metodologia Integrada de Restauração Inteligente (ISRM) para o planejamento da automação de redes de distribuição considerando recursos energéticos distribuídos e microrredes / Carlos Alberto Carneiro. -- Bauru, 2026
190 p.

Tese (Doutorado)– Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, Bauru
Orientador: Helmo Kelis Morales Paredes
Coorientador: Juan Carlos Cebrian Amasifen

1. Redes elétricas Análise. 2. Microrredes (redes elétricas inteligentes). 3. Algoritmos genéticos. 4. Otimização combinatória.

## PACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

O impacto desta pesquisa reside no desenvolvimento de uma metodologia integrada para avaliar e planejar a restauração de redes de distribuição com elevada presença de recursos energéticos distribuídos. A Metodologia Integrada de Restauração Inteligente (*Integrated Smart Restoration Methodology* – ISRM) representa conjuntamente a topologia da rede, a evolução temporal das cargas e da geração, a capacidade dos alimentadores de reserva, a disponibilidade energética dos sistemas de armazenamento e a formação incremental de microrredes. Essa integração permite determinar quais consumidores podem ser efetivamente restaurados, em que instante e por quanto tempo o atendimento pode ser sustentado. Quando associada ao NSGA-II, a metodologia também fornece suporte à localização de chaves automatizadas, relacionando os investimentos em automação aos ganhos em continuidade, à redução da energia não distribuída e aos custos evitados de interrupção. Dessa forma, a pesquisa contribui para o planejamento de redes mais resilientes, flexíveis e preparadas para incorporar REDs como recursos ativos na recomposição do sistema.

## POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The impact of this research lies in the development of an integrated methodology for assessing and planning service restoration in distribution networks with a high penetration of distributed energy resources (DERs). This methodology, referred to as the Integrated Smart Restoration Methodology - ISRM, simultaneously accounts for network topology, the temporal evolution of loads and generation, the capacity of backup feeders, the energy availability of storage systems, and the incremental formation of microgrids. This integration makes it possible to determine which consumers can be effectively restored, when restoration can occur, which resources are involved, and how long service can be sustained. When combined with the NSGA-II algorithm, the methodology also supports the multiobjective allocation of automated switches by relating automation investments to improvements in service continuity, reductions in energy not supplied, and reductions in interruption costs. Consequently, this research contributes to the planning of more resilient and flexible distribution networks that are better prepared to incorporate DERs as active resources during service restoration.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

**Câmpus de Bauru**

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE CARLOS ALBERTO CARNEIRO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 02 de setembro de 2026, às 13h30min, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de TESE DE DOUTORADO de CARLOS ALBERTO CARNEIRO, intitulada "METODOLOGIA INTEGRADA DE RESTAURAÇÃO INTELIGENTE (ISRM) PARA O PLANEJAMENTO DA AUTOMAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO CONSIDERANDO RECURSOS ENERGÉTICOS DISTRIBUÍDOS E MICRORREDES". A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. HELMO KELIS MORALES PAREDES (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia de Controle e Automação / UNESP / Câmpus de Sorocaba - ICTS, Profa. Dra. FERNANDA CASEÑO TRINDADE ARIOLI (Participação Virtual) do(a) Departamento de Sistemas de Energia Elétrica / UNICAMP, Prof. Dr. JAKSON PAULO BONALDO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia / UFMT, Prof. Dr. CARLOS FREDERICO MESCHINI ALMEIDA (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas / EPUSP, Prof. Dr. EDUARDO VERRI LIBERADO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia de Controle e Automação / UNESP / Câmpus de Sorocaba - ICTS, Após a exposição pelo doutorando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: Aprovado. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

gov.br Documento assinado digitalmente
HELMO KELIS MORALES PAREDES
Data: 02/09/2026 17:50:25-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. HELMO KELIS MORALES PAREDES

**CARLOS ALBERTO CARNEIRO**

# METODOLOGIA INTEGRADA DE RESTAURAÇÃO INTELIGENTE (ISRM) PARA O PLANEJAMENTO DA AUTOMAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO CONSIDERANDO RECURSOS ENERGÉTICOS DISTRIBUÍDOS E MICRORREDES

Tese apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia de Bauru, para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Automação

Data da defesa: 02 / 09 / 2026

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Helmo Kelis Morales Paredes (Orientador – Participação Virtual)

Departamento de Engenharia de Controle e Automação / UNESP – ICTS / Sorocaba

Prof. Dr. Carlos Frederico Meschini Almeida (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas /EPUSP

Profa. Dra. Fernanda Caseño Trindade Arioli (Participação Virtual)
Departamento de Sistemas de Energia Elétrica / UNICAMP

Prof. Dr. Jakson Paulo Bonaldo (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia / UFMT

Prof. Dr. Eduardo Verri Liberado (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia de Controle e Automação / UNESP – ICTS / Sorocaba

## AGRADECIMENTOS

A Deus, Luz que ilumina nosso caminho e Companheiro constante mesmo nas horas mais difíceis, sempre presente a nos inspirar e guiar na busca do saber. A Ele, minha eterna gratidão.

À minha esposa e companheira, Irma Elisa Bastos Pereira Carneiro, pela confiança, incentivo, paciência e dedicação — pilares fundamentais desta conquista que é verdadeiramente nossa.

Aos meus filhos, Lucas Bastos Pereira Carneiro e Mateus Bastos Pereira Carneiro, maior fonte de inspiração para que eu nunca deixe de buscar o meu melhor.

Aos meus pais, João Bartolomeu Carneiro e Mariana dos Santos Carneiro, que um dia sonharam, simplesmente, em “estudar os filhos”.

Ao Prof. Dr. Helmo Kelis Morales Paredes, pela confiança depositada em mim, por sua colaboração e pelas valiosas contribuições na construção deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Juan Carlos Cebrian Amasifen, por sua dedicação, paciência e, acima de tudo, pela parceria, fundamental para a conclusão deste trabalho.

## RESUMO

Esta tese propõe a Metodologia Integrada de Restauração Inteligente (*Integrated Smart Restoration Methodology* – ISRM), que integra a modelagem da restauração de redes radiais, a avaliação da confiabilidade e o planejamento multiobjetivo da automação. A ISRM representa a rede por blocos de carga, superblocos dinâmicos e hiperblocos. Para diferentes locais e horários de ocorrência de faltas, simula o isolamento do trecho defeituoso, a restauração pela fonte principal, a transferência por alimentadores de reserva e o atendimento por Recursos Energéticos Distribuídos (REDs) e microrredes. A avaliação considera perfis horários de demanda, geração fotovoltaica, estado de carga dos sistemas de armazenamento, capacidade de reserva dos alimentadores e tempos de reparo dependentes do horário do evento. Com isso, são calculados indicadores de desempenho como a frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora (FEC), a duração equivalente de interrupção por unidade consumidora (DEC), a energia não distribuída (END) e o custo da interrupção ao consumidor (CIC). Para o planejamento, a ISRM utiliza a metaheurística NSGA-II, com cromossomos binários que representam a instalação de novas chaves automatizadas ou a substituição de chaves manuais por unidades automatizadas, buscando soluções não dominadas para DEC, CIC e investimento de capital (CAPEX), sob restrições orçamentárias. A restauração foi validada nas redes de 69 e 1.946 barras, e a otimização foi aplicada às redes de 69 e 135 barras, considerando níveis de penetração de RED de 30% e 50%. A agregação em superblocos reduziu a dimensão processada em aproximadamente 91% e 88% nas redes de 69 e 1.946 barras, respectivamente, com tempo mediano de 0,73 s por evento na rede de grande porte. Na rede de 69 barras, a disponibilidade de alimentadores de reserva reduziu FEC, DEC, END e CIC em cerca de 21% a 30%; na rede de 1.946 barras, as microrredes atuaram em 92% das topologias avaliadas. Os resultados do NSGA-II indicaram que a substituição de chaves e a instalação de três novas unidades reduziram os indicadores em aproximadamente 23% a 24% na rede de 69 barras. Na rede de 135 barras, as reduções foram de 44,50% para FEC e de aproximadamente 27% para DEC, END e CIC. Os resultados mostram que a ISRM permite avaliar, de forma escalável e dependente do tempo, alternativas de restauração e automação, e que a localização dos dispositivos influencia os benefícios obtidos.



**Palavras-chave**: Restauração de redes de distribuição. Reconfiguração da rede de distribuição. Automação de redes elétricas. Recursos energéticos distribuídos. Microrredes. Otimização multiobjetivo. Confiabilidade do sistema de distribuição.

**ABSTRACT**

This thesis proposes an Integrated Smart Restoration Methodology (ISRM), which integrates the modeling of radial distribution network restoration, reliability assessment, and multiobjective automation planning. The ISRM represents the network through load blocks, dynamic superblocks, and hyperblocks. For different fault locations and occurrence times, it simulates isolation of the faulted section, restoration from the primary source, transfer through backup feeders, and supply from Distributed Energy Resources (DERs) and microgrids. The assessment considers hourly demand profiles, photovoltaic generation, energy storage state of charge, feeder reserve capacity, and repair times that depend on the event time. It calculates performance indicators including the equivalent frequency of interruption per consumer (FEC), equivalent duration of interruption per consumer (DEC), energy not distributed (END), and customer interruption cost (CIC). For planning, the ISRM uses the NSGA-II metaheuristic, with binary chromosomes representing the installation of new automated switches or the replacement of manual switches with automated units, to seek non-dominated solutions for DEC, CIC, and capital expenditure (CAPEX), subject to budget constraints. Restoration was validated on the 69-bus and 1,946-bus networks, while optimization was applied to the 69-bus and 135-bus networks, considering DER penetration levels of 30% and 50%. Superblock aggregation reduced the processed dimension by approximately 91% and 88% on the 69-bus and 1,946-bus networks, respectively, with a median processing time of 0.73 s per event on the large network. On the 69-bus network, backup feeder availability reduced FEC, DEC, END, and CIC by approximately 21% to 30%; on the 1,946-bus network, microgrids operated in 92% of the evaluated topologies. NSGA-II results showed that replacing switches and installing three new units reduced the indicators by approximately 23% to 24% on the 69-bus network. On the 135-bus network, reductions were 44.50% for FEC and approximately 27% for DEC, END, and CIC. These results show that the ISRM provides a scalable, time-dependent assessment of restoration and automation alternatives, and that device placement influences the benefits achieved.

**Keywords**: Distribution network restoration. Distribution network reconfiguration. Electrical grid automation. Distributed energy resources. Microgrids. Multi-objective optimization. Distribution system reliability.

**SUMÁRIO**


1 INTRODUÇÃO ..... 19

1.1 JUSTIFICATIVA ..... 22

1.2 OBJETIVOS ..... 23

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ..... 25

2.1 TRANSFORMAÇÃO DAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO E REPRESENTAÇÃO OPERACIONAL ..... 25

2.2 CONFIABILIDADE, RESILIÊNCIA E AVALIAÇÃO DAS INTERRUPÇÕES ..... 26

2.3 RECONFIGURAÇÃO E RESTAURAÇÃO SEQUENCIAL ..... 28

2.4 REDs, ARMAZENAMENTO E MICRORREDES NA RESTAURAÇÃO ..... 29

2.5 EVOLUÇÃO DA ALOCAÇÃO DE CHAVES E AVALIAÇÃO ECONÔMICA DE CHAVES ..... 30

2.6 ALGORITMOS GENÉTICOS, OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO E NSGA-II ..... 32

2.7 SÍNTESE CRÍTICA E POSICIONAMENTO DA ISRM ..... 34

3 METODOLOGIA INTEGRADA DE RESTAURAÇÃO INTELIGENTE ..... 37

3.1 ARQUITETURA CONCEITUAL DA ISRM ..... 37

3.2 PROCESSO INTEGRADO DE CONTINGÊNCIAS E RESTAURAÇÃO ..... 38

4 MODELO MATEMÁTICO DA ISRM ..... 41

4.1 MODELAGEM DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO ..... 41

4.2 MODELAGEM MATEMÁTICA DAS CONTINGÊNCIAS ..... 44

4.3 MODELAGEM ESPAÇO-TEMPORAL ..... 48

4.3.1 Demanda dos Consumidores ..... 50

4.3.2 Potência fornecida pelos Sistemas Fotovoltaicos ..... 51

4.3.3 Estados de Carga e Descarga de Sistemas de Armazenamento de Energia ..... 53

4.3.4 Capacidade da reserva de carga dos Alimentadores de Socorro ..... 55

4.3.5 Tempo Médio de Reparo ..... 57

4.4 MATRIZ DOS TEMPOS DE INTERRUPÇÃO DOS BLOCOS ..... 58

4.4.1 Vetor de tempos de interrupção de uma contingência ..... 59

4.4.2 Avaliação da permanência da restauração ..... 60

4.4.3 Conversão dos resultados dos superblocos para os blocos de carga ..... 61

4.4.4 Construção da MTIB ..... 62

4.4.5 Dimensão espaço-temporal da MTIB ..... 63

4.4.6 Papel da MTIB na ISRM ..... 64

4.5 MATRIZ BINÁRIA DE INTERRUPÇÕES PERMANENTES (MBIP) ..... 65

4.6 FORMULAÇÃO DOS INDICADORES DE CONFIABILIDADE E CUSTO DA INTERRUPÇÃO ..... 67

4.6.1 Modelagem Probabilística das Contingências ..... 67
4.6.2 Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC) ..... 69
4.6.3 Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC) ..... 70
4.6.4 Energia Não Distribuída (END) ..... 72
4.6.5 Custo da Interrupção ao Consumidor (CIC) ..... 76
5 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DA ISRM ..... 79
5.1 RESTAURAÇÃO A MONTANTE ..... 80
5.1.1 Mapeamento Topológico dos superblocos a Montante da falta ..... 81
5.1.2 Fase 1- Restauração Automática pela Fonte Principal ..... 81
5.1.3 Fase 2 - Transferência Automática via Alimentadores de Reserva e REDs ..... 83
5.2 RESTAURAÇÃO HIERÁRQUICA A JUSANTE ..... 88
5.2.1 Representação topológica e conjuntos de estado ..... 89
5.2.2 Reserva de carga e priorização dos alimentadores ..... 90
5.2.3 Modelagem da geração por REDs e demandas líquidas nos superblocos ..... 91
5.2.4 Descoberta Topológica e Fechamento do Hiperbloco Automático ..... 92
5.2.5 Avaliação Energética e Aceitação do Hiperbloco ..... 93
5.2.6 Segunda passagem: restauração manual incremental (TM) ..... 94
5.2.7 Consolidação dos conjuntos de restauração e conjunto residual ..... 95
5.3 FORMAÇÃO E AVALIAÇÃO DE MICRORREDES DINÂMICAS EM SUPERBLOCOS ISOLADOS ..... 98
5.3.1 Estado inicial da região isolada ..... 98
5.3.2 Classificação Operacional dos Recursos Energéticos Distribuídos ..... 99
5.3.3 Expansão Topológica da Microrrede ..... 100
5.3.4 Atualização Incremental do Orçamento Energético ..... 100
5.3.5 Critério de Aceitação de Novos Superblocos ..... 102
5.3.6 Classificação Operacional dos Superblocos Restaurados ..... 102
5.3.7 Consolidação da Formação das Microrredes ..... 103
5.4 AVALIAÇÃO TEMPORAL DA SUSTENTABILIDADE DA RESTAURAÇÃO 106
5.4.1 Estrutura Geral da Simulação Temporal ..... 107
5.4.2 Inicialização da Simulação Temporal ..... 109
5.4.3 Modelagem Dinâmica do Balanço Energético dos Recursos Energéticos Distribuídos ..... 111
5.4.4 Avaliação da Sustentabilidade da Restauração ..... 115
5.4.5 Atualização dos Tempos Individuais de Interrupção ..... 120

5.5 INTEGRAÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO DA ISRM COM A AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE ..... 121
6 OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO DA AUTOMAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO O ALGORITMO NSGA-II ..... 123
6.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO ..... 124
6.1.1 Formação dos custos de investimento ..... 126
6.2 REPRESENTAÇÃO CROMOSSÔMICA DAS SOLUÇÕES CANDIDATAS ..... 128
6.3 PROCESSO EVOLUTIVO DO NSGA-II ..... 130
6.3.1 Inicialização da População ..... 131
6.3.2 Avaliação das Soluções Candidatas ..... 132
6.3.3 Classificação por Dominância de Pareto ..... 134
6.3.4 Seleção dos Indivíduos ..... 135
6.3.5 Operador de Cruzamento (Crossover) ..... 136
6.3.6 Operador de Mutação ..... 136
6.3.7 Formação da Nova População – Seleção Ambiental e Elitismo ..... 137
6.3.8 Critério Adaptativo de Convergência ..... 138
6.4 SÍNTESE DO PROCEDIMENTO DE OTIMIZAÇÃO ..... 139
7 RESULTADOS E DISCUSSÕES ..... 141
7.1 ORGANIZAÇÃO E CONFIGURAÇÃO DOS ESTUDOS ..... 141
7.1.1 Etapas de avaliação ..... 141
7.1.2 Configuração da validação operacional da ISRM ..... 142
7.1.3 Configuração da otimização multiobjetivo ..... 143
7.2 VALIDAÇÃO OPERACIONAL E ESCALABILIDADE DA ISRM ..... 144
7.2.1 Formação de superblocos e desempenho computacional ..... 144
7.2.2 Efeito da automação e dos alimentadores de reserva ..... 145
7.2.3 Contribuição dos REDs e das microrredes ..... 146
7.2.4 Relação entre a validação da ISRM e a otimização ..... 149
7.3 CONFIGURAÇÃO DA OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO ..... 149
7.4 RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO PARA O SISTEMA DE 69 BARRAS ..... 150
7.4.1 Caracterização do sistema e dos cenários ..... 150
7.4.2 Convergência e consistência entre as execuções ..... 151
7.4.3 Frentes de Pareto ..... 153
7.4.4 Soluções representativas ..... 154
7.4.5 Influência da penetração de RED ..... 155
7.5 RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO PARA O SISTEMA DE 135 BARRAS ..... 156
7.5.1 Caracterização do sistema e dos cenários ..... 156

7.5.2 Convergência e consistência entre as execuções ..... 156
7.5.3 Frentes de Pareto ..... 158
7.5.4 Soluções representativas ..... 160
7.5.5 Influência da penetração de RED ..... 161
7.6 DISCUSSÃO INTEGRADA DOS RESULTADOS ..... 161
7.6.1 Escalabilidade da ISRM e viabilidade da integração evolutiva ..... 161
7.6.2 Automação, redundância e microrredes ..... 161
7.6.3 Comparação das soluções de planejamento ..... 162
7.7 SÍNTESE DOS RESULTADOS ..... 163
8 CONCLUSÕES ..... 165
LIMITAÇÕES DA PESQUISA ..... 167
RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS ..... 167
PUBLICAÇÔES ..... 169
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 171
APÊNDICE A REPRESENTAÇÃO HIERÁRQUICA DA REDE ..... 175
A.1 BLOCOS DE CARGA ..... 175
A.2 FORMAÇÃO DINÂMICA DOS SUPERBLOCOS ..... 176
A.3 FORMAÇÃO DOS HIPERBLOCOS ..... 177
APÊNDICE B DADOS DAS CARGAS - NÚMERO DE CONSUMIDORES E POTÊNCIA ATIVA E REATIVA ..... 178
B.1 NÚMERO DE CONSUMIDORES, POTÊNCIA ATIVA (KW) E REATIVA (KVAR) – SISTEMA 69 BARRAS ..... 178
B.2 NÚMERO DE CONSUMIDORES, POTÊNCIA ATIVA (KW) E REATIVA (KVAR) – SISTEMA 135 BARRAS ..... 179
APÊNDICE C DADOS DAS LINHAS - SISTEMA 69 E SISTEMA 135 BARRAS ..... 180
C.1 EXTENSÃO E CONEXÕES DAS LINHAS DOS SISTEMA 69 BARRAS ..... 180
C.2 EXTENSÃO E CONEXÕES DAS LINHAS DOS SISTEMA 135 BARRAS ..... 181
APÊNDICE D DADOS DOS REDS INSTALADOS NO SISTEMA 69 BARRAS E 135 BARRAS 182
D.1 DISTRIBUIÇÃO DOS REDS - SISTEMA 69 BARRAS, 30% DE PENETRAÇÃO 182
D.2 DISTRIBUIÇÃO DOS REDS - SISTEMA 69 BARRAS, 50% DE PENETRAÇÃO 182
D.3 DISTRIBUIÇÃO DOS REDS - SISTEMA 135 BARRAS, 30% DE PENETRAÇÃO ..... 182
D.4 DISTRIBUIÇÃO DOS REDS - SISTEMA 135 BARRAS, 50% DE PENETRAÇÃO ..... 183

APÊNDICE E VALORES DAS CURVAS HORÁRIAS ..... 184
E.1 DEMANDA DOS CONSUMIDORES ..... 184
E.2 POTÊNCIA DE SAÍDA DO SISTEMA FOTOVOLTAICO ..... 184
E.3 ESTADO DE CARGA DE BATERIAS (SOC) ..... 184
E.4 RESERVA DE CARGA DOS ALIMENTADORES (SISTEMAS 69 E 135 BARRAS) ..... 185
APÊNDICE F VALORES DE TEMPOS DE REPARO (VALORES MÉDIOS POR HORA) 186
APÊNDICE G TAXAS DE FALHAS (FALHAS/KM/HORA) ..... 187
G.1 TAXAS DE FALHAS DA LINHAS DO SISTEMA 69 BARRAS ..... 187
G.2 TAXAS DE FALHAS DA LINHAS DO SISTEMA 135 BARRAS ..... 188
APÊNDICE H DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO SISTEMA 69 BARRAS ..... 189
APÊNDICE I DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO SISTEMA 135 BARRAS ..... 190

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Arquitetura conceitual da Integrated Smart Restoration Methodology (ISRM).....38
Figura 2 - Fluxo operacional completo da ISRM (loop de contingências, loop horário, avaliação de indicadores).....40
Figura 3 - Representação esquemática da rede elétrica a) Diagrama unifilar b) Diagrama em blocos.....43
Figura 4 - Contingência no bloco BL1. Formação vetor dependência d1.....45
Figura 5 - Contingência no bloco BL2. Formação vetor dependência d2.....45
Figura 6 - Contingência no bloco BL3. Formação vetor dependência d3.....46
Figura 7 - Contingência no bloco BL4. Formação vetor dependência d4.....46
Figura 8 - Contingência no bloco BL5. Formação vetor dependência d5.....46
Figura 9 - Contingência no bloco BL6. Formação vetor dependência d6.....47
Figura 10 - Contingência no bloco BL7. Formação vetor dependência d7.....47
Figura 11 - Matriz Dependência referente às contingências ocorridas na rede nos blocos de 1 a 7.....48
Figura 12 - Curvas de carga das classes de consumidores .....51
Figura 13 Curva horária do fator de geração fotovoltaica.....53
Figura 14 Curva SoC das baterias .....55
Figura 15 Curva de reserva de carga dos alimentadores reserva.....56
Figura 16 Curva MTTR.....58
Figura 17 - Relação entre a MDB, a MTIB e a MBIP para uma rede hipotética. .....66
Figura 18 - Correspondência entre as posições candidatas da rede e a codificação binária do cromossomo. Gene igual a “1” instala chave automática ou substitui chave manual por automática. Gene igual a “0”, mantém como condição original. .....129
Figura 19 - Integração entre o NSGA-II e a metodologia ISRM .....130
Figura 20 - Fluxo de avaliação de um indivíduo no processo integrado ISRM–NSGA-II. ...133
Figura 21 - Cruzamento de um ponto entre dois indivíduos .....136
Figura 22 - Exemplo de mutação bit-flip em um cromossomo binário.....137
Figura 23 - Formação de $Pt + 1$ a partir da população combinada $Rt = Pt \cup Qt$.....138
Figura 24 - Fluxo geral do processo de otimização integrado ISRM–NSGA-II.....140
Figura 25 - Distribuição estatística do número de superblocos de restauração: (a) sistema de 69 barras; (b) sistema de 1.946 barras .....144
Figura 26 - Percentual médio de consumidores atendidos por microrredes, por horário de início da interrupção, na rede de 69 barras com 30% de RED.....147
Figura 27 - Percentual médio de consumidores atendidos por microrredes, por horário de início da interrupção, na rede de 69 barras com 50% de RED.....148
Figura 28 - Consumidores restaurados por microrredes no sistema de 1.946 barras em função do horário de início da interrupção, com 30% de RED.....148
Figura 29 - Evolução do hipervolume online no sistema de 69 barras com 30% de RED.....152
Figura 30 - Evolução do hipervolume online no sistema de 69 barras com 50% de RED.....152
Figura 31 - Frente de Pareto final do sistema de 69 barras com 30% de RED. .....153
Figura 32 - Frente de Pareto final do sistema de 69 barras com 50% de RED. .....154
Figura 33 - Evolução do hipervolume online no sistema de 135 barras com 30% de RED...157
Figura 34 -Evolução do hipervolume online no sistema de 135 barras com 50% de RED....158
Figura 35 - Frente de Pareto combinada do sistema de 135 barras com 30% de RED. .....159
Figura 36 -Frente de Pareto combinada do sistema de 135 barras com 50% de RED. .....159

Figura 37 - Representação conceitual da hierarquia (Blocos → Superblocos → Hiperblocos). ..... 175
Figura 38 - Rede segmentada em blocos ..... 176
Figura 39 - Formação dos superblocos após a contingência. ..... 176
Figura 40 - Formação de hiperblocos e de microrredes. ..... 177
Figura 41 - Sistema IEEE de 69 barras modificado, mostrando a configuração de blocos de carga e os dispositivos de proteção e manobra. ..... 189
Figura 42 - Sistema 135 barras modificado, mostrando a configuração de blocos de carga (cores) e os dispositivos de proteção e manobra. ..... 190

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Valores de Carga Perdida ..... 77
Tabela 2 - Composição dos custos unitários das intervenções de automação em valores de maio de 2014 e maio de 2026. ..... 128
Tabela 3 - Características dos sistemas empregados na validação operacional da ISRM. ..... 142
Tabela 4 - Cenários empregados na validação operacional da ISRM. ..... 143
Tabela 5 – Indicadores anuais dos três cenários de restauração. ..... 145
Tabela 6 - Médias dos indicadores anuais na rede de 69 barras com alimentadores de reserva disponíveis. ..... 146
Tabela 7 - Impacto anual dos REDs formadores de rede no sistema de 69 barras sem alimentadores de reserva. ..... 146
Tabela 8 - Médias dos indicadores anuais na rede de 1.946 barras com 30% de RED e alimentadores de reserva disponíveis. ..... 147
Tabela 9 - Configuração das execuções do NSGA-II para o sistema 69 barras. ..... 149
Tabela 10 - Configuração das execuções do NSGA-II para o sistema 135 barras. ..... 150
Tabela 11 - Parâmetros adotados no critério adaptativo de convergência. ..... 150
Tabela 12 - Principais características do sistema de 69 barras na otimização. ..... 151
Tabela 13 - Síntese da convergência das execuções para o sistema de 69 barras. ..... 151
Tabela 14 - Valores das funções objetivo das soluções representativas do sistema de 69 barras. ..... 154
Tabela 15 - Reduções percentuais das soluções representativas do sistema de 69 barras. ..... 155
Tabela 16 - Principais características do sistema de 135 barras na otimização. ..... 156
Tabela 17 - Síntese da convergência das execuções para o sistema de 135 barras. ..... 157
Tabela 18 - Valores das funções objetivo das soluções representativas do sistema de 135 barras. ..... 160
Tabela 19 - Configurações das soluções representativas do sistema de 135 barras. ..... 160
Tabela 20 - Reduções percentuais das soluções representativas do sistema de 135 barras. ..... 160
Tabela 21 - Comparação dos principais resultados da otimização nos sistemas de 69 e 135 barras. ..... 162
Tabela 22 - Número de consumidores e potência ativa e reativa – Sistema 69 barras ..... 178
Tabela 23 - Dados elétricos dos consumidores - Sistema 135 barras ..... 179
Tabela 24 - Comprimento das linhas (km) - Sistema 69 barras ..... 180
Tabela 25 - Dados elétricos das linhas – Sistema 135 barras ..... 181
Tabela 26 - Distribuição dos REDs - Sistema 69 barras, 30% de penetração ..... 182
Tabela 27 - Distribuição dos REDs - Sistema 69 barras, 50% de penetração. ..... 182
Tabela 28 - Distribuição dos REDs - Sistema 135 barras, 30% de penetração. ..... 182
Tabela 29 - Distribuição dos REDs - Sistema 135 barras, 50% de penetração. ..... 183
Tabela 30 - Valores horários de demanda para consumidores residencial, comercial e industrial (p.u.) ..... 184
Tabela 31 - Valores horários de potência de saída dos sistemas fotovoltáico (p.u.) ..... 184
Tabela 32- Valores horários de Estado de Carga das Baterias – SoC (p.u.) ..... 184
Tabela 33 - Valores horários de reserva de carga dos alimentadores reserva (p.u.) - Sistemas 69 barras e 135 barras ..... 185
Tabela 34 - Tempos de reparo médios por hora - Sistema 69 barras e 135 barras ..... 186
Tabela 35 - Taxas de falhas da linhas do Sistema 69 barras (falhas/km/hora) ..... 187
Tabela 36 - Taxas de falhas da linhas do Sistema 135 barras (falhas/km/hora) ..... 188

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Pseudocódigo geral da ISRM ..... 79
Quadro 2- Pseudocódigo – Fase 1 da restauração a montante pela fonte principal ..... 82
Quadro 3 - Fase 2 da restauração a montante via AL_Res e REDs ..... 86
Quadro 4 - Pseudocódigo: Procedimento de restauração a jusante por alimentadores de reserva e REDs ..... 96
Quadro 5 - Formação e Avaliação de Microrredes Dinâmicas ..... 105
Quadro 6 - Exemplo ilustrativo das trajetórias temporais de atendimento e do registro da primeira perda de sustentabilidade dos superblocos..... 109

# 1 INTRODUÇÃO

As redes de distribuição de energia elétrica atravessam uma mudança estrutural. A expansão da automação, a conexão de recursos energéticos distribuídos (REDs), a difusão de sistemas de armazenamento e a possibilidade de operação ilhada conferem às redes novas alternativas de controle e restauração. Ao mesmo tempo, a eletrificação de serviços essenciais e de atividades produtivas eleva o custo social das interrupções, enquanto eventos de baixa probabilidade e alto impacto expõem limitações de infraestruturas concebidas para uma operação predominantemente passiva. Nesse contexto, confiabilidade e resiliência deixam de depender apenas da robustez dos componentes e passam a refletir, também, a capacidade de identificar a falta, isolar a menor região possível e recompor seletivamente o fornecimento com os recursos disponíveis (STANKOVIĆ et al., 2023; LOTFI et al., 2024; BABU et al., 2025).

Em sistemas radiais, uma falta permanente aciona uma sucessão de estados operacionais. A proteção elimina a corrente de falta; dispositivos de manobra delimitam a região defeituosa; parcelas sãs podem ser reconectadas à fonte principal; outras podem ser transferidas para alimentadores de reserva; e regiões ainda isoladas podem ser atendidas por REDs através da formação de microrredes temporárias. Essas ações não ocorrem necessariamente no mesmo instante. Comandos remotos, manobras locais, deslocamentos de equipes e reparo do componente conduzem grupos distintos de consumidores a tempos de interrupção diferentes. A restauração é, portanto, um processo sequencial e condicionado pela topologia pós-falta, e não um evento binário entre os estados integralmente energizado e integralmente interrompido (BIAN et al., 2022; SPERR et al., 2024; EISENKRAEMER et al., 2026).

A utilidade de cada alternativa restauradora também varia ao longo do tempo. A demanda dos consumidores e a reserva de capacidade dos alimentadores de apoio são horárias; a produção fotovoltaica depende da irradiância; sistemas de armazenamento são limitados por potência, energia e estado de carga; e o tempo necessário ao reparo pode variar com o horário de início da ocorrência, em razão da disponibilidade de equipes e das condições operacionais. Assim, duas faltas no mesmo trecho, mas iniciadas em horários distintos, podem produzir estratégias, durações e custos de interrupção diferentes. Modelos cronológicos de microrredes e de reconfiguração dinâmica demonstram a relevância dessas dependências, embora, em geral, se concentrem na operação de recursos ou em horizontes específicos, sem convertê-las integralmente em indicadores anuais destinados ao planejamento da automação (OMRI et al., 2024; SHIMILLAS et al., 2025; HU et al., 2026).

Há ainda uma distinção fundamental entre a taxa de falha e o efeito locacional da contingência. A taxa de falha permanece associada ao elemento que origina o evento, usualmente em função de seu comprimento, tecnologia ou histórico. O conjunto de consumidores interrompidos e seus respectivos tempos de interrupção, entretanto, depende da posição desse elemento na estrutura radial, da coordenação dos dispositivos e das alternativas de suprimento. Uma falta a montante pode interromper diversos blocos a jusante; uma falta periférica tende a afetar uma região menor; e a mesma taxa de falha pode contribuir de maneira diferente para os índices de cada conjunto de consumidores. A avaliação de confiabilidade deve, por isso, preservar a correspondência entre origem da contingência, propagação do desligamento, etapas restauradoras e consequências para as cargas, sem transformar a taxa física de falha em uma variável artificialmente dependente da posição do consumidor (BILLINTON; JONNAVITHULA, 1996; OMRI et al., 2024; DA CRUZ et al., 2026).

Essa correspondência é difícil de manter quando a rede é representada apenas por barras e ramos ou por zonas definidas uma única vez. A topologia física não se altera durante a análise, mas a sua organização operacional é reconfigurada depois da falta: dispositivos abertos e fechados redefinem fronteiras; regiões sãs tornam-se elegíveis a fontes diferentes; e conjuntos anteriormente separados podem ser restaurados por uma mesma sequência de ações. Uma unidade de representação adequada ao fluxo de potência não é, necessariamente, a unidade adequada para atribuir tempos de interrupção. De modo análogo, uma agregação útil ao cálculo de confiabilidade pode ocultar fronteiras decisivas para a restauração.

A literatura oferece soluções maduras para parcelas desse problema. Há métodos para alocar chaves seccionadoras e de interligação, formulações que distinguem dispositivos manuais e automáticos, modelos cronológicos de confiabilidade, estratégias de FLISR (localização da falta, isolamento e restauração do serviço), programação de equipes, formação de microrredes e otimização multiobjetivo. Os trabalhos clássicos de Levitin, Mazal-Tov e Elmakis (1995) e Billinton e Jonnavithula (1996) estabeleceram bases para relacionar o posicionamento de dispositivos a índices e custos de interrupção. Formulações posteriores ampliaram o tratamento de orçamento, incerteza, recursos distribuídos e múltiplos critérios (SHAHBAZIAN et al., 2020; COSTA; BESSANI; BATISTA, 2022; GANGWAR et al., 2022; CAETANO et al., 2023). O desafio que permanece não é a ausência dessas técnicas isoladas, mas sua articulação em uma função avaliadora capaz de acompanhar, para cada contingência e horário, a evolução da restauração e suas consequências anuais.

Esta tese enfrenta esse desafio por meio da *Integrated Smart Restoration Methodology* (ISRM), uma metodologia integrada de avaliação da restauração em redes de distribuição

radiais. A rede é organizada em três níveis relacionados. Os blocos de carga (BLs) preservam os trechos elementares e os consumidores associados, considerando a posição e a função dos dispositivos de proteção e de manobra. Após cada contingência, os superblocos (SBs) reúnem dinamicamente BLs que compartilham uma condição operacional e constituem unidades restauráveis na configuração corrente. Durante a recomposição, hiperblocos (HBs) podem agregar temporariamente SBs atendidos por uma mesma fonte ou sequência de manobras. Essa hierarquia mantém a rastreabilidade até os consumidores e, simultaneamente, representa as fronteiras que realmente governam a restauração.

Para cada origem e horário de contingência, a ISRM reproduz etapas automáticas e manuais, avalia a recomposição pela fonte principal, a transferência por alimentadores de reserva e o atendimento por REDs e microrredes. A decisão de aceitar uma restauração temporária considera os perfis de demanda, a geração fotovoltaica, a disponibilidade de recursos despacháveis, o estado de carga dos sistemas de armazenamento, a reserva de capacidade dos alimentadores e a duração requerida até o reparo. O tempo de reparo é condicionado ao horário de início da ocorrência.

Os resultados de cada evento são consolidados em estruturas espaço-temporais. A Matriz dos Tempos de Interrupção dos Blocos (MTIB) registra a duração atribuída a cada BL sob cada contingência e condição temporal; a Matriz Binária de Interrupções Permanentes (MBIP) identifica a incidência das interrupções relevantes ao cálculo de frequência. Em conjunto com as taxas de falha dos elementos, o número de consumidores, as cargas e as funções de custo da interrupção, essas estruturas permitem calcular a Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC), a Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC), a Energia Não Distribuída (END) e o Custo da Interrupção ao Consumidor (CIC). A formulação separa a probabilidade de ocorrência do evento de sua consequência restauradora e conserva a origem de cada contribuição aos indicadores.

A ISRM é integrada ao *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm* II (NSGA-II) para apoiar o planejamento da automação. Cada indivíduo codifica uma configuração candidata que pode instalar novas chaves seccionadoras automáticas em posições elegíveis e substituir chaves manuais existentes por novas unidades automáticas. A ISRM avalia operacionalmente essa configuração; o módulo econômico calcula o investimento; e o algoritmo procura soluções não dominadas que conciliem DEC, CIC e dispêndio de capital (CAPEX), respeitando a restrição orçamentária. O NSGA-II constitui o mecanismo de busca multiobjetivo, e não, isoladamente,

a contribuição científica: o diferencial reside na avaliação integrada, espaço-temporal e contingencial a que cada plano é submetido (DEB et al., 2002).

Os estudos de caso são empregados para verificar a consistência topológica e temporal da metodologia, quantificar o efeito incremental dos recursos restauradores e examinar os compromissos entre continuidade e investimento. A análise não pressupõe que uma única configuração seja universalmente ótima. Ao produzir uma fronteira de Pareto, busca-se explicitar alternativas de planejamento com diferentes níveis de automação e benefício, de modo que a decisão final possa incorporar orçamento, prioridades regulatórias e critérios da concessionária. A tese, desse modo, articula operação e planejamento: decisões de investimento são avaliadas pelas sequências de restauração que efetivamente habilitam sob condições variáveis de operação.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A continuidade do serviço é resultado de decisões tomadas em escalas distintas. No curto prazo, a concessionária precisa isolar a falta e utilizar a flexibilidade disponível; no longo prazo, deve decidir onde instalar automação e quais dispositivos manuais substituir. Se o modelo de planejamento representar a restauração por tempos médios uniformes ou por um único ponto de operação, parte do valor técnico dos investimentos pode ser superestimada ou subestimada. Uma chave automática só produz benefício quando sua posição modifica uma fronteira relevante e quando existe uma alternativa de suprimento capaz de sustentar a parcela separada da região defeituosa.

A necessidade de uma avaliação integrada torna-se mais evidente em redes ativas. Capacidade nominal de um alimentador de reserva não equivale à capacidade disponível no instante da falta; potência fotovoltaica instalada não equivale à geração durante toda a interrupção; e energia armazenada não garante atendimento se limites de potência, estado de carga e duração forem ignorados. Da mesma forma, a formação de uma microrrede não é uma propriedade permanente da região: depende da presença de recurso formador, das condições de ilhamento e da sustentabilidade do balanço energético ao longo do evento. A coordenação desses fatores requer uma representação comum, capaz de transferir resultados operacionais para os índices de confiabilidade.

Também se justifica preservar a localização da contingência durante todo o cálculo. Índices agregados são construídos pela soma das contribuições de falhas distintas; perder a identidade do elemento de origem ou atribuir um único tempo a toda a área interrompida impede

explicar por que determinado investimento reduz DEC ou CIC. Uma metodologia rastreável deve relacionar cada taxa de falha aos consumidores efetivamente afetados e ao tempo de interrupção resultante das ações disponíveis. Essa decomposição é indispensável tanto à validação científica quanto à interpretação das soluções de planejamento.

A ISRM é proposta para preencher essa interface metodológica. Sua justificativa não se limita a acrescentar variáveis a um modelo de restauração, mas a estabelecer uma arquitetura na qual representação topológica, cronologia, recursos de suprimento, confiabilidade e otimização utilizem unidades e estados compatíveis. A expectativa é que essa integração permita discriminar planos de automação que parecem equivalentes em modelos estáticos, revelar a dependência temporal de seus benefícios e oferecer ao planejador uma fronteira de alternativas tecnicamente explicável.

## 1.2 OBJETIVOS

Esta tese tem como objetivo geral desenvolver uma metodologia integrada para a modelagem, a avaliação e a otimização da restauração de redes de distribuição inteligentes, denominada *Integrated Smart Restoration Methodology (ISRM)*. Esta metodologia deve ser capaz de representar dinamicamente o processo de restauração, incorporar a influência das condições espaço-temporais de operação e subsidiar o planejamento ótimo da automação da rede.

Como objetivos específicos podemos listar:

- Propor uma representação hierárquica da rede baseada em blocos, superblocos e hiperblocos, estabelecendo a estrutura física eficiente no processo de restauração.
- Incorporar ao processo de restauração a influência das condições operacionais dependentes do tempo, considerando perfis horários de demanda, capacidade disponível dos alimentadores vizinhos, geração fotovoltaica, estado de carga dos sistemas de armazenamento e tempo médio de reparo variável.
- Modelar a confiabilidade da rede por meio de matrizes dinâmicas dependentes da localização da contingência, permitindo a avaliação espaço-temporal dos impactos das interrupções sobre os consumidores.
- Desenvolver uma metodologia de restauração inteligente que integre operações automáticas e manuais de chaves seccionadoras, para a transferência de blocos de carga para alimentadores vizinhos ou para a utilização de recursos energéticos distribuídos ou para a formação de microrredes.

- Integrar a ISRM a um algoritmo de otimização multiobjetivo baseado no NSGA-II para determinar a alocação de chaves de seccionamento automático, visando melhorar indicadores de confiabilidade e atendendo às restrições orçamentárias da rede de distribuição.

# 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo desenvolve uma leitura crítica da literatura que sustenta a ISRM. A organização não reproduz a arquitetura do método como uma enumeração de componentes; acompanha, em vez disso, a evolução das questões científicas que convergem no problema: como representar a rede depois de uma falta, como transformar sequências restauradoras em indicadores, como valorar a automação e como explorar o espaço de decisões sem confundir o algoritmo de busca com o modelo de avaliação.

O critério de comparação considera quatro perguntas: qual decisão o estudo apoia; quais recursos e estados operacionais representa; em que escala temporal produz resultados; e como conecta a localização da contingência aos índices de continuidade. A literatura revela avanços substanciais em cada dimensão, mas também uma divisão persistente entre modelos de operação, confiabilidade e planejamento. É nessa interseção — e não na ausência de técnicas individuais — que se posiciona a contribuição desta tese.

## 2.1 TRANSFORMAÇÃO DAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO E REPRESENTAÇÃO OPERACIONAL

A distribuição radial foi historicamente analisada a partir de um fluxo principal de potência, proteções coordenadas em sentido montante–jusante e alternativas limitadas de transferência. Nessa configuração, barras, ramos, alimentadores e zonas de proteção fornecem uma descrição suficiente para grande parte dos cálculos elétricos. A incorporação de geração distribuída, armazenamento, dispositivos telecomandados e conexões normalmente abertas altera essa premissa: o sentido do fluxo pode variar, regiões podem ser ilhadas e o estado operativo passa a depender da disponibilidade de recursos e da sequência de chaveamentos (LOTFI et al., 2024; BISWAS et al., 2025).

Modelos de reconfiguração, em geral, mantêm barras e ramos e impõem radialidade, limites de tensão e capacidade. Essa granularidade é necessária para verificar a viabilidade elétrica, mas pode ser excessiva em avaliações repetidas de muitas contingências e insuficiente para atribuir um único tempo a consumidores restaurados pela mesma ação. Estudos de confiabilidade recorrem a seções, zonas ou conjuntos de carga, reduzindo o problema, porém frequentemente predefinem essas agregações. Modelos de alocação de chaves, por sua vez, fazem da posição do dispositivo uma variável que modifica a própria divisão em seções, o que

exige reconstruir os efeitos de cada solução candidata (LEVITIN; MAZAL-TOV; ELMAKIS, 1995; USBERTI et al., 2025).

Trabalhos recentes aperfeiçoam relações entre dispositivos e parcelas da rede. Usberti et al. (2025) exploram a estrutura do problema de seccionamento para construir um algoritmo exato em tempo polinomial; Assis et al. (2025) avaliam alocações na presença de geração distribuída; e da Cruz, Haffner e Resener (2026) incorporam microrredes e interligações à avaliação de confiabilidade. Cada formulação utiliza uma agregação coerente com sua decisão principal, mas não se destina a acompanhar, em uma única estrutura, regiões formadas sucessivamente por proteção, manobra, transferência e ilhamento.

A representação por BLs, SBs e HBs adotada na ISRM responde a essa necessidade específica. O BL conserva a granularidade para associar carga, consumidores, comprimento e taxa de falha. O SB é formado após a contingência segundo as fronteiras operacionais efetivas e constitui uma unidade para testar alternativas de restauração. O HB agrega temporariamente SBs que passam a compartilhar fonte, sequência de manobra ou condição de atendimento. A hierarquia não substitui o modelo elétrico; organiza a lógica de restauração e a atribuição de consequências, permitindo retornar os resultados agregados aos BLs sem perder a origem da contingência.

## 2.2 CONFIABILIDADE, RESILIÊNCIA E AVALIAÇÃO DAS INTERRUPÇÕES

Confiabilidade e resiliência são conceitos relacionados, mas não intercambiáveis. A confiabilidade concentra-se no desempenho do serviço diante do conjunto de falhas considerado e é expressa por frequências, durações, energia não suprida e custos. A resiliência enfatiza a capacidade de antecipar, absorver, adaptar-se e recuperar-se de perturbações, sobretudo eventos raros, severos ou correlacionados. Stanković et al. (2023) mostram que a quantificação da resiliência depende da trajetória de degradação e recuperação, enquanto Babu et al. (2025) sistematizam métricas e estratégias que extrapolam médias anuais. Para esta tese, a restauração é o elo entre os dois domínios: melhora os indicadores de continuidade e constitui uma capacidade de recuperação da rede.

Na avaliação analítica tradicional, a contribuição de um componente combina taxa de falha, conjunto de cargas interrompidas e duração da interrupção. O procedimento é conceitualmente sólido, mas sua resolução depende de como se representa a sequência pós-falta. Se todos os consumidores a jusante receberem o tempo de reparo, o benefício do seccionamento será omitido. Se toda a carga sã receber um tempo de chaveamento ideal, podem

ser ignoradas limitações de transferência ou etapas manuais. A qualidade do índice agregado, portanto, decorre das durações atribuídas a cada grupo de consumidores.

Billinton e Jonnavithula (1996) já associavam o posicionamento de dispositivos a custos de interrupção calculados com funções de dano dos consumidores e níveis discretos de carga. Abordagens posteriores incorporaram risco financeiro, restrições de orçamento e modelos de maior precisão (IZADI; SAFDARIAN, 2019; SHAHBAZIAN et al., 2020). Omri et al. (2024) avançam na direção cronológica ao representar microrredes em uma avaliação analítica, evidenciando que a estratégia de operação modifica os índices. Da Cruz, Haffner e Resener (2026) formulam um modelo de programação linear inteira mista (*mixed-integer linear programming* — MILP) para a confiabilidade de redes ativas com microrredes. Esses estudos demonstram que a restauração pode ser incorporada ao cálculo, embora com diferentes simplificações temporais e operacionais.

Outra vertente parte da sequência de recuperação. Bian et al. (2022) coordenam restauração e avaliação de danos para sistemas resilientes; Sperr et al. (2024) distinguem comandos remotos, operações manuais e deslocamentos ao minimizar a contribuição ao *System Average Interruption Duration Index* (SAIDI) depois de falhas em subestações primárias. Esse nível de detalhe torna explícito que a duração não é propriedade exclusiva do componente falhado: ela resulta da ação que normaliza cada região. Ainda assim, modelos operacionais detalhados nem sempre são repetidos para o conjunto anual de contingências e horários necessário ao planejamento.

A ISRM, proposta neste trabalho, separa três grandezas que modelos agregados podem confundir. A taxa de falha pertence ao elemento de origem; a incidência da interrupção indica quais BLs são alcançados pelo evento; e a duração da interrupção é consequência da sequência restauradora disponível para cada BL. A MBIP preserva a segunda relação, e a MTIB registra a terceira. Essa decomposição permite somar contribuições de forma consistente e investigar a causa de cada parcela do FEC, DEC, END ou CIC.

O componente temporal amplia essa decomposição. A mesma contingência pode encontrar diferentes demandas, reservas, gerações e estados de carga; além disso, o tempo de reparo pode variar com o horário de início. Em vez de tornar a taxa de falha dependente da localização do consumidor, a metodologia altera a matriz de consequências condicionada à origem e ao horário do evento. Essa distinção sustenta a rastreabilidade probabilística e evita atribuir ao processo físico de falha uma variação que pertence ao processo de restauração.

## 2.3 RECONFIGURAÇÃO E RESTAURAÇÃO SEQUENCIAL

A automação da distribuição consolidou a cadeia FLISR como referência para autorrecuperação. Sensores e indicadores reduzem a incerteza sobre a localização da falta; dispositivos eletrônicos inteligentes executam proteção e comando; meios de comunicação viabilizam operação remota; e sistemas de gestão selecionam manobras de isolamento e recomposição. O benefício potencial é reduzir a área afetada e substituir tempos de deslocamento por tempos de telecomando. Contudo, a simples presença de uma chave automática não garante melhoria: o dispositivo precisa ocupar uma fronteira útil, coordenar-se com a proteção e dispor de caminho alternativo viável.

Lu et al. (2024) propõem uma avaliação de capacidade de autorrecuperação em redes ativas, e Orozco Henao et al. (2026) mostram que a alocação coordenada de dispositivos eletrônicos inteligentes e indicadores de falta influencia o desempenho do FLISR. Esses trabalhos evidenciam que observabilidade, proteção e manobra são interdependentes. Para o planejamento, isso significa que o valor marginal de um dispositivo varia com os demais componentes instalados e com a região que ele permite separar.

Restauração e reconfiguração não são sinônimas. A reconfiguração procura uma topologia admissível, frequentemente em um estado de regime permanente. A restauração inclui a cronologia necessária para alcançar essa topologia e deve lidar com consumidores que permanecem interrompidos entre etapas. Uma solução final eletricamente viável pode ser operacionalmente inviável se exigir fechar uma chave antes de isolar a falta, se pressupor telecomando em dispositivo manual ou se ignorar o deslocamento necessário. A ordem das ações interfere diretamente nas durações acumuladas.

Sperr et al. (2024) tratam essa ordem ao diferenciar restauração remota e manual e incorporar tempos de viagem. Ettehad, Mohammadi Chabanloo e Amshi (2024) coordenam alocação de chaves, restauração e reparo em condições normais e de furacão, considerando acesso, equipes e depósitos. Li et al. (2025) formulam uma estratégia multiestágio que articula geração distribuída, chaves controladas remotamente e chaves manuais antes, durante e depois de eventos severos. A literatura, portanto, já reconhece a necessidade de múltiplas etapas; as diferenças concentram-se no modo como suas durações são parametrizadas e na escala em que os resultados são usados.

Na ISRM, as etapas automáticas e manuais são complementares e explicitamente ordenadas. A restauração a montante e a jusante é avaliada conforme a posição da falta, e cada região recebe o tempo da ação que efetivamente restabelece seu fornecimento. Alimentadores

de reserva são priorizados segundo sua disponibilidade; operações automáticas precedem intervenções locais quando aplicável; e a parcela residual permanece associada ao reparo. Essa construção não busca reproduzir todas as rotinas de um sistema de gestão da distribuição, mas manter o detalhe necessário para converter o processo operacional em consequências de confiabilidade.

O tempo de reparo merece tratamento separado dos tempos de manobra. Estudos de planejamento frequentemente usam um valor médio; modelos de eventos severos podem incluir cenários, acesso e equipes; e formulações sequenciais computam deslocamentos. A implementação desta tese adota uma função do horário de início da falta, capaz de representar, por exemplo, diferentes condições de mobilização, que permite avaliar como a duração esperada do reparo modifica o valor dos tempos de restaurações.

## 2.4 REDS, ARMAZENAMENTO E MICRORREDES NA RESTAURAÇÃO

Os REDs transformam regiões interrompidas em candidatas a atendimento local, mas apenas quando sua capacidade é compatível com a carga e com a duração da interrupção. Recursos despacháveis podem fornecer potência conforme disponibilidade de combustível ou limites operacionais; sistemas fotovoltaicos são intermitentes; e baterias transferem energia no tempo, sujeitas a limites de carga, descarga, eficiência e estado de carga. Tratar todos esses recursos como geração firme superestima a restauração; descartá-los do cálculo, por outro lado, subestima a flexibilidade de redes ativas.

Akhtarshenas et al. (2024) integram renováveis ao planejamento da operação resiliente, Rajić e Stojanović (2025) coordenam reconfiguração, compensação reativa e armazenamento, e Hu et al. (2026) apresentam reconfiguração dinâmica multiobjetivo com dispositivos de interconexão e armazenamento diante da desconexão de geração crítica. Os estudos convergem na necessidade de representação horária e de balanço de potência, mas seu foco principal é a operação otimizada de recursos em horizontes selecionados.

Para a confiabilidade, o desafio consiste em propagar essa operação até a duração de interrupção. Omri et al. (2024) mostram que modelos cronológicos de microrredes modificam a avaliação analítica. Da Cruz, Haffner e Resener (2026) integram microrredes e interligações em um modelo de confiabilidade. Essas contribuições afastam a hipótese de disponibilidade permanente, mas não têm como decisão central a configuração combinada de novas chaves automáticas e substituições de dispositivos manuais avaliada repetidamente sob todos os horários de contingência.

A microrrede acrescenta requisitos que excedem a soma das potências instaladas. O ilhamento requer, no mínimo, uma referência formadora de tensão e frequência compatível com as premissas adotadas; o conjunto de cargas deve respeitar o orçamento de potência; e o atendimento precisa ser sustentável durante o intervalo necessário. Wang et al. (2025) incorporam restrições de frequência e fronteiras dinâmicas ao sequenciamento de restauração em microrredes interconectadas. Shimillas et al. (2025) antecipam a formação de microrredes em rede e coordenam o gerenciamento energético. Esses modelos oferecem detalhe operativo relevante, mas seu custo computacional e seus objetivos diferem dos de uma avaliação anual de planos de automação.

A ISRM posiciona REDs e microrredes como alternativas dentro da sequência restauradora. Uma região isolada é expandida segundo conectividade e dispositivos disponíveis; sua aceitação depende do balanço energético nas condições do horário da falta e da permanência do atendimento ao longo do período avaliado. A modelagem não pretende substituir estudos de estabilidade, controle primário ou transitórios de ilhamento. Ela estabelece condições de elegibilidade e sustentabilidade compatíveis com o nível de planejamento, declarando os limites do modelo em vez de atribuir viabilidade dinâmica não demonstrada.

A integração com alimentadores de reserva é igualmente importante. A capacidade de transferência é calculada a partir da reserva disponível, e não da potência nominal isoladamente. Em consequência, um mesmo hiperbloco - HB pode ser restaurado pelo alimentador em uma hora, por recursos locais em outra e permanecer interrompido em uma terceira. A vantagem metodológica está em conservar essa alternância até os indicadores: o benefício anual de uma chave emerge da distribuição de contingências e contextos, e não de um cenário de carga único.

## 2.5 EVOLUÇÃO DA ALOCAÇÃO DE CHAVES E AVALIAÇÃO ECONÔMICA DE CHAVES

O posicionamento de dispositivos de seccionamento constitui um problema clássico de planejamento da distribuição. Sua evolução revela uma ampliação gradual das decisões e das consequências representadas. Levitin, Mazal-Tov e Elmakis (1995) empregaram algoritmo genético binário para minimizar energia não suprida e duração média, tratando dois problemas: a alocação de uma quantidade previamente especificada de seccionadores com interligações dadas e a alocação de quantidades especificadas de seccionadores e interligações. Uma versão modificada do algoritmo preserva a factibilidade dos indivíduos. O estudo demonstra a aptidão

dos algoritmos evolutivos para a natureza combinatória do problema, mas adota hipóteses como ausência de limites de capacidade nas linhas e confiabilidade perfeita dos seccionadores.

Billinton e Jonnavithula (1996) utilizaram *simulated annealing* para determinar número e localização de dispositivos em sistemas radiais, minimizando a soma de custos de investimento, manutenção e interrupção. A valoração emprega funções de dano dos consumidores e níveis de carga, estabelecendo conexão direta entre a posição da chave e a consequência econômica das falhas. Os autores indicam que a formulação poderia ser estendida à seleção de uma combinação de dispositivos manuais e automáticos; essa combinação, entretanto, não é demonstrada nos estudos de caso do artigo. A distinção é relevante para evitar atribuir ao trabalho um escopo experimental maior que o efetivamente apresentado.

A partir dessas bases, formulações exatas e de risco ampliaram o planejamento. Izadi e Safdarian (2019) incorporaram risco financeiro com programação inteira mista e *conditional value-at-risk*. Shahbazian, Fereidunian e Manshadi (2020) propuseram um MILP de alta precisão que distingue chaves manuais e automáticas e integra custo total, SAIDI, custo de interrupção, orçamento e horizonte de planejamento. Usberti et al. (2025) exploraram propriedades estruturais para obter um algoritmo exato em tempo polinomial no problema de alocação de seccionadores. Esses métodos oferecem garantias e precisão em formulações específicas, mas exigem que a resposta restauradora seja representada por relações tratáveis no modelo.

O avanço dos algoritmos evolutivos permitiu incluir múltiplos objetivos e cenários. Costa, Bessani e Batista (2022) empregaram NSGA-II para minimizar SAIDI e custo total na alocação de dispositivos de proteção e chaves; sobre o conjunto não dominado, um procedimento multicritério apoia a escolha considerando também energia não suprida, custo esperado da interrupção e *Momentary Average Interruption Frequency Index* (MAIFI). O trabalho articula otimização multiobjetivo e decisão multicritério, mas trata geração distribuída, ilhamento e restauração conjunta como extensões futuras. Gangwar et al. (2022) alocaram chaves seccionadoras e de interligação controladas remotamente em redes desequilibradas, com incertezas de carga, geração fotovoltaica e eólica, perdas, custo e carga restaurada, usando NSGA-II e uma variante modificada. O resultado mostra a flexibilidade da abordagem evolutiva, sem eliminar a dependência do desempenho em relação ao modelo restaurador usado na avaliação.

Caetano et al. (2023) aproximam-se do problema de modernização ao selecionar substituições de chaves manuais por chaves controladas remotamente. O método combina

algoritmo genético, simulação de Monte Carlo e atualização bayesiana, incorporando incertezas de carga, falhas e tempo de reparo. Como a decisão se restringe a posições existentes, não abrange simultaneamente a instalação de novos dispositivos em trechos sem chave. Yang et al. (2023) estudam a implantação conjunta de chaves remotas e soft open points com orientação à resiliência; Amjadian et al. (2024) integram confiabilidade e resiliência; e Assis et al. (2025) examinam algoritmos evolutivos em redes com geração distribuída. Em conjunto, esses estudos ampliam recursos e critérios, mas conservam diferentes abstrações para a cronologia da restauração.

O custo de automação inclui mais do que o preço do equipamento. Aquisição, instalação, comunicação, integração, operação e manutenção podem influenciar a atratividade de uma solução, enquanto o benefício econômico decorre da redução do custo das interrupções e, conforme o escopo, de perdas ou outras parcelas. O relatório *Costs and Benefits of Smart Feeder Switching* oferece valores e categorias de custo para automação de alimentadores (PINNEY, 2014). Na tese, esses dados sustentam a parametrização das ações de instalar uma nova chave seccionadora automática e substituir uma chave manual por uma nova unidade automática, sem presumir que valores de outros sistemas sejam universalmente transferíveis.

A evolução histórica indica que não existe uma única lacuna denominada “alocação ótima de chaves”. Número, posição, tecnologia, orçamento, risco, incerteza e múltiplos objetivos já foram abordados. A questão específica da ISRM é como valorar cada configuração quando o benefício depende de fronteiras restauráveis dinâmicas, perfis horários, recursos de apoio e sequência automática–manual.

## 2.6 ALGORITMOS GENÉTICOS, OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO E NSGA-II

Algoritmos genéticos (AGs) são métodos populacionais de busca inspirados nos mecanismos de seleção e variação. Uma solução é codificada como indivíduo; uma população é avaliada; operadores de seleção privilegiam indivíduos segundo sua aptidão; recombinação e mutação produzem novas alternativas; e critérios de sobrevivência definem a geração seguinte. Goldbarg et al. (2016, p. 113–123) situam os AGs no campo da computação evolucionária e destacam codificação, população inicial, seleção, cruzamento, mutação e ajuste de parâmetros, bem como o equilíbrio entre diversificação e intensificação. A mutação com taxa da ordem de 1/n, o torneio binário e mecanismos elitistas são apresentados como referências usuais, não como valores universais independentes do problema.

A adequação dos AGs à alocação de dispositivos decorre de sua capacidade de manipular decisões discretas sem exigir derivadas ou convexidade. O cromossomo pode indicar posições ativadas, tecnologias escolhidas ou substituições executadas. Levitin, Mazal-Tov e Elmakis (1995) constituem uma aplicação precursora desse princípio ao seccionamento radial. A vantagem, contudo, vem acompanhada de uma obrigação metodológica: a codificação e os operadores devem preservar ou reparar factibilidade, e a função de avaliação precisa distinguir corretamente indivíduos com efeitos topológicos diferentes.

Problemas multiobjetivo não se reduzem, em geral, a uma soma ponderada sem perda de informação. Quando DEC, CIC e CAPEX são conflitantes, a dominância de Pareto permite identificar soluções para as quais nenhum objetivo pode ser melhorado sem piorar pelo menos outro. O resultado é um conjunto de compromissos, e não uma resposta única. Essa representação é particularmente adequada ao planejamento regulado, no qual limites orçamentários, metas de continuidade e aversão a custos de interrupção podem mudar sem alterar o modelo físico.

Deb et al. (2002) propuseram o NSGA-II para enfrentar limitações de algoritmos multiobjetivo anteriores. O método combina ordenação rápida por não dominância, elitismo pela união das populações de pais e descendentes e preservação de diversidade por distância de aglomeração, dispensando um parâmetro de compartilhamento. A seleção favorece menor nível de dominância e, dentro da mesma frente, regiões menos congestionadas. O procedimento também inclui tratamento de restrições. Essas propriedades explicam sua adoção em problemas de engenharia com variáveis discretas e frentes potencialmente não convexas.

Aplicações como as de Costa, Bessani e Batista (2022) e Gangwar et al. (2022) confirmam que o NSGA-II já integra o repertório da alocação de dispositivos em redes de distribuição. O desempenho e a relevância das soluções dependem daquilo que ocorre entre a decodificação do cromossomo e a atribuição dos objetivos.

Na formulação desta tese, cada indivíduo modifica a disponibilidade e o tempo de atuação de dispositivos. A rede resultante é então submetida à ISRM para todas as contingências e condições temporais previstas. A função avaliadora forma SBs e HBs, executa as etapas restauradoras, verifica os recursos energéticos, atualiza MTIB e MBIP e calcula DEC e CIC; em paralelo, o CAPEX e o orçamento são determinados pelas ações de instalação e substituição. O NSGA-II organiza a exploração e preserva compromissos, enquanto a ISRM fornece o conteúdo físico e operacional dos objetivos.

Essa separação conceitual também orienta a validação. Parâmetros populacionais, operadores e critérios de parada devem ser examinados quanto à convergência e à diversidade, mas não substituem testes de consistência da função avaliadora. Casos controlados precisam verificar isolamento, sequência de manobras, balanço energético, permanência da restauração e composição dos indicadores. Somente depois dessas verificações a fronteira de Pareto pode ser interpretada como evidência sobre o planejamento da automação, e não como artefato de uma implementação opaca.

## 2.7 SÍNTESE CRÍTICA E POSICIONAMENTO DA ISRM

A revisão mostra uma trajetória de crescente integração. Estudos clássicos relacionaram seccionamento a duração, energia não suprida e custo; formulações exatas incorporaram tecnologia, orçamento e risco; métodos evolutivos passaram a tratar múltiplos objetivos e incertezas; e modelos operacionais recentes detalharam recursos distribuídos, microrredes, equipes e sequências de restauração. Não obstante, a integração permanece parcial porque cada vertente adota uma unidade espacial, uma escala temporal e uma saída compatíveis com sua finalidade imediata.

A primeira lacuna relevante é espacial. A localização da falta determina a atuação da proteção, a região inicialmente interrompida, as fronteiras disponíveis para manobra e as fontes alternativas. Agregações estáticas não acompanham necessariamente a formação e a dissolução dessas regiões. A hierarquia BL–SB–HB busca preencher essa lacuna ao combinar rastreabilidade elementar e agregação operacional dinâmica.

A segunda lacuna é temporal. Perfis de demanda, geração fotovoltaica, estado de carga e reserva de alimentadores aparecem em modelos de operação; tempos de reparo, manobra e deslocamento aparecem em modelos de restauração; índices anuais aparecem em modelos de confiabilidade. Poucos trabalhos vinculam simultaneamente dessas grandezas ao horário de cada contingência e propagam seu efeito por todas as etapas até DEC e CIC. A ISRM realiza essa vinculação e explicita que o reparo varia com o horário de início, não com a distância à subestação.

A terceira lacuna é a articulação dos recursos. Automação, ações manuais, fonte principal, alimentadores de reserva, geração distribuída, armazenamento e microrredes são frequentemente examinados em combinações parciais. O benefício de um recurso, porém, depende da ordem em que os demais são mobilizados e da parcela residual que permanece

interrompida. A avaliação integrada evita contabilização dupla de cargas restauradas e atribui a cada BL o tempo correspondente à alternativa que efetivamente o atende.

A quarta lacuna situa-se na interface entre avaliação e otimização. A literatura já oferece AGs, NSGA-II, MILP e algoritmos exatos para alocação de chaves. O ponto crítico é a fidelidade e a auditabilidade da função usada para calcular os objetivos de cada plano. Na tese, a inovação metodológica está no acoplamento da ISRM ao processo de busca, de modo que novas instalações e substituições sejam comparadas pelo efeito que produzem sobre cenários localizados e horários, e não por benefícios médios presumidos.

Com base nessas lacunas, a ISRM é posicionada como uma metodologia de integração entre operação restauradora, avaliação de confiabilidade e planejamento da automação. Ela não substitui modelos especializados de proteção, estabilidade de microrredes, despacho ou logística de equipes; incorpora, no nível de abstração declarado, as condições necessárias para que seus efeitos sejam refletidos nos indicadores. Seus resultados devem, portanto, ser interpretados dentro dessas fronteiras e validados por consistência, sensibilidade e comparação de cenários.

# 3 METODOLOGIA INTEGRADA DE RESTAURAÇÃO INTELIGENTE

Este capítulo apresenta a Metodologia Integrada de Restauração Inteligente, denominada neste trabalho *Integrated Smart Restoration Methodology* (ISRM). A metodologia foi desenvolvida para representar, de forma integrada, a dinâmica operacional da restauração de redes de distribuição inteligentes, incorporando simultaneamente a estrutura hierárquica da rede, a evolução espaço-temporal das condições operacionais e a avaliação dinâmica da confiabilidade.

Diferentemente das abordagens tradicionais, nas quais a modelagem da rede, a restauração do sistema, a avaliação da confiabilidade e a otimização são frequentemente tratadas como etapas independentes, a ISRM integra esses processos em um único *framework* computacional. Dessa forma, cada configuração candidata de automação é avaliada considerando explicitamente: a evolução da rede durante contingências; as condições operacionais existentes no instante da falta e; os impactos sobre os indicadores de continuidade e energéticos.

A metodologia está organizada em três módulos principais. Inicialmente, a rede é representada por uma estrutura hierárquica baseada em blocos de carga. Em seguida, para cada contingência simulada, são executadas as etapas de isolamento da região sob falta, formação dinâmica de superblocos, execução das estratégias de restauração e atualização das matrizes de confiabilidade. Paralelamente, a modelagem espaço-temporal incorpora a variação horária da demanda, da geração fotovoltaica, do estado de carga dos sistemas de armazenamento, da reserva dos alimentadores vizinhos e do tempo médio de reparo. Ao final do processo, os indicadores de continuidade obtidos subsidiam a etapa de otimização multiobjetivo responsável pela determinação do plano ótimo de automação da rede.

## 3.1 ARQUITETURA CONCEITUAL DA ISRM

A Figura 1 resume a arquitetura proposta nesta tese. Observa-se que a ISRM é fundamentada em três pilares complementares.

O primeiro pilar corresponde à representação hierárquica da rede, responsável por gerenciar os blocos de carga durante o processo de restauração. O segundo pilar corresponde à modelagem espaço-temporal. Sua principal função é incorporar ao processo de restauração as condições operacionais existentes no instante da contingência, incluindo perfil horário de carga, disponibilidade dos recursos energéticos distribuídos, estado de carga dos sistemas de

armazenamento e tempo médio de reparo. O terceiro pilar corresponde à avaliação dinâmica da confiabilidade, responsável pela atualização contínua das matrizes de confiabilidade e pelo cálculo dos indicadores utilizados durante a otimização.

A integração desses três pilares constitui o núcleo conceitual da ISRM, permitindo representar de forma consistente a interação entre a estrutura física da rede, o contexto operacional e o desempenho da restauração.

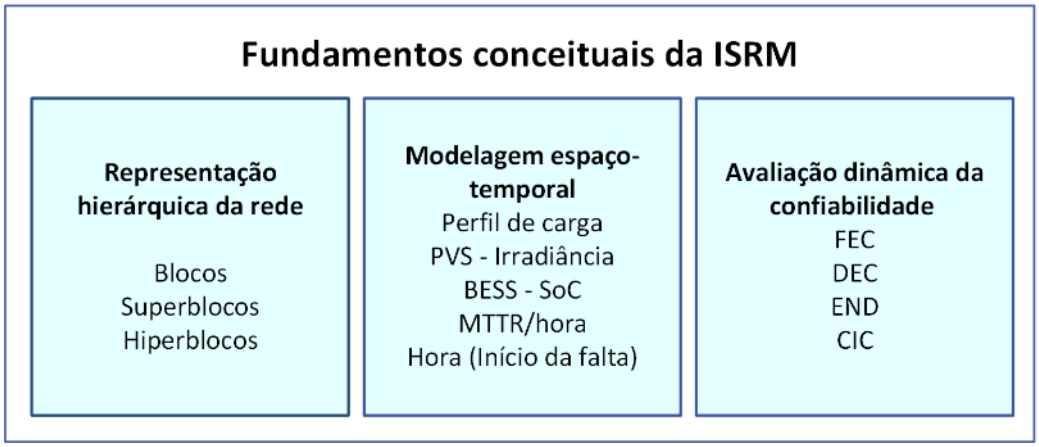



Figura 1- Arquitetura conceitual da Integrated Smart Restoration Methodology (ISRM).
Fonte: Elaborada pelo autor

## 3.2 PROCESSO INTEGRADO DE CONTINGÊNCIAS E RESTAURAÇÃO

Diferentemente das metodologias convencionais, nas quais a restauração é analisada para um único estado operacional da rede, a metodologia proposta considera explicitamente a evolução temporal das condições de operação ao longo de um ciclo diário. Para cada configuração candidata de automação, a simulação é organizada em dois níveis aninhados de repetição.

O primeiro nível corresponde ao loop externo, executado para os vinte e quatro patamares horários do dia. Em cada patamar, são atualizados o perfil de carga da rede, a capacidade disponível dos alimentadores de reserva, a geração fotovoltaica, o estado de carga dos sistemas de armazenamento e o tempo médio de reparo correspondente ao horário analisado.

O segundo nível corresponde ao loop interno de contingências, executado no interior de cada patamar horário. Nesse nível, cada bloco de carga da rede é considerado, sucessivamente, como o bloco que contém a origem de uma falta permanente. Para cada contingência, ocorre inicialmente a atuação do respectivo dispositivo de proteção, seguida pela identificação dos

blocos interrompidos, pela formação dinâmica dos superblocos e pela execução do processo integrado de restauração.

Durante esse processo, são avaliadas, de forma coordenada, as alternativas disponíveis para o restabelecimento do fornecimento de energia por meio de operações automáticas e manuais dos dispositivos de manobra. Essas operações permitem restaurar o maior número possível de consumidores por meio da fonte principal, dos alimentadores de reserva, dos recursos energéticos distribuídos e da formação de microrredes.

À medida que cada contingência é processada, são atualizadas as matrizes de confiabilidade que registram as dependências entre os blocos, a classificação das interrupções e os respectivos tempos efetivos de desligamento.

Concluída a simulação de todas as contingências de determinado patamar horário, essas matrizes são utilizadas para calcular as contribuições horárias dos indicadores de continuidade. O procedimento é repetido para os vinte e quatro patamares do dia, produzindo os valores horários de FEC, DEC, END e CIC.

Os valores horários são agregados para a obtenção dos indicadores diários e posteriormente anualizados. Os indicadores anuais constituem as funções objetivo utilizadas pelo módulo de otimização multiobjetivo para avaliar cada configuração candidata de automação da rede. Enquanto o critério de parada não for satisfeito, o módulo de otimização gera uma nova configuração, que é novamente submetida ao processo completo de simulação horária e de contingências. Ao final, são obtidas as configurações não dominadas que representam os compromissos entre os objetivos considerados.

O fluxo operacional completo da metodologia, abrangendo a geração das configurações candidatas, os loops horário e de contingências, o cálculo dos indicadores e o retorno dos resultados ao módulo de otimização, é apresentado na Figura 2.

A estrutura proposta permite avaliar diferentes configurações de automação sob condições operacionais realistas, considerando simultaneamente a evolução da topologia da rede, a disponibilidade dos recursos de restauração e a variabilidade temporal do sistema elétrico.

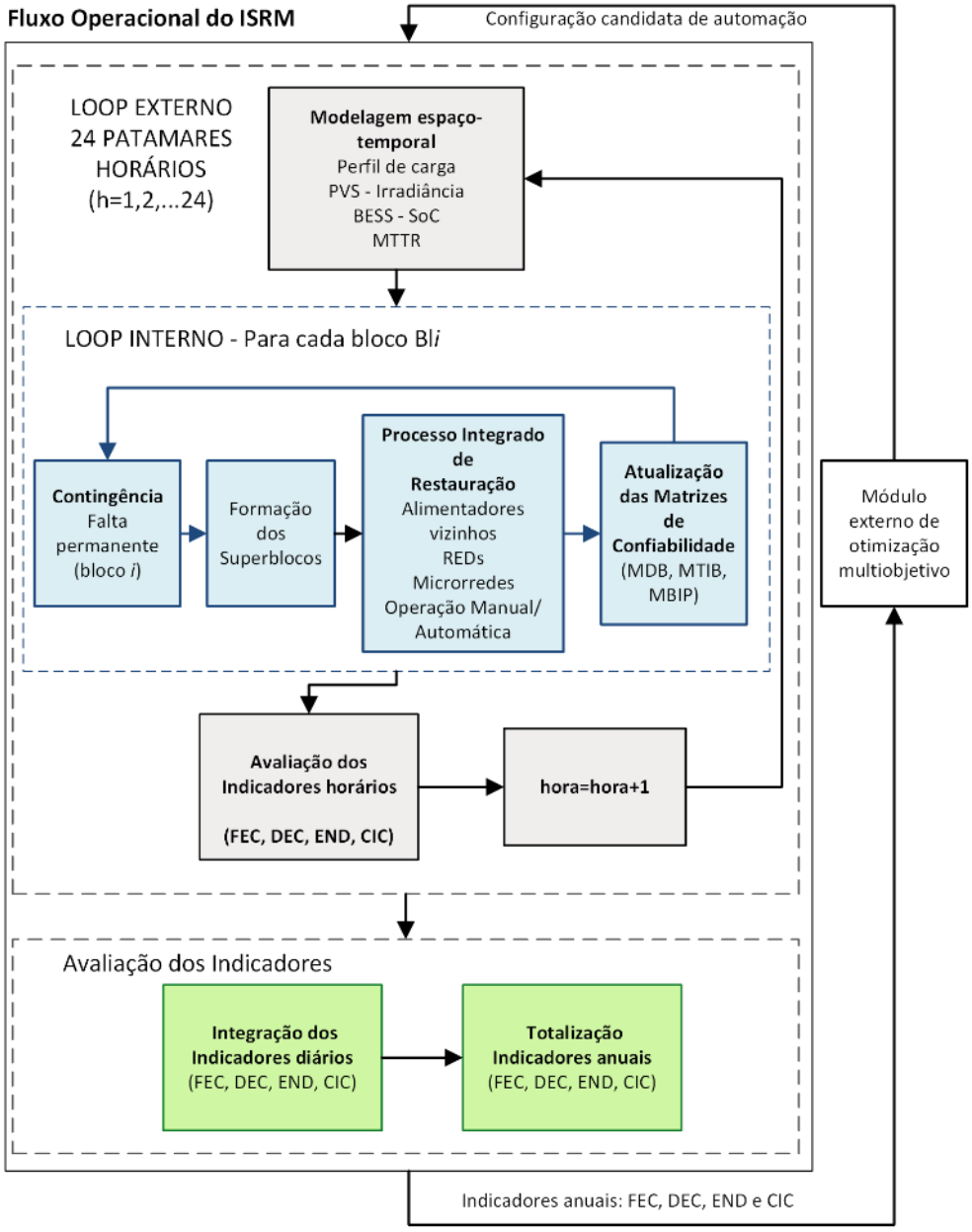



Figura 2 - Fluxo operacional completo da ISRM (loop de contingências, loop horário, avaliação de indicadores).

Fonte: Elaborada pelo autor

# 4 MODELO MATEMÁTICO DA ISRM

Neste capítulo são apresentados os modelos matemáticos que dão suporte à ISRM. Inicialmente, apresenta-se a modelagem da rede de distribuição e sua respectiva representação em blocos de carga. Na sequência, formalizam-se os modelos para representação das contingências, formação dinâmica de superblocos e hiperblocos, e execução do processo integrado de restauração. Posteriormente, descrevem-se os modelos espaço-temporais responsáveis por incorporar a variação horária da demanda, da geração distribuída, do estado de carga dos sistemas de armazenamento e do tempo médio de reparo. Por fim, detalham-se o cálculo dos indicadores de continuidade e a formulação do problema de otimização multiobjetivo utilizado para determinar o plano ótimo de automação da rede.

## 4.1 MODELAGEM DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO

A representação de redes de distribuição por meio de blocos de carga constitui uma estratégia amplamente empregada na literatura de confiabilidade e restauração de sistemas elétricos. De modo geral, essa segmentação permite reduzir a complexidade da análise ao agrupar regiões da rede delimitadas por dispositivos de proteção e manobra, simplificando a representação topológica utilizada pelos algoritmos de restauração. Dessa forma, os blocos de carga tornaram-se uma unidade conveniente para estudos de confiabilidade, avaliação de interrupções e planejamento da operação de sistemas de distribuição.

Entretanto, na maior parte das abordagens existentes, essa representação permanece essencialmente estática, sendo utilizada apenas como uma forma de simplificação da rede durante a execução dos algoritmos. A estrutura em blocos é previamente definida e permanece inalterada ao longo da análise, independentemente da localização da contingência ou das estratégias de restauração empregadas.

Nesta tese, a representação em blocos não constitui a contribuição principal da metodologia proposta, mas sim o requisito fundamental para viabilizar uma nova estrutura de modelagem dinâmica da restauração. Os critérios para a formação de blocos de carga, superblocos de carga e hiperblocos são apresentados no APÊNDICE A.

A partir dessa representação inicial, a ISRM introduz mecanismos capazes de modificar dinamicamente a forma como a rede é agrupada durante a simulação das contingências, permitindo que a estrutura topológica evolua de acordo com o estado operacional do sistema. Nesse contexto, os blocos deixam de representar apenas uma segmentação física da rede e

passam a constituir a unidade computacional sobre a qual são desenvolvidos todos os modelos matemáticos da metodologia.

A modelagem inicia-se a partir do circuito elétrico da rede de distribuição, no qual são representados todos os componentes físicos da rede, incluindo barras, linhas, transformadores, dispositivos de proteção, dispositivos de manobra, cargas e recursos energéticos distribuídos. Esse modelo elétrico detalhado constitui a referência utilizada durante todas as simulações realizadas pela ISRM.

Matematicamente, a rede é representada por um grafo conexo, conforme (1):

$$G = (V, E) \tag{1}$$

em que,

$G$ é o grafo representativo da rede de distribuição;

$V = \{v_1, v_2, \dots, v_{N_V}\}$ é o conjunto de vértices do grafo, correspondentes às barras da rede;

$E = \{e_1, e_2, \dots, e_{N_E}\}$ é o conjunto de arestas do grafo, correspondentes às conexões elétricas entre as barras;

Sobre essa representação define-se uma função de agregação Φ, dada por (2):

$$\Phi: G(V, E) \rightarrow BL \tag{2}$$

A função Φ é responsável por transformar a representação elétrica detalhada da rede $G(V, E)$ em um conjunto $BL$ de blocos de carga, dado por (3):

$$BL = \{BL_1, BL_2, \dots, BL_{N_{BL}}\} \tag{3}$$

em que,

$BL$ é o conjunto de blocos de carga da rede;

$BL_i$ é o -ésimo bloco de carga;

$i \in \{1, \dots, N_{BL}\}$ é o índice utilizado para identificar cada bloco; e

$N_{BL}$ é o número total de blocos de carga existentes na rede.

Cada bloco de carga corresponde à menor região eletricamente isolável do sistema, sendo formado pelo conjunto de barras, linhas, cargas e recursos energéticos distribuídos compreendidos entre dois dispositivos consecutivos capazes de interromper a continuidade elétrica da rede, incluindo disjuntores, religadores, chaves seccionadoras e fusíveis. Assim, cada bloco $BL_i$ pode ser representado pelo subgrafo que satisfaz a relação (4):

$$BL_i = (V_i, E_i) \tag{4}$$

em que,

$V_i \subseteq V$ é o subconjunto de barras pertencentes ao bloco $i$;

$E_i \subseteq E$ é o subconjunto de conexões elétricas pertencentes ao bloco $i$; e

$i$ identifica o bloco considerado.

Além disso, os blocos satisfazem as propriedades de disjunção e de cobertura da rede, expressas, respectivamente, em (5) e (6):

$$BL_i \cap BL_j = \emptyset, \qquad \forall i \neq j \tag{5}$$

e

$$\bigcup_{i=1}^{N_{BL}} B\,L_i = G \tag{6}$$

em que,

$i$ e $j$ são índices de dois blocos de carga distintos;

$G$ é o grafo completo da rede definido em (1).

A Equação (5) estabelece que dois blocos distintos não possuem elementos físicos em comum, enquanto a Equação (6) determina que a união de todos os blocos recupera a representação completa da rede.

A Figura 3 ilustra essa transformação. O modelo elétrico unifilar (Figura 3a) é convertido em uma representação operacional baseada em blocos de carga (Figura 3b), preservando-se a conectividade da rede e a localização dos dispositivos responsáveis pelo isolamento e pela restauração do sistema, ao mesmo tempo em que se reduz significativamente a dimensão do problema.

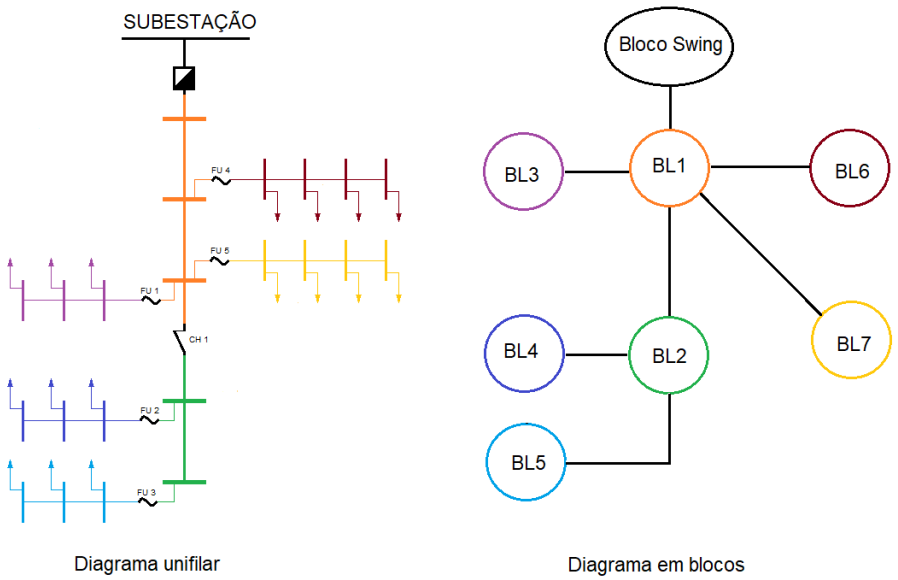



Figura 3 - Representação esquemática da rede elétrica a) Diagrama unifilar b) Diagrama em blocos

Fonte: Elaborada pelo autor

## 4.2 MODELAGEM MATEMÁTICA DAS CONTINGÊNCIAS

Uma vez estabelecida a representação da rede em blocos de carga, o primeiro passo da ISRM consiste em determinar os impactos imediatos provocados pela ocorrência de uma contingência. Antes que qualquer estratégia de restauração possa ser avaliada, torna-se necessário identificar quais blocos permanecem energizados e quais têm seu fornecimento interrompido em decorrência da atuação dos dispositivos de proteção.

Cada bloco de carga passa a representar um possível ponto de ocorrência de uma falta permanente, originando um cenário específico de desligamento cuja extensão depende da topologia da rede e da coordenação dos dispositivos de proteção.

Considere uma rede composta por $N_{BL}$ blocos de carga, representados pelo conjunto (7):

$$BL = \{BL_1, BL_2, \dots, BL_{N_{BL}}\} \tag{7}$$

Cada bloco é considerado, individualmente, como origem de uma contingência permanente, definindo o conjunto de cenários de falta em (8):

$$\Omega_F = \{F_1, F_2, \dots, F_{N_{BL}}\} \tag{8}$$

em que $F_i$ representa a ocorrência de uma falta permanente no bloco $BL_i$.

Quando uma contingência ocorre em um determinado bloco, o dispositivo de proteção responsável pela eliminação da corrente de curto-circuito atua automaticamente, isolando a região sob defeito. Entretanto, essa atuação normalmente não interrompe apenas o bloco onde a falta ocorreu. Dependendo da posição da contingência e da seletividade do sistema de proteção, outros blocos eletricamente dependentes também podem ser desenergizados, ainda que não apresentem qualquer defeito.

Assim, cada contingência produz um cenário próprio de interrupção da rede, caracterizado pelo conjunto de blocos que permanecem desenergizados imediatamente após a atuação do dispositivo de proteção. Esse cenário representa o estado inicial da rede antes da execução do processo restaurativo e constitui a informação fundamental sobre a qual serão desenvolvidas todas as etapas subsequentes da ISRM.

Para representar esse estado inicial define-se, para cada contingência simulada, um vetor de dependência como em (9):

$$\mathrm{d}_i = [d_{i1} \quad d_{i2} \quad \cdots \quad d_{iN_{BL}}] \tag{9}$$

cujos elementos são definidos por (10):

$$d_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se a contingência em } BL_i \text{ provoca desligamento do bloco } BL_j, \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \tag{10}$$

Cada vetor $d_i$ representa, portanto, um único cenário de contingência, identificando todos os blocos interrompidos imediatamente após a eliminação da falta.

A construção progressiva da Matriz de Dependência (MDB) é ilustrada nas figuras (Figura 4 a Figura 10) para uma rede hipotética. Inicialmente, uma contingência é aplicada ao bloco $BL_1$. Como consequência da atuação do disjuntor principal, todos os blocos da rede permanecem desenergizados, produzindo o vetor de dependência (11):

$$d_1 = [1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1] \tag{11}$$

Na sequência, novas contingências são aplicadas aos sucessivos blocos $BL_2$, $BL_3$, ..., $BL_n$, produzindo novos vetores. Ao final da simulação de todas as contingências, obtém-se um conjunto de vetores de dependência, $d_1, d_2, \ldots, d_{N_{BL}}$, que sintetizam individualmente todos os cenários possíveis de desligamento da rede.

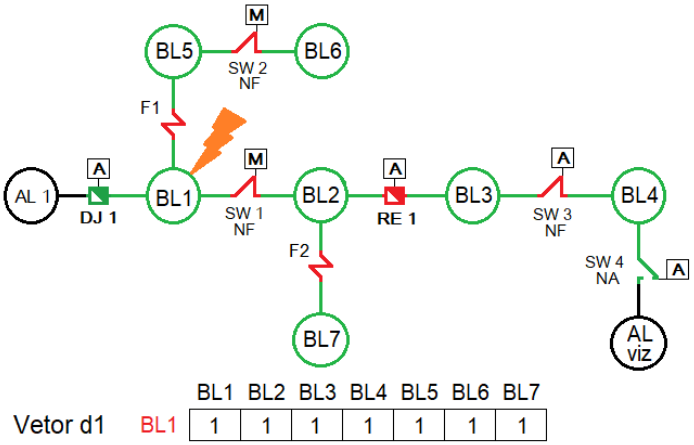



Figura 4 - Contingência no bloco BL1. Formação vetor dependência d1.

Fonte: Elaborada pelo autor

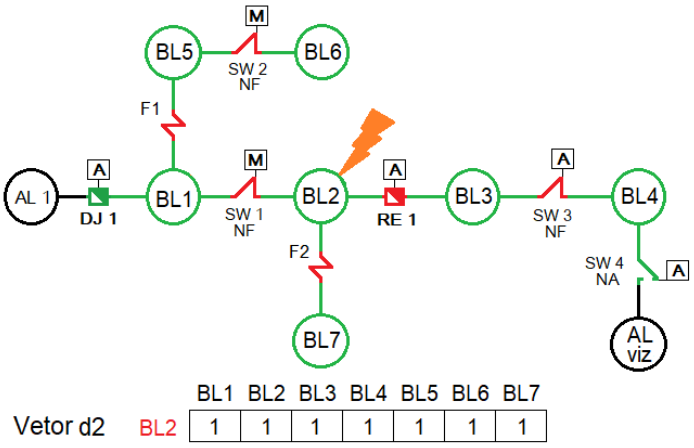



Figura 5 - Contingência no bloco BL2. Formação vetor dependência d2.

Fonte: Elaborada pelo autor

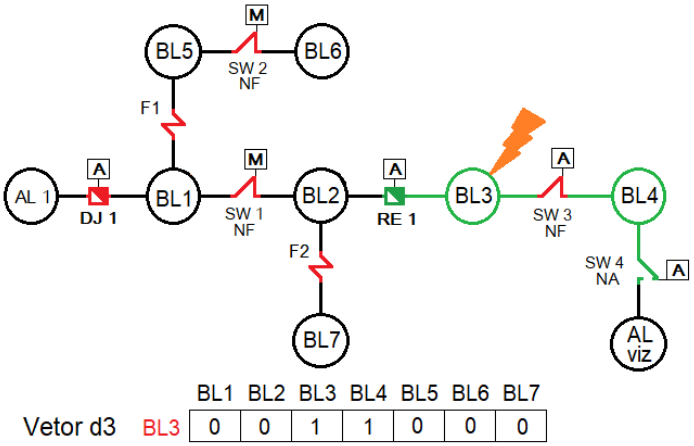



Figura 6 - Contingência no bloco BL3. Formação vetor dependência d3.

Fonte: Elaborada pelo autor

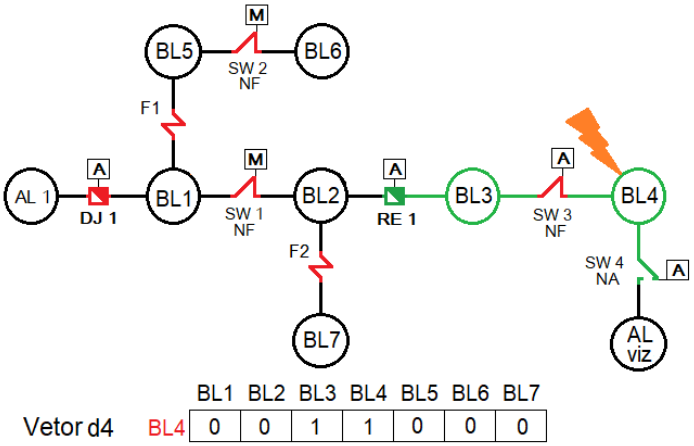



Figura 7 - Contingência no bloco BL4. Formação vetor dependência d4.

Fonte: Elaborada pelo autor

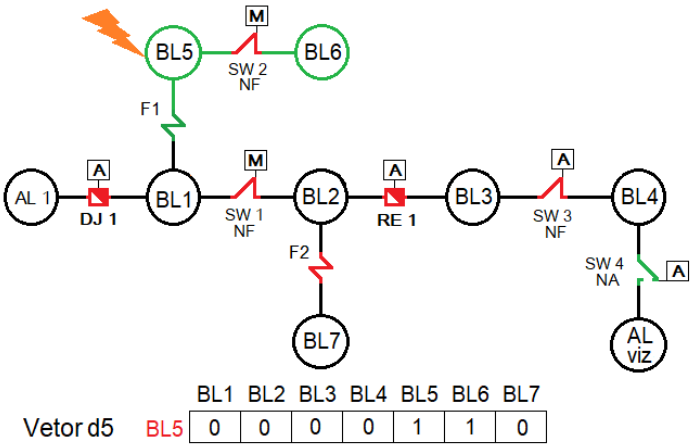



Figura 8 - Contingência no bloco BL5. Formação vetor dependência d5.

Fonte: Elaborada pelo autor

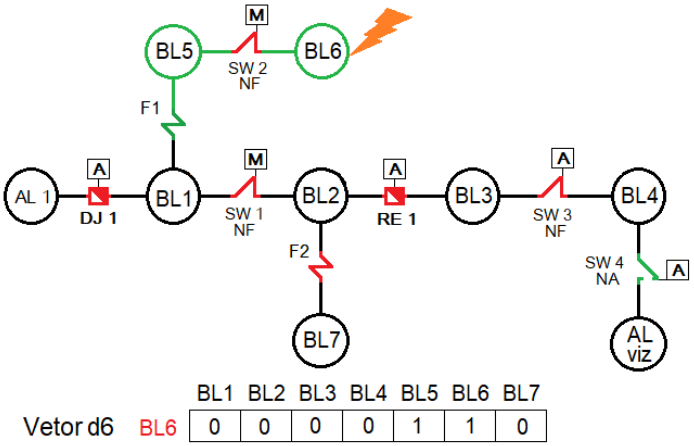



Figura 9 - Contingência no bloco BL6. Formação vetor dependência d6.

Fonte: Elaborada pelo autor

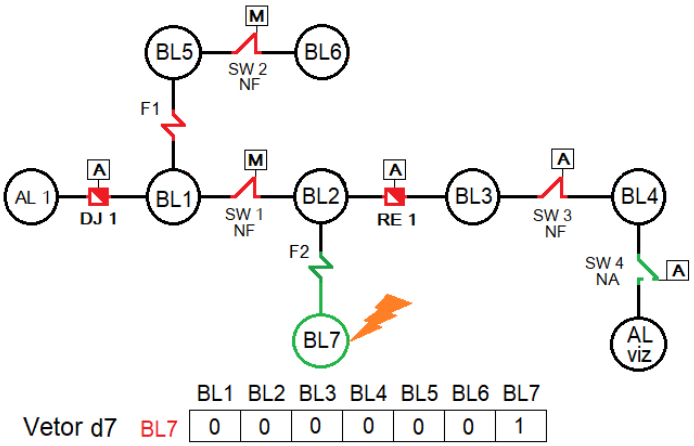



Figura 10 - Contingência no bloco BL7. Formação vetor dependência d7.

Fonte: Elaborada pelo autor

A Matriz de Dependência entre Blocos (MDB) é então obtida pelo empilhamento desses vetores (12),

$$\mathrm{MDB} = \begin{bmatrix} \mathrm{d}_1 \\ \mathrm{d}_2 \\ \vdots \\ \mathrm{d}_{N_{BL}} \end{bmatrix} = [m_{ij}] \tag{12}$$

resultando em uma matriz quadrada de dimensão $N_{BL} \times N_{BL}$, na qual cada linha representa uma contingência simulada e cada coluna representa um bloco potencialmente afetado. A Figura 11 mostra a MDB formada a partir das contingências representadas nas figuras (Figura 4 a Figura 10) para uma rede hipotética.

Observa-se que a MDB não constitui uma matriz de confiabilidade, mas uma representação puramente topológica da propagação das contingências na rede. Seu papel consiste em identificar, para cada possível ponto de falta, quais blocos permanecem

inicialmente interrompidos após a atuação do sistema de proteção, independentemente das ações de restauração que serão executadas posteriormente.

| Bloco *i*, causador da falta | Blocos *j*, afetados pela falta *i* | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | BL1 | BL2 | BL3 | BL4 | BL5 | BL6 | BL7 |
| BL1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| BL2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| BL3 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| BL4 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| BL5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| BL6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| BL7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |

Figura 11 - Matriz Dependência referente às contingências ocorridas na rede nos blocos de 1 a 7.

Fonte: Elaborada pelo autor

Entretanto, na ISRM a construção da MDB não representa uma etapa independente do processo de simulação. Cada vetor de dependência é obtido no início de um ciclo completo de análise de contingência. Imediatamente após sua determinação, inicia-se o processo integrado de restauração correspondente àquela contingência, no qual são avaliadas todas as alternativas de restabelecimento do fornecimento de energia, incluindo manobras automáticas, manobras manuais, transferência para alimentadores vizinhos e formação de microrredes.

Somente após a conclusão desse processo restaurativo são atualizadas as matrizes de confiabilidade referentes à contingência simulada, registrando os blocos efetivamente interrompidos, os respectivos tempos de desligamento e as demais informações necessárias ao cálculo dos indicadores de continuidade. Em seguida, uma nova contingência é aplicada ao bloco seguinte, repetindo-se integralmente esse ciclo até que todos os blocos da rede tenham sido analisados.

Dessa forma, a MDB constitui a primeira estrutura dinâmica construída pela ISRM, servindo como elo entre a representação topológica da rede e o processo integrado de restauração.

## 4.3 MODELAGEM ESPAÇO-TEMPORAL

Em redes de distribuição modernas, a disponibilidade dos recursos utilizados durante a restauração varia continuamente ao longo do tempo, fazendo com que uma mesma contingência possa resultar em diferentes estratégias de restabelecimento quando ocorre em instantes distintos. Com o objetivo de representar esse comportamento, a ISRM incorpora uma

modelagem espaço-temporal ao processo restaurativo, permitindo que cada contingência seja avaliada de acordo com as condições operacionais existentes no momento de sua ocorrência. Diferentemente das abordagens convencionais, nas quais a restauração é analisada considerando um único estado operacional da rede, a metodologia proposta atualiza periodicamente os parâmetros que caracterizam a operação do sistema, tornando a avaliação da confiabilidade dependente tanto da localização da contingência quanto do instante em que ela ocorre.

Para isso, o horizonte de análise é discretizado em 24 patamares horários, correspondentes às horas do dia. Em cada patamar, assume-se que as condições operacionais permanecem constantes durante a simulação de todas as contingências pertencentes àquele intervalo de tempo. Finalizada essa etapa, os parâmetros operacionais são atualizados e uma nova sequência de simulações é executada para o patamar seguinte.

Antes do processamento das contingências de cada patamar horário, os valores das variáveis que influenciam diretamente o processo restaurativo são atualizados, ou seja, a demanda dos consumidores, a potência disponível dos sistemas fotovoltaicos, o estado de carga dos sistemas de armazenamento de energia, a capacidade disponível dos alimentadores de reserva e o tempo médio de reparo. Essas variáveis definem a disponibilidade efetiva dos recursos restauradores e, consequentemente, condicionam as decisões tomadas durante a restauração do sistema.

Uma vez estabelecidas as condições operacionais do patamar analisado, cada bloco de carga é considerado, sucessivamente, como origem de uma contingência permanente. Para cada cenário de falta, o algoritmo executa o processo restaurativo utilizando os parâmetros temporais previamente atualizados, determinando as regiões restauradas, os recursos empregados e os tempos efetivos de interrupção experimentados pelos blocos da rede.

Dessa forma, a modelagem espaço-temporal constitui o mecanismo responsável por integrar a evolução temporal das condições operacionais ao processo restaurativo da ISRM. Como consequência, contingências idênticas podem produzir diferentes tempos de restauração e diferentes indicadores de continuidade quando ocorrem em horários distintos, refletindo de forma mais realista a operação de redes de distribuição inteligentes.

Os modelos matemáticos utilizados para representar cada uma das variáveis dependentes do tempo são apresentados nas seções subsequentes deste capítulo, sendo posteriormente empregados na determinação da Matriz dos Tempos de Interrupção dos Blocos (MTIB).

### 4.3.1 Demanda dos Consumidores

Diferentes classes de consumidores apresentam perfis característicos de consumo ao longo do dia. Assim, a potência demandada pela rede varia com o horário de ocorrência da contingência, tornando a disponibilidade dos recursos restauradores e a capacidade de transferência de carga dependentes do tempo.

Na metodologia proposta, cada consumidor mantém sua classe de consumo original (residencial, comercial ou industrial), sendo a demanda atualizada em cada patamar horário por meio de curvas típicas de carga representativas da respectiva classe. Assim, para um consumidor $i$, as demandas ativa e reativa são obtidas por (13) e (14).

$$P_i(h) = P_i^{nom} \cdot FC_c(h) \tag{13}$$

$$Q_i(h) = Q_i^{nom} \cdot FC_c(h) \tag{14}$$

onde:

$P_i^{nom}$ e $Q_i^{nom}$ representam as demandas nominais do consumidor $i$;

$FC_c(h)$ corresponde ao fator de carga da classe de consumo $c$ no horário $h$;

$c \in \{Residencial, Comercial, Industrial\}$

Como a restauração é executada sobre blocos de carga e não diretamente sobre consumidores individuais, as demandas horárias dos consumidores pertencentes ao mesmo bloco são agregadas antes da execução do algoritmo restaurativo. Dessa forma, as demandas ativa e reativa do bloco $BL_k$ são determinadas por (15) e (16).

$$P_{BL_k}(h) = \sum_{i \in BL_k} P_i\,(h) \tag{15}$$

$$Q_{BL_k}(h) = \sum_{i \in BL_k} Q_i\,(h) \tag{16}$$

A Figura 12 apresenta a curva horária de demanda utilizada na atualização das potências ativa e reativa dos blocos de carga ao longo dos 24 patamares horários considerados na modelagem espaço-temporal. Os valores horários das demandas por classe de consumidor encontram-se na Tabela 30 no apêndice E.1.

Esses valores passam a representar a demanda efetiva de cada bloco no patamar horário considerado e são utilizados durante todo o processo restaurativo para avaliar a capacidade de transferência de carga pelos alimentadores de reserva, para verificar a viabilidade da formação de microrredes e para calcular os tempos de interrupção empregados na construção da MTIB.

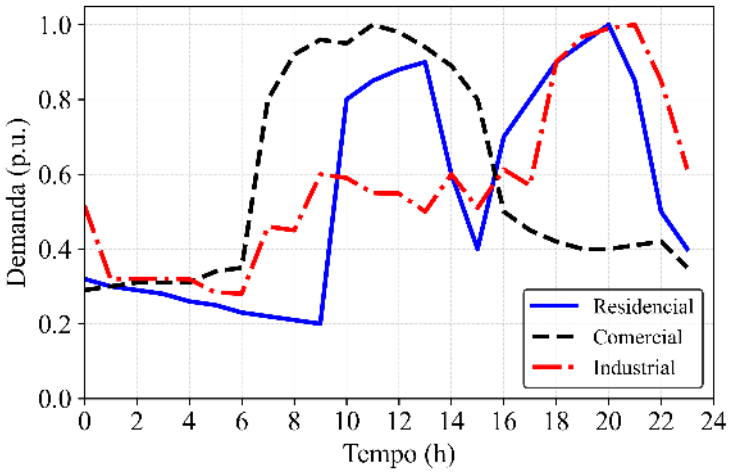



Figura 12 - Curvas de carga das classes de consumidores

Fonte: Elaborada pelo autor

### 4.3.2 Potência fornecida pelos Sistemas Fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos (PV) constituem uma importante fonte de geração distribuída capaz de contribuir para o atendimento das cargas durante o processo de restauração. Entretanto, sua potência disponível varia ao longo do dia em função das condições de geração solar, tornando sua contribuição dependente do horário em que a contingência ocorre.

Na modelagem adotada, a potência ativa disponível é determinada a partir da potência máxima de referência do arranjo fotovoltaico, correspondente ao parâmetro Pmpp do modelo PVSystem do OpenDSS, e de uma curva horária de geração expressa em valores por unidade. A potência resultante é limitada pela potência aparente nominal do inversor, representada pelo parâmetro kVA, de modo a considerar o eventual clipping da geração fotovoltaica.

Considerando um sistema fotovoltaico $PV_j$, sua potência ativa disponível no patamar horário $h$ é determinada por (17),

$$P_{PV_j}(h) = \max\left\{0,\ \min\left[P_{PV_j}^{mpp} FG_{PV}(h), S_{PV_j}^{inv}\right]\right\}. \quad (17)$$

em que:

$P_{PV_j}^{mpp}$ é a potência máxima de referência do arranjo fotovoltaico $j$, em kW;

$S_{PV_j}^{inv}$ é a potência aparente nominal do inversor, em kVA; e

$FG_{PV}(h)$ é o fator de geração fotovoltaica correspondente ao patamar horário $h$, em valores por unidade.

As perdas de conversão entre os lados CC e CA não são representadas explicitamente, sendo consideradas implicitamente nos dados de entrada e na curva horária adotada.

A potência reativa considerada no processo de restauração é limitada pelo fator de potência mínimo admitido, pela potência aparente nominal do inversor e, quando especificado, pelo limite máximo de potência reativa, sendo expressa por (18),

$$Q_{PV_j}(h) = +\min\left\{P_{PV_j}(h)\tan[\arccos(fp_{\min})],\ \sqrt{\left(S_{PV_j}^{inv}\right)^2 - \left(P_{PV_j}(h)\right)^2},\ Q_{PV_j}^{\max}\right\} \quad (18)$$

Na ausência de um valor explicitamente definido para $Q_{PV_j}^{\max}$, utiliza-se somente o menor valor entre os limites determinados pelo fator de potência e pela potência aparente do inversor. Sobre a disponibilidade reativa calculada, aplica-se ainda o fator de confiança $0 < \eta_Q \leq 1$ adotado pela metodologia.

Adota-se a convenção de que $Q_{PV_j}(h) > 0$ representa a injeção de potência reativa pelo sistema fotovoltaico, reduzindo a demanda reativa indutiva das cargas. Assim, considera-se apenas a operação do inversor fornecendo suporte reativo de caráter capacitivo. A absorção de potência reativa, correspondente à operação indutiva do inversor, não é contemplada no modelo.

Antes da simulação das contingências correspondentes a cada patamar horário, a potência ativa disponível de todos os sistemas fotovoltaicos é atualizada com base na curva horária de geração em valores por unidade. O valor obtido é limitado pela potência aparente nominal do respectivo inversor, conforme a Equação (17). A disponibilidade de potência reativa também é atualizada, respeitando os limites estabelecidos pela Equação (18).

As potências ativa e reativa resultantes são utilizadas pelo algoritmo de restauração nos balanços de potência dos superblocos e das regiões restauradas, incluindo a avaliação da capacidade de atendimento das cargas pelos alimentadores de reserva e pelas microrredes. Dessa forma, a contribuição dos sistemas fotovoltaicos é determinada de acordo com o horário de ocorrência e com a evolução temporal de cada contingência.

A Figura 13 apresenta a curva horária do fator de geração fotovoltaica utilizada na metodologia proposta. Os valores horários correspondentes, expressos em valores por unidade, são apresentados na Tabela 31 no apêndice E.2.

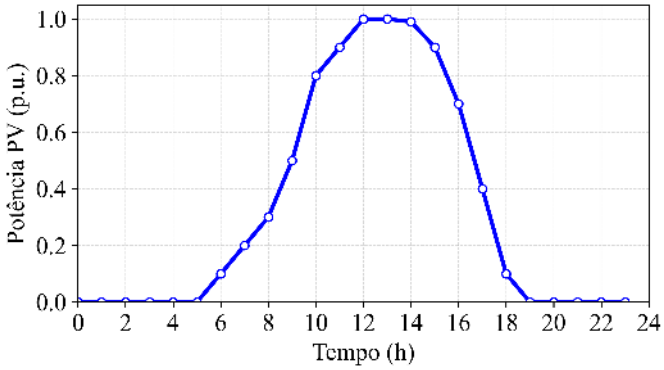



Figura 13 Curva horária do fator de geração fotovoltaica.

Fonte: Elaborada pelo autor

### 4.3.3 Estados de Carga e Descarga de Sistemas de Armazenamento de Energia

Os sistemas de armazenamento de energia em baterias (Battery Energy Storage Systems – BESS) desempenham papel fundamental na metodologia proposta, permitindo o suprimento temporário de cargas durante a formação de microrredes e ampliando a capacidade de restauração da rede após a ocorrência de contingências. Entretanto, diferentemente dos sistemas fotovoltaicos, cuja disponibilidade depende das condições de geração instantânea, a capacidade de atendimento dos BESS está diretamente relacionada à energia previamente armazenada em suas baterias.

Na modelagem proposta, o estado de carga das baterias (State of Charge – SoC) é considerado dependente do horário de ocorrência da contingência. Para isso, utiliza-se uma curva horária em valores por unidade (p.u.), representando a fração da capacidade nominal de energia disponível em cada patamar horário. Essa curva sintetiza o comportamento esperado do carregamento e descarregamento das baterias ao longo do dia, refletindo as estratégias usuais de operação desses sistemas.

Considerando um sistema de armazenamento $BESS_j$, a energia disponível para utilização durante o processo restaurativo é determinada a partir do estado de carga da bateria e da capacidade nominal de armazenamento, descontando-se a parcela de energia reservada para preservar sua operação segura. Assim, a energia disponível no patamar horário $h$ é dada por (19),

$$E_{BESS_j}(h) = SoC(h) \cdot E_{BESS_j}^{nom} \cdot (1 - R) \tag{19}$$

em que:

$E_{BESS_j}(h)$ é a energia disponível no instante $h$(kWh);

$E^{nom}_{BESS_j}$ é a capacidade nominal de armazenamento da bateria (kWh);

$SoC(h)$ representa o estado de carga da bateria, expresso em valores por unidade.;

e $R$ representa a fração de energia mantida como reserva operacional.

Na modelagem adotada, $E_{BESS_j}(h)$ representa a energia útil disponível para o processo restaurativo. As perdas internas de carregamento e descarregamento não são modeladas separadamente, o que equivale à adoção de eficiências unitárias para essas operações.

A potência efetivamente disponibilizada pelo sistema de armazenamento é limitada simultaneamente pela potência nominal do conversor e pela energia disponível na bateria. Dessa forma, a potência máxima que pode ser fornecida durante o processo restaurativo é determinada por (20),

$$P_{BESS_j}(h) = \min\left(P^{nom}_{BESS_j}, \frac{E_{BESS_j}(h)}{\Delta t}\right) \tag{20}$$

em que:

$P^{nom}_{BESS_j}$ é a potência nominal do conversor (kW);

$\Delta t$ representa o intervalo de tempo considerado para a restauração.

A potência reativa disponível é obtida admitindo a operação do conversor com fator de potência constante, sendo determinada por (21),

$$Q_{BESS_j}(h) = P_{BESS_j}(h)\tan\left(\arccos(fp_{BESS})\right) \tag{21}$$

Antes da simulação das contingências correspondentes a cada patamar horário, o estado de carga de todos os sistemas de armazenamento é atualizado conforme a curva horária em p.u., permitindo determinar a energia e a potência efetivamente disponíveis em cada instante. Essas informações são utilizadas pelo algoritmo restaurativo para verificar a viabilidade da formação de microrredes e para calcular a autonomia dos recursos energéticos distribuídos durante o processo de restauração.

A Figura 14 apresenta a curva horária de estado de carga utilizada na modelagem dos sistemas de armazenamento de energia. Os valores do estado de carga das baterias em p.u. encontram-se na Tabela 32 no apêndice E.3.

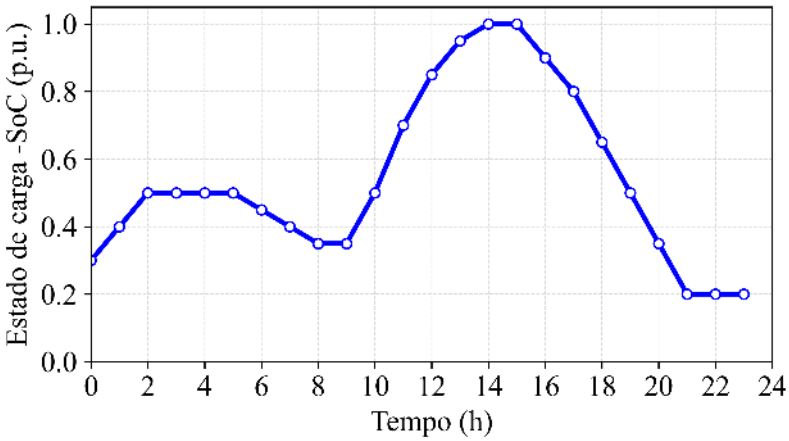



Figura 14 Curva SoC das baterias

Fonte: Elaborada pelo autor

Na metodologia proposta, a curva horária de estado de carregamento é considerada conhecida previamente para cada patamar horário. Assim, não é realizada uma simulação eletroquímica do processo de carregamento e descarregamento das baterias; a curva de SoC representa as condições operacionais esperadas do sistema de armazenamento no instante de ocorrência da contingência.

### 4.3.4 Capacidade da reserva de carga dos Alimentadores de Socorro

Os alimentadores de socorro, também denominados alimentadores de reserva, constituem um dos principais recursos empregados no processo de restauração, pois viabilizam o atendimento de regiões desenergizadas por meio da transferência de carga usando chaves de interligação. Entretanto, a potência que pode ser disponibilizada por esses alimentadores, correspondente à reserva de carga, não permanece constante ao longo do dia, uma vez que sua capacidade de apoio depende das condições operacionais existentes em cada patamar horário.

Na metodologia proposta, cada alimentador de reserva possui valores de referência para as potências ativa e reativa disponíveis para o processo de restauração. A variação temporal desses recursos é representada por uma curva horária expressa em valores por unidade, a qual determina a parcela da reserva que pode ser utilizada em cada instante do horizonte de análise.

Considerando um alimentador de reserva $AL_r$, as potências ativa e reativa disponíveis no patamar horário $h$ são determinadas por (22) e (23),

$$P_{AL_r}^{\text{res}}(h) = P_{AL_r}^{\text{res,ref}} \cdot f_{AL_r}(h) \tag{22}$$

$$Q_{AL_r}^{\text{res}}(h) = Q_{AL_r}^{\text{res,ref}} \cdot f_{AL_r}(h) \tag{23}$$

em que:

$P_{AL_r}^{\text{res}}(h)$ é a potência ativa disponível no alimentador de reserva $AL_r$, no patamar horário $h$, em kW;

$Q_{AL_r}^{\text{res}}(h)$ é a potência reativa disponível no mesmo patamar, em kvar;

$P_{AL_r}^{\text{res,ref}}$ e $Q_{AL_r}^{\text{res,ref}}$ são, respectivamente, os valores de referência das reservas ativa e reativa associadas ao alimentador;

$f_{AL_r}(h)$ é o fator horário de disponibilidade do alimentador de reserva, expresso em p.u.

A curva $f_{AL_r}(h)$ representa a variação diária da capacidade de apoio do alimentador, permitindo que a potência disponibilizada para a restauração seja atualizada de acordo com o horário de ocorrência da contingência. Assim, a metodologia não determina essa reserva a partir da diferença entre a capacidade máxima e a demanda instantânea do alimentador, mas utiliza diretamente um perfil previamente estabelecido de potência disponível.

Antes da simulação das contingências correspondentes a cada patamar horário, as reservas ativa e reativa de todos os alimentadores de apoio são atualizadas. Esses valores são então utilizados pelo algoritmo de restauração para avaliar a viabilidade das transferências de carga, determinar os blocos ou superblocos que podem ser restabelecidos por cada alimentador e impedir que a potência transferida ultrapasse a reserva disponível no horário considerado.

A Figura 15 apresenta a curva horária em p.u. adotada para representar a disponibilidade dos alimentadores de reserva ao longo do horizonte diário de análise. Os valores encontram-se na Tabela 33 no apêndice E.4.

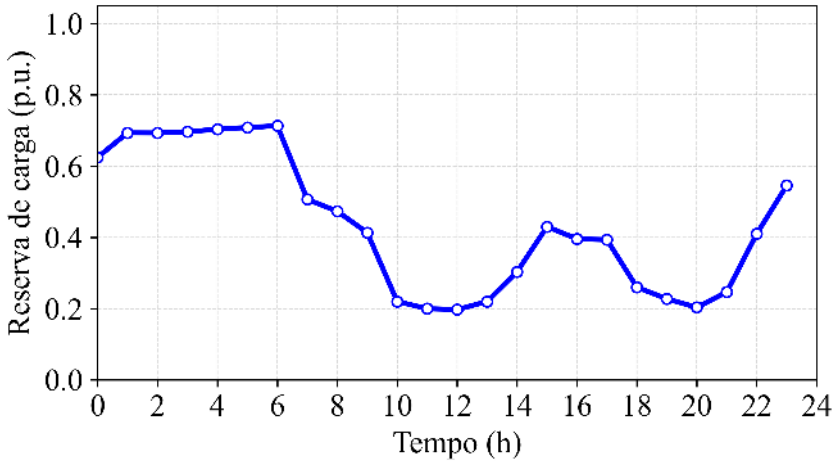



Figura 15 Curva de reserva de carga dos alimentadores reserva

Fonte: Elaborada pelo autor

### 4.3.5 Tempo Médio de Reparo

O tempo necessário para a eliminação de uma contingência exerce influência direta sobre a duração das interrupções e, consequentemente, sobre os indicadores de continuidade do fornecimento de energia elétrica. Embora os tempos de manobras manuais e automáticas possam ser considerados constantes na metodologia proposta, o tempo de reparo pode variar ao longo do dia, refletindo fatores operacionais que afetam o atendimento das ocorrências, além de fatores externos ao âmbito das concessionárias.

Na metodologia proposta, essa variabilidade é representada por meio de uma curva horária de MTTR expressa diretamente em horas. Diferentemente das curvas apresentadas nas subseções anteriores, essa curva não é normalizada em valores por unidade, mas fornece, para cada patamar horário, o tempo médio esperado para a eliminação de faltas em redes de média tensão.

Neste trabalho, a curva horária de MTTR foi obtida a partir de dados nacionais de interrupções não programadas registradas por concessionárias brasileiras com mais de 400 mil unidades consumidoras (ANEEL, 2026). Foram selecionadas as ocorrências em redes com níveis de tensão entre 1kV e 35 kV e duração superior a 30 minutos. A duração de cada interrupção foi calculada pela diferença entre os instantes de início e término da ocorrência e adotada, na metodologia, como estimativa do tempo de reparo. Os registros foram agrupados segundo a hora de início da interrupção, formando 24 patamares horários. Para reduzir a influência de ocorrências excepcionalmente longas, aplicou-se, separadamente para cada concessionária e patamar horário, o critério do intervalo interquartil, removendo-se os valores superiores a $Q3 + 1{,}5\,IQR$ nos grupos com pelo menos cinco registros. Em seguida, calculou-se a duração média por concessionária em cada patamar, e o valor global horário foi obtido pela média desses resultados, atribuindo-se o mesmo peso às concessionárias com dados disponíveis naquela hora. Os valores resultantes foram convertidos de minutos para horas para compor a curva de MTTR apresentada na Figura 16. Os valores encontram-se na Tabela 34 do APÊNDICE F.

Além do MTTR, a metodologia considera tempos fixos para as operações de chaveamento, adotando-se 30 minutos para cada manobra manual e até 3 minutos para cada manobra automática. Esses valores representam tempos médios de operação normalmente praticados pelas concessionárias e são posteriormente combinados ao MTTR para determinar o tempo de interrupção de cada bloco durante a construção da Matriz dos Tempos de Interrupção dos Blocos (MTIB).

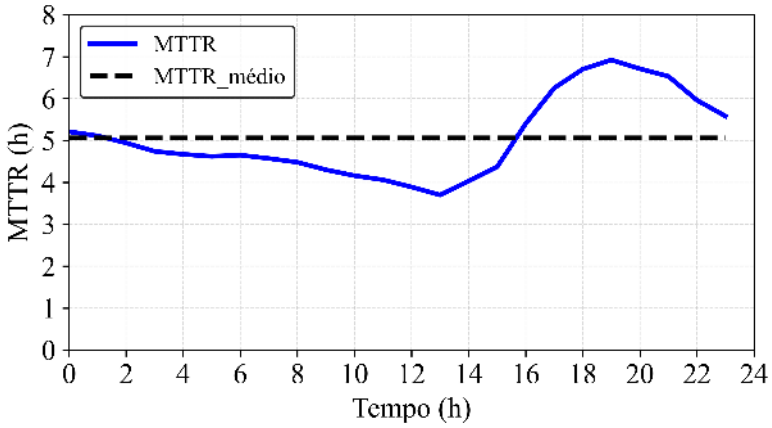



Figura 16 Curva MTTR

Fonte: Elaborada pelo autor

A modelagem espaço-temporal estabelece, para cada patamar horário, as condições operacionais da rede de distribuição e dos recursos empregados no processo de restauração. A partir dessas informações, torna-se possível determinar os tempos necessários para o restabelecimento do fornecimento de energia em cada bloco de carga da rede.

## 4.4 MATRIZ DOS TEMPOS DE INTERRUPÇÃO DOS BLOCOS

A Matriz dos Tempos de Interrupção dos Blocos (MTIB) registra o tempo efetivo de interrupção experimentado por cada bloco da rede.

A MTIB constitui a principal estrutura de saída do processo integrado de restauração. Enquanto a Matriz de Dependência dos Blocos (MDB) representa a relação topológica entre a localização da contingência e os blocos inicialmente interrompidos, a MTIB descreve o comportamento temporal da restauração, incorporando tanto as características estruturais da rede quanto as condições operacionais vigentes no instante da falta. Cada elemento da matriz informa o tempo durante o qual determinado bloco permaneceu sem fornecimento de energia, considerando as ações automáticas e manuais de chaveamento, as transferências de carga por alimentadores de reserva, a formação de microrredes e a capacidade desses recursos de sustentar o atendimento durante o período de reparo.

Desse modo, a MTIB estabelece a conexão entre a modelagem espaço-temporal, a simulação físico-operacional da rede e o cálculo dos indicadores de confiabilidade. Toda a sequência restaurativa executada pela ISRM é consolidada, ao final de cada contingência, em um único vetor de tempos de interrupção, que serve de base para a determinação dos índices de continuidade do sistema.

### 4.4.1 Vetor de tempos de interrupção de uma contingência

Considere a ocorrência da contingência $F_i$ no bloco $BL_i$, em um determinado patamar horário $h$. Após a atuação do sistema de proteção, a MDB fornece o vetor de dependência (24),

$$\mathrm{d}_i^{(h)} = \begin{bmatrix} d_{i1}^{(h)} & d_{i2}^{(h)} & \cdots & d_{iN_{BL}}^{(h)} \end{bmatrix} \tag{24}$$

que identifica os blocos inicialmente desligados. A partir desse estado inicial, a ISRM executa o processo integrado de restauração e produz o vetor de tempos de interrupção (25),

$$\mathrm{t}_i^{(h)} = \begin{bmatrix} t_{i1}^{(h)} & t_{i2}^{(h)} & \cdots & t_{iN_{BL}}^{(h)} \end{bmatrix} \tag{25}$$

em que $t_{ij}^{(h)}$ representa o tempo efetivo durante o qual o bloco $BL_j$ permaneceu sem fornecimento em decorrência da contingência $F_i$, iniciada no patamar $h$.

O termo "tempo efetivo" é empregado porque $t_{ij}^{(h)}$não corresponde necessariamente apenas ao intervalo transcorrido até a primeira restauração do bloco $j$, durante a contingência $i$ iniciada no patamar $h$. Caso um recurso restaurativo não consiga manter o bloco energizado durante todo o tempo necessário ao reparo, o intervalo posterior de desligamento também é incorporado. Assim, o elemento $\left[MTNB^{(h)}\right]_{ij} = t_{ij}^{(h)}$, associado à contingência $i$ e ao bloco de carga $j$, representa o tempo total acumulado de interrupção desse bloco durante a contingência considerada.

Sejam:

$T_A^{(h)}$ o tempo necessário para a restauração automática;

$T_M^{(h)}$ o tempo necessário para a restauração manual;

$T_I^{(h)}$ o tempo total de reparo e normalização definitiva da contingência.

Para os casos elementares, o tempo atribuído ao bloco pode ser representado por (26),

$$t_{ij}^{(h)} = \begin{cases} 0, & \text{se } BL_j \text{ não for afetado pela contingência } F_i, \\ T_A^{(h)}, & \text{se } BL_j \text{ restaurado automaticamente e permanecer energizado,} \\ T_M^{(h)}, & \text{se } BL_j \text{ restaurado manualmente e permanecer energizado,} \\ T_I^{(h)}, & \text{se } BL_j \text{ permanecer desligado até a conclusão do reparo.} \end{cases} \tag{26}$$

Essa representação, entretanto, não é suficiente para os casos em que o fornecimento é inicialmente restabelecido, mas posteriormente perdido em razão da indisponibilidade do recurso energético para sustentar a restauração.

Considere que o bloco seja restaurado no instante $\tau_{ij}^R$, com (27),

$$\tau_{ij}^R \in \left\{T_A^{(h)}, T_M^{(h)}\right\} \tag{27}$$

e que o recurso responsável pela restauração deixe de sustentar o bloco no instante $\tau_{ij}^{D}$, antes da conclusão do reparo. O tempo total de interrupção passa então a ser dado por (28),

$$t_{ij}^{(h)} = \tau_{ij}^{R} + \left(T_I^{(h)} - \tau_{ij}^{D}\right), \tau_{ij}^{R} < \tau_{ij}^{D} < T_I^{(h)} \tag{28}$$

O primeiro termo corresponde ao intervalo transcorrido entre a ocorrência da falta e a restauração inicial. O segundo representa o período durante o qual o bloco volta a permanecer desligado após a perda do recurso restaurativo.

Consequentemente, podem ocorrer tempos intermediários, tais como em (29) e (30):

$$T_A^{(h)} < t_{ij}^{(h)} < T_I^{(h)} \tag{29}$$

ou

$$T_M^{(h)} < t_{ij}^{(h)} < T_I^{(h)}. \tag{30}$$

Esses casos distinguem a MTIB de uma representação convencional baseada apenas em estados binários. Um bloco classificado como restaurado automaticamente ou manualmente não recebe obrigatoriamente apenas $T_A^{(h)}$ou $T_M^{(h)}$. O tempo final depende também da permanência da restauração durante todo o período de reparo.

### 4.4.2 Avaliação da permanência da restauração

Para os blocos transferidos a alimentadores de reserva, a ISRM verifica, ao longo do tempo de reparo, se a potência disponível continua sendo suficiente para atender à demanda agregada dos superblocos restaurados. Essa avaliação considera a variação horária da capacidade do alimentador, as curvas de carga dos consumidores e a contribuição local dos recursos energéticos distribuídos.

De maneira análoga, para os blocos inseridos em microrredes, a metodologia compara, a cada intervalo, a demanda agregada dos superblocos com a potência ativa e reativa disponibilizada pelos recursos formadores de rede. Caso o equilíbrio de potência deixe de ser atendido, os superblocos são progressivamente desconectados de acordo com a estratégia definida no processo restaurativo.

A implementação considera, ainda, o estado energético dos sistemas de armazenamento. A energia disponível no BESS é inicializada de acordo com seu estado de carga no instante da contingência e atualizada ao longo do período de reparo. A geração fotovoltaica é calculada a partir da irradiância de cada hora; quando essa geração é insuficiente, a bateria atende ao déficit dentro de seus limites de potência e energia. Quando há excedente fotovoltaico, a energia remanescente pode ser utilizada para recarregar o armazenamento.

Assim, a condição de restauração não é avaliada apenas no instante inicial da transferência. O algoritmo acompanha a evolução da demanda, da geração distribuída, da disponibilidade dos alimentadores de reserva e da energia armazenada durante todo o tempo $T_I^{(h)}$. Na restauração por alimentadores vizinhos, a carga líquida de cada superbloco é obtida pela diferença entre sua demanda e a contribuição local dos REDs; quando a capacidade disponível se torna insuficiente, o algoritmo determina o instante de desligamento e registra o tempo de interrupção correspondente.

O mesmo procedimento é aplicado às microrredes. Para cada intervalo, são comparadas a demanda agregada e a geração disponível. Caso a microrrede deixe de sustentar todos os superblocos, o instante da perda de suprimento é utilizado para determinar o tempo efetivo de interrupção de cada bloco afetado.

Essa avaliação temporal permite que duas contingências que produzam a mesma configuração inicial de desligamento resultem em vetores de tempos distintos. A diferença pode decorrer do patamar de carga, da irradiância solar, do estado de carga das baterias, da disponibilidade dos alimentadores de reserva ou dos tempos de atuação automática e manual.

### 4.4.3 Conversão dos resultados dos superblocos para os blocos de carga

O processo restaurativo é executado sobre os superblocos, pois eles representam a configuração dinâmica assumida pela rede após a atuação dos dispositivos de proteção. Entretanto, as taxas de falha, os consumidores, as potências instaladas e os indicadores de confiabilidade são associados aos blocos de carga da representação original.

Para compatibilizar essas duas camadas, considere o mapeamento dependente da contingência dada em (31),

$$\Phi_i : BL_j \longrightarrow SB_k^{(i)} \tag{31}$$

em que $\Phi_i(BL_j)$identifica o superbloco ao qual o bloco $BL_j$ pertence após a ocorrência da contingência $F_i$.

Se $\theta_{ik}^{(h)}$representa o tempo efetivo de interrupção atribuído ao superbloco $SB_k^{(i)}$, então o tempo correspondente ao bloco $BL_j$é dado por (32).

$$t_{ij}^{(h)} = \theta_{ik}^{(h)}, SB_k^{(i)} = \Phi_i(BL_j) \tag{32}$$

Todos os blocos pertencentes ao mesmo superbloco recebem, portanto, o tempo resultante da estratégia de restauração aplicada àquele agrupamento. Os blocos não afetados

pela contingência, ou que não pertencem aos superblocos desligados, recebem tempo igual a zero.

Na implementação, o fechamento do vetor segue uma regra de precedência. Os tempos associados a perdas de suprimento ocorridas durante o período de reparo são preservados. Em seguida, são atribuídos os tempos de restauração automática e manual, o tempo total de reparo para os blocos que permaneceram isolados e, finalmente, zero para os blocos não afetados. Após essa classificação no nível dos superblocos, os valores são projetados para os blocos de carga que compõem o vetor final.

### 4.4.4 Construção da MTIB

O vetor $\mathrm{t}_i^{(h)}$representa o resultado completo de uma única contingência. Após sua determinação, ele é incorporado à MTIB correspondente ao patamar horário analisado.

A matriz é formada pelo empilhamento dos vetores produzidos para todas as contingências, conforme (33):

$$\mathrm{MTIB}^{(h)} = \begin{bmatrix} \mathrm{t}_1^{(h)} \\ \mathrm{t}_2^{(h)} \\ \vdots \\ \mathrm{t}_{N_{BL}}^{(h)} \end{bmatrix} \tag{33}$$

ou, de forma expandida conforme (34),

$$\mathrm{MTIB}^{(h)} = \begin{bmatrix} t_{11}^{(h)} & t_{12}^{(h)} & \cdots & t_{1N_{BL}}^{(h)} \\ t_{21}^{(h)} & t_{22}^{(h)} & \cdots & t_{2N_{BL}}^{(h)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{N_{BL}1}^{(h)} & t_{N_{BL}2}^{(h)} & \cdots & t_{N_{BL}N_{BL}}^{(h)} \end{bmatrix} \tag{34}$$

Cada linha corresponde à localização de uma contingência, enquanto cada coluna corresponde a um bloco sujeito aos seus efeitos. Portanto:

$t_{ij}^{(h)} = 0$ indica que a falta em $BL_i$ não provocou interrupção no bloco $BL_j$;

$t_{ij}^{(h)} = T_A^{(h)}$ indica restauração automática sustentada;

$t_{ij}^{(h)} = T_M^{(h)}$ indica restauração manual sustentada;

$t_{ij}^{(h)} = T_I^{(h)}$ indica ausência de restauração durante o período de reparo;

valores intermediários indicam que o bloco foi inicialmente restaurado, mas perdeu o suprimento antes da normalização definitiva da rede.

Cada elemento da MTIB representa o tempo efetivo de interrupção associado ao bloco de carga para uma determinada contingência. Esse tempo resulta da avaliação temporal do processo restaurativo e corresponde à soma de todos os intervalos de indisponibilidade experimentados pelo bloco durante o evento.

Assim como a MDB, a MTIB é construída progressivamente. A diferença é que a linha da MDB é determinada imediatamente após a atuação da proteção, enquanto a linha da MTIB somente pode ser concluída após a execução de todas as etapas da restauração e da avaliação da permanência dos recursos empregados.

O ciclo correspondente à contingência $F_i$ pode ser sintetizado por (35),

$$F_i \longrightarrow \mathrm{d}_i^{(h)} \longrightarrow \mathcal{R}_i^{(h)} \longrightarrow \mathrm{t}_i^{(h)} \tag{35}$$

em que $\mathcal{R}_i^{(h)}$representa o processo integrado de restauração e acompanhamento temporal da contingência. Após a inclusão de $\mathrm{t}_i^{(h)}$na MTIB, a rede é restabelecida à sua condição original e a contingência seguinte é simulada.

### 4.4.5 Dimensão espaço-temporal da MTIB

Como os tempos de atuação, as cargas, a disponibilidade dos alimentadores de reserva, a geração fotovoltaica e a energia disponível nos sistemas BESS podem variar ao longo do dia, uma única MTIB não é suficiente para representar integralmente o comportamento da rede.

Para cada patamar horário $h$, obtém-se uma matriz específica como em (36),

$$\mathrm{MTIB}^{(h)}, h \in \{1,2,\dots,24\} \tag{36}$$

O conjunto dado por (37),

$$\Omega_{\mathrm{MTIB}} = \left\{\mathrm{MTIB}^{(1)}, \mathrm{MTIB}^{(2)}, \dots, \mathrm{MTIB}^{(24)}\right\} \tag{37}$$

representa a resposta espaço-temporal da rede diante das contingências consideradas.

A dimensão espacial é caracterizada pelas linhas e colunas associadas aos blocos de carga. A dimensão temporal aparece tanto nos parâmetros utilizados para determinar cada elemento, quanto na existência de uma MTIB específica para cada patamar.

Dessa forma, uma mesma falta pode produzir tempos de interrupção diferentes dependendo do horário em que ocorre. Uma contingência durante o período de maior demanda pode exceder a capacidade de um alimentador de reserva, enquanto a mesma configuração pode ser integralmente sustentada em um período de carga reduzida. Analogamente, uma microrrede pode apresentar maior autonomia em horários com elevada irradiância ou maior estado de carga das baterias.

Essa característica constitui uma diferença fundamental em relação às formulações baseadas em tempos médios fixos, pois permite que a confiabilidade seja avaliada de acordo com as condições operacionais efetivamente existentes no instante da contingência.

### 4.4.6 Papel da MTIB na ISRM

A MTIB, por ser uma matriz que armazena os tempos de interrupção, não deve ser interpretada apenas como uma matriz utilizada no cálculo do DEC. Sua função é mais abrangente. Ela constitui a estrutura que converte o comportamento topológico, operacional e energético da rede em uma representação temporal compatível com a avaliação da confiabilidade.

Em cada elemento $t_{ij}^{(h)}$ estão implicitamente sintetizadas informações relativas a:

- localização da contingência;
- atuação do sistema de proteção;
- configuração dos superblocos;
- disponibilidade e natureza das chaves;
- restauração automática e manual;
- capacidade dos alimentadores de reserva;
- variação horária das cargas;
- disponibilidade dos REDs;
- formação de microrredes;
- estado de carga e autonomia dos sistemas BESS;
- histórico temporal de atendimento dos superblocos durante o período de reparo da contingência.

Por essa razão, a MTIB pode ser considerada a principal estrutura integradora da ISRM. A MDB determina quem foi inicialmente desligado; o processo restaurativo estabelece como e quando o fornecimento pode ser restabelecido; e a MTIB registra o resultado temporal efetivamente percebido por cada bloco.

Além de alimentar diretamente os indicadores associados à duração das interrupções, a MTIB também permite determinar quais interrupções ultrapassam o limite regulatório para sua classificação como permanentes.

## 4.5 MATRIZ BINÁRIA DE INTERRUPÇÕES PERMANENTES (MBIP)

A Matriz dos Tempos de Interrupção dos Blocos (MTIB) descreve, para cada contingência simulada, o tempo efetivo de interrupção experimentado pelos blocos de carga da rede. Entretanto, nem toda interrupção registrada na MTIB deve ser contabilizada nos indicadores regulatórios de continuidade. Para essa finalidade, as interrupções são classificadas segundo o limite mínimo de duração estabelecido pela regulamentação, originando a Matriz Binária de Interrupções Permanentes (MBIP).

Enquanto a MDB representa a propagação topológica das contingências e a MTIB incorpora a evolução temporal do processo restaurativo, a MBIP possui natureza classificatória, indicando quais interrupções devem ser consideradas no cálculo dos indicadores de continuidade.

Considere a MTIB correspondente ao patamar horário $h$, visto em (38):

$$\mathrm{MTIB}^{(h)} = \left[t_{ij}^{(h)}\right] \tag{38}$$

em que $t_{ij}^{(h)}$ representa o tempo efetivo de interrupção do bloco $BL_j$ provocado por uma contingência localizada no bloco $BL_i$. A transformação binária da MTIB em MBIP é representada por (39), resultando em (40):

$$\mathcal{B}\colon \mathrm{MTIB}^{(h)} \longrightarrow \mathrm{MBIP}^{(h)} \tag{39}$$

$$\mathrm{MBIP}^{(h)} = \left[b_{ij}^{(h)}\right] \tag{40}$$

A classificação de cada elemento da MBIP é realizada conforme (41):

$$b_{ij}^{(h)} = \begin{cases} 1, & t_{ij}^{(h)} > T_{\mathrm{lim}} \\ 0, & t_{ij}^{(h)} \leq T_{\mathrm{lim}} \end{cases} \tag{41}$$

em que $T_{\mathrm{lim}}$ representa o tempo mínimo para que a interrupção seja classificada como permanente. Para a regulamentação brasileira atualmente vigente, $T_{\mathrm{lim}} = 3$ min. Assim, cada elemento da MBIP informa apenas se determinado bloco deve ou não ser contabilizado na ocorrência da interrupção, independentemente de sua duração efetiva.

Consequentemente, $b_{ij}^{(h)} = 1$, indica que o bloco $BL_j$ permaneceu interrompido por tempo suficiente para ser contabilizado nos indicadores regulatórios quando a contingência ocorreu em $BL_i$, enquanto $b_{ij}^{(h)} = 0$, indica que o bloco não sofreu interrupção ou que sua duração foi inferior ao limite regulamentar.

Além disso, observa-se que a MBIP preserva exatamente a mesma estrutura dimensional da MTIB. Assim, para cada patamar horário $h$, obtém-se MBIP em (42):

$$\mathrm{MBIP}^{(h)} = \begin{bmatrix} b_{11}^{(h)} & b_{12}^{(h)} & \cdots & b_{1N_{BL}}^{(h)} \\ b_{21}^{(h)} & b_{22}^{(h)} & \cdots & b_{2N_{BL}}^{(h)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{N_{BL}1}^{(h)} & b_{N_{BL}2}^{(h)} & \cdots & b_{N_{BL}N_{BL}}^{(h)} \end{bmatrix} \tag{42}$$

em que cada linha continua associada à localização da contingência e cada coluna ao bloco sujeito aos seus efeitos. Essa correspondência estrutural permite que a MBIP seja obtida diretamente da MTIB sem necessidade de nova simulação da rede.

Na avaliação da confiabilidade, a MBIP identifica as interrupções permanentes que devem ser contabilizadas. Assim, indicadores de frequência, como o FEC, utilizam sua informação binária para identificar as ocorrências permanentes. Para indicadores de duração, como o DEC, a MBIP define quais interrupções são elegíveis para contabilização, enquanto a MTIB fornece os respectivos tempos de interrupção.

Dessa forma, a arquitetura matemática da ISRM estabelece uma sequência entre as principais estruturas de dados da metodologia:

$$MDB \rightarrow MTIB \rightarrow MBIP$$

nessa sequência, a MDB identifica os blocos inicialmente interrompidos, a MTIB determina o tempo efetivo de interrupção após as estratégias restaurativas e a MBIP classifica quais dessas interrupções devem ser consideradas na avaliação da continuidade do fornecimento. A Figura 17 ilustra a relação entre as três estruturas matriciais para uma rede hipotética.

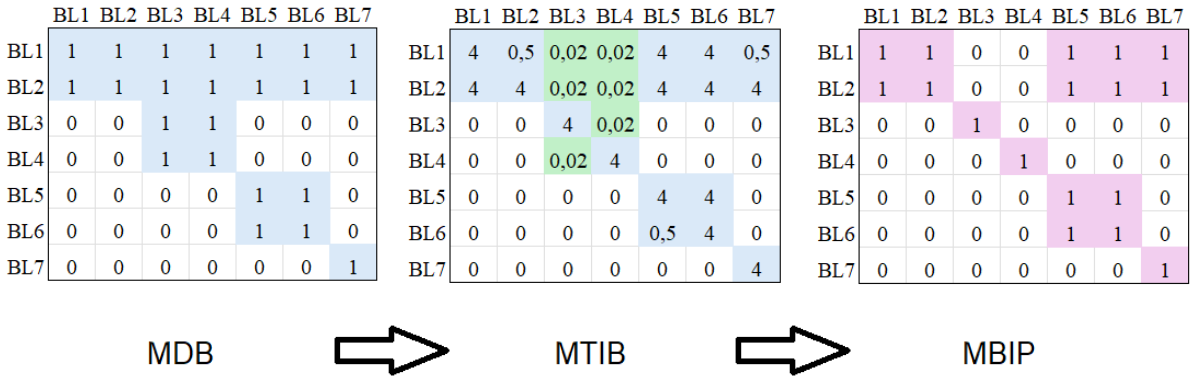



Figura 17 - Relação entre a MDB, a MTIB e a MBIP para uma rede hipotética.

Fonte: Elaborada pelo autor

## 4.6 FORMULAÇÃO DOS INDICADORES DE CONFIABILIDADE E CUSTO DA INTERRUPÇÃO

As estruturas desenvolvidas nas seções anteriores descrevem integralmente o comportamento da rede frente às contingências simuladas. A Matriz de Dependência entre Blocos (MDB) identifica quais blocos são afetados por cada contingência, a Matriz dos Tempos de Interrupção dos Blocos (MTIB) determina o tempo efetivo de interrupção resultante do processo restaurativo e a Matriz Binária de Interrupções Permanentes (MBIP) classifica as interrupções que devem ser contabilizadas segundo os critérios regulatórios.

Entretanto, essas matrizes representam apenas as consequências de uma contingência hipotética aplicada em cada bloco da rede. Para a obtenção dos indicadores de confiabilidade, torna-se necessário incorporar a frequência com que essas contingências efetivamente ocorrem. Em outras palavras, além de conhecer os efeitos de uma falta, é necessário conhecer sua probabilidade de ocorrência.

Na metodologia proposta, essa informação é introduzida por meio da modelagem probabilística das contingências, baseada nas taxas de falha das linhas que compõem cada bloco de carga. Essa abordagem permite estimar não apenas a probabilidade de falha de um determinado bloco, mas também a frequência com que cada bloco da rede é interrompido em decorrência de falhas ocorridas em qualquer outro bloco eletricamente dependente.

A combinação entre a modelagem probabilística e as estruturas desenvolvidas pela ISRM fornece a base para o cálculo dos indicadores de frequência, duração, energia não distribuída e custo da interrupção, apresentados nas seções subsequentes.

### 4.6.1 Modelagem Probabilística das Contingências

Na metodologia proposta, a probabilidade de ocorrência das faltas é representada pela taxa específica de falha de cada bloco de carga. Diferentemente das abordagens convencionais, nas quais as taxas são normalmente associadas diretamente aos componentes individuais da rede, a ISRM utiliza os blocos de carga como unidade básica da modelagem probabilística.

Na implementação da ISRM, a ocorrência das contingências é inicialmente representada pelas frequências de falha associadas às linhas da rede, expressas em falhas por hora. Como um bloco de carga pode ser constituído por diversas linhas, essas frequências são agregadas e normalizadas pela extensão total do respectivo bloco, obtendo-se uma taxa específica equivalente de falha. Assim, a taxa específica de falha do bloco $i$ é definida por (43):

$$\lambda_i = \frac{\sum_{l \in \Omega_i} \lambda_l}{L_i} \tag{43}$$

em que:

$\lambda_i$ representa a taxa específica equivalente de falha do bloco $i$, em falhas/(km·h);

$\Omega_i$ é o conjunto de linhas pertencentes ao bloco $i$;

$l$ é o índice de uma linha pertencente a $\Omega_i$;

$\lambda_l$ representa a frequência de falha da linha $l$, em falhas/h; e

$L_i$ corresponde ao comprimento total das linhas pertencentes ao bloco $i$, em km, dado por $L_i = \sum_{l \in \Omega_i} L_l$.

A normalização pela extensão total do bloco resulta em uma taxa específica de falha em falhas por quilômetro por hora, compatível com a discretização temporal adotada na metodologia. Nos cálculos dos indicadores de confiabilidade, essa taxa é posteriormente associada à extensão do bloco onde se origina a contingência, recuperando sua frequência de ocorrência. As contribuições obtidas para os 24 patamares horários são agregadas para representar o dia típico e, posteriormente, anualizadas.

As taxas específicas obtidas para todos os blocos são então organizadas no vetor (44):

$$\boldsymbol{\lambda} = [\lambda_1, \lambda_2, \ldots, \lambda_{N_{BL}}] \tag{44}$$

Para compatibilizar as dimensões do vetor de taxas de falha com as demais matrizes empregadas no cálculo dos indicadores da ISRM, esse vetor é expandido para uma matriz auxiliar quadrada de ordem $N_{BL}$. Nessa representação, cada taxa $\lambda_i$ é repetida ao longo da linha $i$, a qual corresponde à contingência originada no bloco $i$, enquanto as colunas representam os diferentes blocos que podem ser afetados por essa contingência, conforme mostrado em (45).

$$\boldsymbol{\Lambda} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & \lambda_1 & \cdots & \lambda_1 \\ \lambda_2 & \lambda_2 & \cdots & \lambda_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_n & \lambda_n & \cdots & \lambda_n \end{bmatrix} \tag{45}$$

Essa expansão não introduz novas informações probabilísticas nem altera o significado físico das taxas de falha. Trata-se apenas de uma organização matricial auxiliar que permite combinar, elemento a elemento, as taxas de falha dos blocos causadores com as características dos blocos afetados e com as matrizes resultantes da análise das contingências.

Consequentemente, cada linha da matriz representa uma contingência originada em um determinado bloco, enquanto as colunas representam os blocos potencialmente afetados por essa contingência.

### 4.6.2 Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC)

A Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC) representa o número médio esperado de interrupções permanentes experimentadas por cada consumidor ao longo do período de análise. Na metodologia proposta, esse indicador é obtido a partir da combinação entre o modelo probabilístico de falhas, a topologia elétrica da rede e os resultados do processo de restauração representados pela Matriz Binária de Interrupções Permanentes (MBIP).

Considere uma contingência originada no bloco $i$, durante o patamar horário $h$. A contribuição dessa contingência para a frequência equivalente de interrupção dos consumidores pertencentes ao bloco $j$ é dada por (46). Onde o produto $(\lambda_i \cdot L_i)$ representa a frequência de ocorrência das faltas originadas no bloco $i$, em falhas por hora. Caso essa contingência provoque uma interrupção permanente no bloco $j$ durante o patamar horário $h$, condição representada por $b_{ij}^h = 1$, sua contribuição é ponderada pelo número de consumidores $N_{c,j}$ pertencentes ao bloco afetado.

$$FEC_{ij}^h = \frac{(\lambda_i L_i) N_{c,j} b_{ij}^h}{N_{tot}} \tag{46}$$

em que:

$\lambda_i$ representa a taxa específica de falha do bloco de origem $i$, em falhas/(km·h);

$L_i$ corresponde ao comprimento total do bloco de origem $i$, em km;

$N_{c,j}$ representa o número de consumidores do bloco afetado $j$;

$b_{ij}^h$ é o elemento da Matriz Binária de Interrupções Permanentes (MBIP), assumindo valor 1 quando a contingência originada no bloco $i$ provoca uma interrupção permanente no bloco $j$, durante o patamar horário $h$, e 0 caso contrário;

$N_{tot}$ é o número total de consumidores da rede.

O termo $FEC_{ij}^h$ representa, portanto, a contribuição individual de uma única contingência sobre um único bloco afetado.

Como uma mesma contingência pode provocar interrupções permanentes em diversos blocos, a contribuição total da contingência originada no bloco $i$, no patamar horário $h$, é obtida pela soma das contribuições de todos os blocos afetados conforme (47),

$$FEC_{ih} = \sum_{j=1}^{N_{BL}} FEC_{ij}^h \tag{47}$$

Considerando-se todas as possíveis contingências da rede, obtém-se o indicador correspondente ao patamar horário $h$ através do somatório de todas as fontes de falha $i$ em (48):

$$FEC_h = \sum_{i=1}^{N_{BL}} FEC_i^h \tag{48}$$

Substituindo-se (46) em (47) e (48), obtém-se (49):

$$FEC_h = \sum_{i=1}^{N_{BL}} \sum_{j=1}^{N_{BL}} \frac{(\lambda_i L_i) N_{c,j} b_{ij}^h}{N_{tot}} \tag{49}$$

Como a metodologia considera vinte e quatro patamares horários representativos de um dia típico, o indicador diário é calculado pela soma das contribuições horárias em (50),

$$FEC_{dia} = \sum_{h=1}^{24} \sum_{i=1}^{N_{BL}} \sum_{j=1}^{N_{BL}} \frac{(\lambda_i L_i) N_{c,j} b_{ij}^h}{N_{tot}} \tag{50}$$

Admitindo que o comportamento diário seja representativo ao longo do ano, o indicador anual é obtido por (51),

$$FEC_{ano} = 365 \sum_{h=1}^{24} \sum_{i=1}^{N_{BL}} \sum_{j=1}^{N_{BL}} \frac{(\lambda_i L_i) N_{c,j} b_{ij}^h}{N_{tot}} \tag{51}$$

A dedução apresentada evidencia que o FEC é obtido por um processo sucessivo de agregação das contribuições individuais das contingências. Essa estrutura estabelece uma correspondência direta entre a formulação matemática e a lógica empregada pela ISRM, permitindo que o impacto de cada bloco de origem seja acompanhado desde sua ocorrência até sua contribuição para o indicador anual da rede. Dessa forma, preserva-se a rastreabilidade do processo de cálculo, tornando explícita a influência conjunta das taxas de falha, das características físicas dos blocos e dos resultados do processo restaurativo na composição do indicador final. Essa característica constitui um dos diferenciais da metodologia proposta, pois permite analisar não apenas o valor global do FEC, mas também a origem das contribuições que o compõem.

### 4.6.3 Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC)

A Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC) representa o tempo médio de interrupção experimentado por cada consumidor ao longo do período de

análise. Enquanto o FEC quantifica a frequência esperada das interrupções permanentes, o DEC incorpora também o tempo necessário para o restabelecimento do fornecimento de energia elétrica, refletindo diretamente a eficiência do processo restaurativo.

Considere uma contingência originada no bloco $i$, durante o patamar horário $h$. A contribuição dessa contingência para a duração equivalente de interrupção dos consumidores pertencentes ao bloco $j$ é expressa por (52). O produto $(\lambda_i L_i)$ representa a frequência de ocorrência das faltas originadas no bloco $i$, enquanto $t_{ijh}$ representa o tempo efetivo de interrupção experimentado pelo bloco $j$, conforme registrado na MTIB.

$$DEC_{ijh} = \frac{(\lambda_i L_i) N_{c,j} b_{ij}^h t_{ij}^h}{N_{tot}} \tag{52}$$

em que:

$\lambda_i$ representa a taxa específica de falha do bloco de origem $i$, em falhas/(km.h);

$L_i$ corresponde ao comprimento total do bloco de origem $i$, em km;

$N_{c,j}$ representa o número de consumidores pertencentes ao bloco afetado $j$;

$b_{ij}^h$ é o elemento da MBIP, assumindo valor 1 quando a contingência originada no bloco $i$ provoca uma interrupção permanente no bloco $j$, durante o patamar horário $h$, e 0 caso contrário;

$t_{ij}^h$ corresponde ao tempo efetivo de interrupção do bloco $j$, decorrente da contingência originada no bloco $i$, durante o patamar horário $h$, conforme registrado na MTIB;

$N_{tot}$ é o número total de consumidores da rede.

O termo $DEC_{ij}^h$ representa, portanto, a contribuição de uma contingência originada no bloco $i$ para a duração equivalente de interrupção dos consumidores do bloco $j$. O produto $(b_{ij}^h t_{ij}^h)$ garante que somente os tempos associados às interrupções classificadas como permanentes contribuam para o indicador, anulando automaticamente as interrupções cuja duração não ultrapassa o limite regulatório. Como uma mesma contingência pode provocar interrupções em diversos blocos, a contribuição total do bloco de origem $i$, no patamar horário $h$, é obtida pela soma das contribuições de todos os blocos afetados $j$ (53),

$$DEC_{i,h} = \sum_{j=1}^{N_{BL}} DEC_{ij}^h \tag{53}$$

Considerando todas as contingências possíveis da rede, o indicador correspondente ao patamar horário $h$ é determinado por (54),

$$DEC_h = \sum_{i=1}^{N_{BL}} DEC_i^h \tag{54}$$

Substituindo-se (52) em (53) e (54), obtém-se (55),

$$DEC_h = \sum_{i=1}^{N_{BL}} \sum_{j=1}^{N_{BL}} \frac{(\lambda_i L_i) N_{c,j} b_{ij}^h t_{ij}^h}{N_{tot}} \tag{55}$$

Como a metodologia emprega vinte e quatro patamares horários representativos de um dia típico, o indicador diário é obtido pela soma das contribuições horárias (56),

$$DEC_{dia} = \sum_{h=1}^{24} \sum_{i=1}^{N_{BL}} \sum_{j=1}^{N_{BL}} \frac{(\lambda_i L_i) N_{c,j} b_{ij}^h t_{ij}^h}{N_{tot}} \tag{56}$$

Admitindo que o comportamento diário seja representativo ao longo do ano, o indicador anual é determinado por (57),

$$DEC_{ano} = 365 \sum_{h=1}^{24} \sum_{i=1}^{N_{BL}} \sum_{j=1}^{N_{BL}} \frac{(\lambda_i L_i) N_{c,j} b_{ij}^h t_{ij}^h}{N_{tot}} \tag{57}$$

A dedução apresentada evidencia que o cálculo do DEC segue a mesma estrutura hierárquica adotada para o FEC, preservando a rastreabilidade das contribuições individuais das contingências ao longo de todas as etapas de agregação. A principal diferença entre os dois indicadores reside na incorporação dos tempos de interrupção obtido da MTIB, permitindo que os efeitos das estratégias de restauração sejam explicitamente refletidos no indicador final. Dessa forma, o DEC não apenas quantifica a duração média das interrupções permanentes experimentadas pelos consumidores, mas também traduz, de forma estruturada, os benefícios proporcionados pelas ações restaurativas implementadas pela ISRM.

### 4.6.4 Energia Não Distribuída (END)

A Energia Não Distribuída (END) representa a quantidade de energia que deixa de ser fornecida aos consumidores em decorrência das interrupções ocorridas na rede elétrica. Diferentemente dos indicadores FEC e DEC, cuja determinação utiliza a classificação das interrupções permanentes, o cálculo da END considera a potência efetivamente não suprida ao longo do respectivo período de desligamento.

Na literatura, a END é frequentemente estimada pelo produto entre a demanda do consumidor e o tempo de interrupção, assumindo implicitamente que a potência permanece constante durante todo o período de desligamento. Embora essa simplificação seja adequada para análises estáticas, ela não representa de forma satisfatória situações em que a demanda varia ao longo do tempo ou quando o processo restaurativo modifica progressivamente as condições de atendimento da rede.

Na ISRM, a determinação da END utiliza os mesmos resultados do processo restaurativo empregados na construção da MTIB. Entretanto, enquanto o DEC utiliza diretamente os tempos de interrupção registrados nessa matriz, a END requer a reconstrução da potência efetivamente não suprida ao longo do período de desligamento. Dessa forma, sua determinação considera simultaneamente a evolução temporal da demanda e as alterações nas condições de atendimento decorrentes das ações restaurativas.

O período de desligamento considerado no cálculo é coerente com os tempos efetivos de interrupção registrados na MTIB. A avaliação é realizada cronologicamente, permitindo incorporar eventuais perdas de sustentabilidade do atendimento por alimentadores de reserva ou microrredes, bem como a disponibilidade dos REDs ao longo da contingência.

Além disso, a END é determinada separadamente para diferentes classes de consumidores, como residenciais, comerciais e industriais. Essa segregação permite quantificar individualmente os impactos das interrupções sobre cada classe de consumo, preservando a flexibilidade da metodologia para futuras aplicações em problemas de planejamento e otimização que priorizem categorias específicas de consumidores. Posteriormente, os resultados individuais são agregados para obtenção da energia não distribuída total da rede.

Considere uma contingência originada no bloco $i$, durante o patamar horário $h$. Para uma determinada classe de consumidores $c$, sendo $c \in \{Res, Com, Ind\}$, a energia não distribuída correspondente ao bloco afetado $j$ é definida por (58),

$$E_{ij}^{(h,c)} = \int_0^{T_I^h} P_j^{(c)}\,(h+\tau)\,\gamma_{ij}^{(h)}(\tau)\,d\tau \tag{58}$$

em que:

$E_{ij}^{(h,c)}$ representa a energia não distribuída da classe de consumidores $c$, no bloco afetado $j$, decorrente de uma contingência originada no bloco $i$, durante o patamar horário $h$, em kWh;

$T_I^h$ é o tempo transcorrido entre o início da contingência e sua normalização definitiva, em horas;

$\tau$ é o tempo decorrido desde o início da contingência, em horas;

$P_j^{(c)}(h+\tau)$ representa a potência demandada pela classe $c$ no bloco $j$, no instante cronológico correspondente a $(h+\tau)$, em kW; e

$\gamma_{ij}^{(h)}(\tau)$ é a variável indicadora do estado de atendimento do bloco $j$, assumindo valor 1 quando sua demanda permanece sem atendimento e 0 quando o fornecimento está restabelecido.

Na avaliação discreta da ISRM, a Equação (58) é aplicada ao longo de todo o intervalo $[0, TI(h)]$. Em cada passo temporal, o argumento $h+\tau$ é associado ao patamar horário $h_k$ definido na avaliação cronológica da Seção 5.4.1, de modo que a potência da classe $c$ e o estado de atendimento do bloco sejam avaliados no mesmo instante. A função $\gamma_{ij}^{(h)}(\tau)$ assume valor unitário nos intervalos sem atendimento e valor nulo nos intervalos em que o fornecimento está restabelecido. Se ocorrer perda posterior de sustentabilidade, a função volta a assumir valor unitário até $TI(h)$. Quando a interrupção ultrapassa o fim do dia, o mapeamento de $h_k$ preserva a periodicidade da curva diária adotada. As horas completas e as frações de hora associadas às transições de estado são consideradas, assegurando que a END e os tempos registrados na MTIB sejam obtidos a partir da mesma trajetória cronológica de atendimento.

Determinada a energia não distribuída para cada bloco afetado, a contribuição esperada da contingência originada no bloco $i$ é obtida por (59):

$$END_{ij}^{(h,c)} = (\lambda_i L_i) E_{ij}^{(h,c)} \tag{59}$$

em que:

$\lambda_i$ representa a taxa específica de falha do bloco de origem $i$, e falhas/(km.h);

$L_i$ corresponde ao comprimento total do bloco de origem $i$, em km;

$E_{ij}^{(h,c)}$ representa a energia não distribuída no bloco $j$, para a classe $c$, decorrente da contingência originada no bloco $i$, calculada conforme a Equação (58).

O termo $END_{ij}^{(h,c)}$ representa, portanto, a contribuição individual de uma contingência sobre um único bloco afetado, para uma determinada classe de consumidores.

Como uma mesma contingência pode interromper simultaneamente o fornecimento em diversos blocos da rede, a contribuição total do bloco de origem $i$, durante o patamar horário $h$, é dada por (60),

$$END_{ih}^{(c)} = \sum_{j=1}^{N_{BL}} E\,ND_{ij}^{(h,c)} \tag{60}$$

Considerando todas as contingências possíveis da rede, obtém-se a energia não distribuída correspondente ao patamar horário dado por (61),

$$END_h^{(c)} = \sum_{i=1}^{N_{BL}} E\,ND_i^{(h,c)} \tag{61}$$

Substituindo-se (59) em (60), obtém-se (62):

$$END_h^{(c)} = \sum_{i=1}^{N_{BL}} \sum_{j=1}^{N_{BL}} (\lambda_i\, L_i) E_{ij}^{(h,c)} \tag{62}$$

A energia não distribuída diária é obtida pela soma das contribuições dos vinte e quatro patamares horários considerados na metodologia conforme (63),

$$END_{dia}^{(c)} = \sum_{h=1}^{24} \sum_{i=1}^{N_{BL}} \sum_{j=1}^{N_{BL}} (\lambda_i\, L_i) E_{ij}^{(h,c)} \tag{63}$$

Admitindo que o dia analisado seja representativo da operação anual da rede, a energia não distribuída anual de cada classe de consumidores é determinada por (64),

$$END_{ano}^{(c)} = 365\, END_{dia}^{(c)} \tag{64}$$

A energia não distribuída total da rede é obtida pela agregação das contribuições das classes de consumidores consideradas em (65),

$$END_{ano}^{Total} = END_{ano}^{Res} + END_{ano}^{Com} + END_{ano}^{Ind} \tag{65}$$

A formulação proposta preserva a mesma estrutura hierárquica de agregação adotada para os indicadores FEC e DEC, porém introduz uma etapa adicional correspondente à determinação da energia efetivamente não suprida ao longo do intervalo de interrupção. O END permite incorporar explicitamente as curvas horárias de carga, a dinâmica temporal do processo restaurativo e a disponibilidade dos recursos energéticos distribuídos, resultando em uma representação mais realista do impacto energético das contingências. Além disso, a segregação da END por classe de consumidores amplia a abrangência da metodologia, permitindo que a confiabilidade da rede seja avaliada não apenas sob a perspectiva da energia total não distribuída, mas também segundo os diferentes perfis de consumo atendidos.

### 4.6.5 Custo da Interrupção ao Consumidor (CIC)

Uma mesma quantidade de energia não fornecida pode resultar em impactos financeiros distintos, dependendo do perfil dos consumidores afetados e das características das atividades por eles desenvolvidas. Assim, com o objetivo de incorporar essa dimensão à análise da confiabilidade, a metodologia ISRM utiliza o indicador Custo da Interrupção ao Consumidor (CIC), obtido a partir da associação entre a energia não distribuída e o respectivo Valor da Carga Perdida (VCP) de cada classe de consumidores. Dessa forma, além de quantificar os impactos técnicos das interrupções, a metodologia passa a avaliar também seus reflexos econômicos, permitindo uma análise mais abrangente do desempenho do sistema elétrico.

#### *4.6.5.1 Valor da Carga Perdida (VCP)*

O Valor da Carga Perdida (VCP), internacionalmente denominado *Value of Lost Load* (VoLL), representa o custo econômico associado à indisponibilidade de uma unidade de energia elétrica para determinada classe de consumidores. Esse parâmetro permite atribuir valor monetário à energia não fornecida, sendo expresso em unidades monetárias por unidade de energia, como R$/kWh ou USD/kWh.

O VCP constitui um parâmetro de natureza socioeconômica, cujo valor depende das características dos consumidores, da metodologia utilizada em sua determinação e do contexto econômico considerado. Dessa forma, diferentes classes de consumo podem apresentar impactos econômicos distintos para uma mesma quantidade de energia não suprida. Na ISRM, sua utilização permite converter a Energia Não Distribuída (END), determinada separadamente para cada classe de consumidores, no correspondente Custo da Interrupção ao Consumidor (CIC).

Neste trabalho, foram adotados como referência os valores de VCP apresentados no relatório "**Avaliação dos custos relacionados às interrupções de energia elétrica e suas implicações na regulação: relatório 5"** da ANEEL, para as classes residencial, comercial e industrial (SINAPSIS, 2016). Como esses valores se referem a uma base monetária anterior à utilizada nas simulações, foi realizada inicialmente sua atualização monetária para 30 de abril de 2026, por meio da Calculadora do Cidadão do Banco Central do Brasil, utilizando como índice de correção o Índice Geral de Preços – Mercado (IGP-M), calculado pela Fundação Getúlio Vargas. Após a atualização, os valores obtidos em reais foram convertidos para dólares dos Estados Unidos (USD), adotando-se a cotação PTAX de venda de 30 de abril de 2026, correspondente a 1 USD = R$ 4,9886.

Esse procedimento permite expressar os impactos econômicos das interrupções em uma base monetária comum e compatível com os demais parâmetros econômicos empregados neste trabalho. Os valores de VCP resultantes, utilizados nas simulações são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 Valores de Carga Perdida

| Classe de consumidor ($c$) | Valor em R$/kWh Abril/2016 | Valor em USD / kWh Abril/2026 |
|---|---|---|
| Residencial | 19,7 | 7,62 |
| Comercial | 18,1 | 7,00 |
| Industrial | 13,9 | 5,38 |

VCP (USD/kWh, base monetária: 30/04/2026)

A formulação proposta pela ISRM é baseada na segregação dos consumidores por classes, permitindo que diferentes categorias de consumo sejam tratadas de forma independente ao longo de todo o processo de avaliação da confiabilidade. Embora, neste trabalho, sejam consideradas apenas as classes residencial, comercial e industrial, a metodologia admite naturalmente a incorporação de novas categorias, como consumidores rurais ou do poder público, mediante a inclusão dos respectivos valores de VCP, sem necessidade de modificações em sua estrutura conceitual.

#### *4.6.5.2 Determinação do Custo da Interrupção*

Uma vez determinada a Energia Não Distribuída para cada classe de consumidores, o Custo da Interrupção correspondente é obtido pelo produto da END pelo respectivo Valor da Carga Perdida conforme (66),

$$CIC^{(c)} = END^{(c)} \cdot VCP^{(c)} \tag{66}$$

em que:

$END^{(c)}$ representa a energia não distribuída anual da classe de consumidores $c$;

$VCP^{(c)}$ corresponde ao Valor da Carga Perdida associado à mesma classe de consumidores.

Como a END é determinada individualmente para cada classe de consumidores, o custo da interrupção também é obtido de forma independente para cada classe considerada. O custo total anual da interrupção da rede é, então, obtido pela agregação das contribuições individuais como em (67),

$$CIC^{Total} = \sum_{c} C\,IC^{(c)} \tag{67}$$

em que $C$ representa o conjunto das classes de consumidores consideradas na análise.

Substituindo-se (66) em (67), obtém-se (68),

$$CIC^{Total} = \sum_{c} END^{(c)} \cdot VCP^{(c)} \tag{68}$$

Essa formulação preserva a segregação por classes de consumidores adotada na determinação da END, permitindo quantificar individualmente os impactos econômicos das interrupções para cada segmento de consumo e, posteriormente, agregá-los para obtenção do custo total da interrupção da rede. Dessa forma, a metodologia estabelece uma ligação direta entre os impactos energéticos decorrentes das contingências e suas consequências econômicas, ampliando a avaliação da confiabilidade para além dos indicadores técnicos tradicionalmente empregados e fornecendo subsídios para estudos de planejamento, operação e otimização de sistemas de distribuição.

# 5 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DA ISRM

A execução da ISRM inicia-se com a leitura da rede elétrica e dos parâmetros necessários à simulação. A partir dos dados da rede, são identificados os blocos de carga, dispositivos de proteção, chaves, alimentadores e REDs, sendo construídas as estruturas topológicas e elétricas utilizadas durante o processo restaurativo.

A simulação é organizada em dois laços principais. O primeiro percorre os 24 patamares horários, nos quais são atualizadas as demandas dos consumidores, a disponibilidade dos alimentadores de reserva e as condições operativas dos REDs. Para cada patamar, o segundo laço percorre os eventos de falta considerados na rede.

Em cada contingência, são identificados o dispositivo de proteção atuante, o superbloco em falta e os blocos inicialmente desligados. Em seguida, são formados os superblocos e o respectivo grafo equivalente, sobre o qual são executadas, sequencialmente, as etapas de restauração a montante, restauração a jusante por alimentadores de reserva e formação de microrredes para os superblocos que permanecem desenergizados.

Após a definição da configuração inicial de restauração, é avaliada sua sustentabilidade ao longo do período de interrupção, considerando a evolução temporal das cargas, dos alimentadores de reserva e dos REDs. Os tempos efetivos de interrupção são registrados na MTIB e, paralelamente, é determinada a energia não suprida por classe de consumidor para cada contingência.

Concluída a avaliação de todas as contingências de um patamar, a MBIP é obtida a partir da MTIB e são calculadas as contribuições horárias de FEC, DEC e END. Após os 24 patamares, esses resultados são agregados e anualizados. O CIC é então obtido a partir da END anual de cada classe de consumidor e do respectivo Valor da Carga Perdida (VCP). O Quadro 1 sintetiza as principais etapas da ISRM.

Quadro 1 - Pseudocódigo geral da ISRM

| | |
|---|---|
| **Entrada** | dados elétricos e topológicos da rede; configuração de automação; curvas horárias das cargas e dos alimentadores de reserva; perfis e parâmetros dos REDs; tempos de interrupção; taxas de falha; valores de VCP. |
| **Saída** | indicadores anuais FEC, DEC, END e CIC; registros das restaurações e das microrredes formadas. |
| 1 | Inicializar a rede e construir as estruturas topológicas e elétricas |
| 2 | Mapear os REDs nos blocos da rede |
| 3 | Inicializar os acumuladores anuais dos indicadores |
| 4 | Para cada patamar horário $h = 1, \dots, 24$, faça |
| 5 | Atualizar as demandas, as disponibilidades dos $AL_{Res}$ e os perfis dos REDs |
| 6 | Inicializar a $MTNB^{(h)}$ e os acumuladores de END por classe de consumidores |

Continuação: Quadro 1- Pseudocódigo geral da ISRM

| | |
|---|---|
| 7 | Para cada contingência $F_i$, faça |
| 8 | Simular a contingência e identificar o dispositivo de proteção atuante |
| 9 | Identificar o SBF e os blocos inicialmente desligados |
| 10 | Formar os superblocos e o grafo equivalente |
| 11 | Inicializar, para a contingência, o estado energético dos BESS a partir do SoC do patamar $h$ |
| 12 | Executar a restauração a montante, obtendo $LBRA_m$, $LBRM_m$ e $LSBI_m$ |
| 13 | Executar a restauração a jusante, obtendo $LBRA_j$, $LBRM_j$ e $LSBI_j$ |
| 14 | Consolidar os resultados em $LBRA$, $LBRM$ e $LSBI$ |
| 15 | Formar microrredes com os superblocos remanescentes em $LSBI$, excetuando o SBF |
| 16 | Avaliar cronologicamente a sustentabilidade dos $AL_{Res}$ e das microrredes, atualizando demanda, geração fotovoltaica e energia dos BESS |
| 17 | Determinar o vetor de tempos efetivos $t_i^{(h)}$ e incorporá-lo à $MTNB^{(h)}$ |
| 18 | Calcular $E_{ij}^{(h,c)}$ para cada classe $c$ a partir do mesmo histórico cronológico de atendimento, conforme a Equação (58) |
| 19 | Fim Para |
| 20 | Obter a $MBIP^{(h)}$ a partir da classificação dos tempos registrados na $MTNB^{(h)}$ |
| 21 | Calcular as contribuições de FEC e DEC do patamar |
| 22 | Agregar as contribuições esperadas de END por classe no patamar |
| 23 | Acumular os resultados do patamar |
| 24 | Fim Para |
| 25 | Anualizar FEC, DEC e END |
| 26 | Obter a END anual total pela soma das classes de consumidores |
| 27 | Calcular o CIC anual de cada classe a partir da respectiva END e do VCP |
| 28 | Calcular o CIC anual total |
| 29 | Retornar os resultados |

Fonte: Elaborado pelo autor.

## 5.1 RESTAURAÇÃO A MONTANTE

A restauração a montante compreende os superblocos situados entre o dispositivo de proteção atuante (DP) e o superbloco em falta (SBF). Após a identificação dessa região, a ISRM verifica inicialmente quais superblocos podem ser recompostos automaticamente pela fonte principal. Os superblocos remanescentes são então avaliados quanto à possibilidade de transferência automática para alimentadores de reserva (AL_Res), considerando a topologia da região, a automação das chaves, a capacidade disponível dos alimentadores e a contribuição local dos REDs.

Para distinguir os resultados dessa etapa daqueles posteriormente obtidos na restauração a jusante, são adotados os conjuntos $LBRA_m$, $LBRM_m$ e $LSBI_m$. O conjunto $LBRA_m$ reúne os superblocos restaurados automaticamente a montante, seja pela fonte principal ou por

transferência automática para um AL_Res; $LBRM_m$ reúne os superblocos cuja recomposição a montante requer operação manual; e $LSBI_m$ contém os superblocos que permanecem isolados ao término dessa etapa, incluindo o SBF.

O procedimento é realizado em duas etapas sequenciais. Na primeira, são identificados os superblocos cuja recomposição pode ser realizada automaticamente pela fonte principal, de acordo com a automação do DP e das chaves seccionadoras presentes no caminho até o SBF. Na segunda, os superblocos que permanecem pendentes são avaliados pelos AL_Res disponíveis. Aqueles que não forem transferidos automaticamente nessa etapa são classificados para recomposição manual pela fonte principal.

### 5.1.1 Mapeamento Topológico dos superblocos a Montante da falta

O processamento inicia-se pela identificação do primeiro dispositivo de proteção a montante do SBF, que pode corresponder a um disjuntor, religador ou fusível. A busca percorre as conexões a montante até localizar o primeiro dispositivo de proteção responsável pelo seccionamento da região afetada.

Identificado o DP, determina-se o caminho entre o superbloco associado a esse dispositivo e o SBF, excluindo-se o próprio superbloco em falta. A partir desse caminho é definido o conjunto $\Omega_mont$, formado pelos superblocos restauráveis pertencentes à região compreendida entre o DP e o SBF, incluindo as ramificações associadas a esse trecho.

### 5.1.2 Fase 1- Restauração Automática pela Fonte Principal

Após o mapeamento da região a montante, a ISRM identifica a primeira chave seccionadora normalmente fechada (NF) automatizada existente no caminho entre o DP e o SBF. A possibilidade de recomposição automática pela fonte principal depende da existência dessa chave e da condição de automação do dispositivo de proteção atuante.

Quando ambas as condições são satisfeitas, é determinado o subconjunto $\Omega_{auto}$, correspondente aos superblocos compreendidos entre o DP e a primeira chave NF automatizada. Esses superblocos são classificados como restaurados automaticamente a montante, conforme (69):

$$LBRA_m = \Omega_{auto} \tag{69}$$

em que $LBRA_m$ é o conjunto de superblocos restaurados automaticamente a montante pela fonte principal e $\Omega_auto$ é o subconjunto de superblocos compreendido entre o DP e a primeira chave NF automatizada.

Os demais superblocos da região a montante permanecem pendentes e são encaminhados para avaliação pelos alimentadores de reserva. O conjunto correspondente é definido pela (70):

$$\Omega_{AlRes,m} = \Omega_{mont} \backslash \Omega_{auto} \tag{70}$$

em que $\Omega_{AlRes,m}$ é o conjunto de superblocos a montante encaminhados para avaliação pelos $\Omega_{AlRes}$, $\Omega_{mont}$é o conjunto total de superblocos restauráveis a montante e $\Omega_{auto}$ é o subconjunto restaurado automaticamente pela fonte principal.

Se o DP não possuir automação, a recomposição automática pela fonte principal não é realizada, mesmo que exista uma chave NF automatizada no caminho. Nesse caso, todo o conjunto restaurável a montante é encaminhado para avaliação pelos alimentadores de reserva, conforme(71):

$$\Omega_{Al_{res,m}} = \Omega_{mont} \tag{71}$$

O mesmo encaminhamento ocorre quando nenhuma chave NF automatizada é encontrada entre o DP e o SBF. A exceção corresponde ao caso em que a região identificada contém apenas o superbloco associado à fonte principal, que não é submetido à avaliação pelos alimentadores de reserva.

Ao término dessa fase, $LBRA_m$ contém os superblocos recompostos automaticamente pela fonte principal, enquanto $\Omega_{AlRes,m}$ reúne aqueles que seguem para a Fase 2. O conjunto $LBRM_m$ permanece vazio nesse momento, pois sua definição ocorre somente após a tentativa de transferência automática pelos alimentadores de reserva. O conjunto $LSBI_m$ mantém inicialmente o SBF como região isolada.

O procedimento de decisão da Fase 1 é sintetizado no pseudocódigo apresentado a seguir no Quadro 2.

Quadro 2- Pseudocódigo – Fase 1 da restauração a montante pela fonte principal

| | |
|---|---|
| **Entrada** | grafo de superblocos; SBF; dispositivo de proteção a montante (DP); caminho entre o DP e o SBF; estados de automação do DP e das chaves NF. |
| **Saída** | $LBRA_m$, $LBRM_m$ e $LSBI_m$ inicializados; conjunto $\Omega_{ALRes,m}$ com os superblocos encaminhados à Fase 2. |
| 1 | Inicializar $LBRA_m \leftarrow \varnothing$, $LBRM_m \leftarrow \varnothing$, $LSBI_m \leftarrow \{SBF\}$ e $\Omega_{ALRes,m} \leftarrow \varnothing$ |
| 2 | Determinar $\Omega_{mont}$, conjunto de superblocos restauráveis entre o DP e o SBF |
| 3 | Identificar a primeira chave NF automatizada no caminho entre o DP e o SBF |
| 4 | Se não houver chave NF automatizada, então |

Continuação: Quadro 2 - Pseudocódigo – Fase 1 da restauração a montante pela fonte principal

| | |
|---|---|
| 5 | Se $\Omega_{mont} = \{\text{RstSuperBloco_Swing}\}$, então |
| 6 | Manter $\Omega_{ALRes,m} \leftarrow \varnothing$ |
| 7 | Senão |
| 8 | Definir $\Omega_{ALRes,m} \leftarrow \Omega_{mont}$ |
| 9 | Fim Se |
| 10 | Retornar $LBRA_m$, $LBRM_m$, $LSBI_m$ e $\Omega_{ALRes,m}$ |
| 11 | Fim Se |
| 12 | Determinar $\Omega_{auto}$, subgrafo compreendido entre o DP e a primeira chave NF automatizada |
| 13 | Se o DP possuir automação, então |
| 14 | Definir $LBRA_m \leftarrow \Omega_{auto}$, conforme a Equação (69) |
| 15 | Definir $\Omega_{ALRes,m}$ como o subconjunto de $\Omega_{mont}$ formado pelos superblocos não pertencentes a $\Omega_{auto}$, conforme a Equação (70) |
| 16 | Senão |
| 17 | Definir $\Omega_{ALRes,m} \leftarrow \Omega_{mont}$, conforme a Equação (71) |
| 18 | Fim Se |
| 19 | Retornar $LBRA_m$, $LBRM_m$, $LSBI_m$ e $\Omega_{ALRes,m}$ |

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.1.3 Fase 2 - Transferência Automática via Alimentadores de Reserva e REDs

Os superblocos pertencentes a $\Omega_{Al_res}$ são submetidos à avaliação pelos alimentadores de reserva. Para cada região candidata, são identificados os $Al_{Res}$ que possuem conexão topológica com os superblocos ainda desenergizados, juntamente com o respectivo superbloco raiz e a chave normalmente aberta (NA) responsável pela interligação.

Quando mais de um $Al_{Res}$ pode participar da restauração, os alimentadores são processados em ordem decrescente da potência ativa disponível no patamar horário analisado. Sendo $\pi_r$ a permutação que define a ordem de processamento dos $N_{Al_res}$ alimentadores candidatos, a prioridade é expressa por (72):

$$P^{\text{res}}_{\pi_1}(0,h) \geq P^{\text{res}}_{\pi_2}(0,h) \geq \cdots \geq P^{\text{res}}_{\pi_{N_{Al_res}}}(0,h) \tag{72}$$

em que

$P^{\text{res}}_{\pi_1}(0,h)$ é a potência ativa disponível no início da restauração para o alimentador que ocupa a posição $k$ na sequência de prioridade;

$\pi k$ identifica o alimentador nessa posição;

$N_{Al_res}$ é o número de alimentadores de reserva candidatos e h corresponde ao patamar horário da contingência.

A potência reativa não interfere nessa ordenação, mas é considerada juntamente com a potência ativa durante a verificação da capacidade de atendimento.

Para que determinado $Al_{Res}$ um participe da transferência automática, sua chave NA de interligação deve possuir automação. Caso essa condição não seja satisfeita, o alimentador é desconsiderado nessa fase e o próximo $Al_{Res}$ na sequência de prioridade é avaliado.

A partir do superbloco raiz de cada $Al_{Res}$ elegível, é construído um subgrafo contendo os superblocos candidatos à restauração. O SBF e o superbloco adjacente utilizado como limite de isolamento são excluídos da expansão. Além disso, somente conexões identificadas como automáticas são mantidas no subgrafo utilizado nessa fase.

A avaliação da capacidade do alimentador considera a contribuição dos REDs existentes em cada superbloco. A potência ativa disponibilizada pelos REDs corresponde à contribuição conjunta dos recursos disponíveis no patamar da falta, incluindo os sistemas fotovoltaicos e BESS. Assim, a potência ativa requerida do $Al_{Res}$ pelo superbloco $i$ é determinada pela demanda líquida conforme (73) enquanto a demanda reativa líquida é dada por (74):

$$P_i^{liq}(h) = max\left[0, P_i^L(h) - P_i^{RED}(h)\right] \tag{73}$$

$$Q_i^{liq}(h) = max\left[0, Q_i^L(h) - Q_i^{RED}(h)\right] \tag{74}$$

em que

$P_i^{liq}(h)$ é a potência ativa líquida requerida do $Al_{Res}$ pelo superbloco $i$;

$P_i^L(h)$ é a demanda ativa do superbloco $i$;

$P_i^{RED}(h)$ é a potência ativa disponibilizada pelos REDs locais;

$Q_i^{liq}(h)$ é a potência reativa líquida requerida do $Al_{Res}$ pelo superbloco $i$;

$Q_i^L(h)$ é a demanda reativa do superbloco $i$;

$Q_i^{RED}(h)$ é a potência reativa disponibilizada pelos REDs locais; e

$h$ representa o patamar horário analisado.

A utilização da função max[0,·] impede a formação de demandas líquidas negativas. Portanto, nessa etapa a geração local reduz a parcela requerida do alimentador, mas um eventual excedente no superbloco não é transferido como crédito de potência para outro superbloco.

Essa abordagem representa um critério conservador para a participação dos REDs na restauração a montante. Nessa região, caso a transferência automática por um $Al_{Res}$ não seja viável, os superblocos remanescentes ainda podem ser recompostos manualmente pela fonte principal após o isolamento da falta. Dessa forma, os REDs são considerados na redução da demanda local de cada superbloco, sem que eventual excedente seja utilizado para ampliar a

capacidade de restauração dos superblocos subsequentes. A jusante, onde essa alternativa direta de recomposição pela fonte principal não está disponível, a contribuição dos REDs é tratada de forma incremental, conforme apresentado na Seção 5.2.

Quando a restrição de fator de potência mínimo é habilitada, a contribuição reativa efetivamente considerada para os REDs é limitada conforme (75):

$$Q_i^{RED}(h) = min\left[\left|Q_{i,disp}^{RED}(h)\right|, \eta_Q |P_i^{RED}(h)| \tan(cos^{-1}(fp_{min}))\right] \quad (75)$$

em que,

$Q_i^{RED}(h)$ é a potência reativa efetivamente considerada para os REDs do superbloco $i$;

$Q_{i,disp}^{RED}(h)$ é a potência reativa disponível;

$P_i^{RED}(h)$ é a potência ativa disponibilizada pelos REDs;

$\eta_Q$ representa o fator aplicado à capacidade de suporte reativo; e

$fp_{min}$ o fator de potência mínimo adotado.

Quando essa restrição não é habilitada, permanece apenas a limitação associada à potência reativa disponível e ao fator $\eta_Q$.

A exploração do subgrafo é realizada por busca em largura (BFS). Para cada superbloco visitado, são avaliadas as demandas líquidas acumuladas de potência ativa e reativa e as condições de automação necessárias à transferência. A aceitação direta do superbloco também depende da existência de seccionadores automatizados nas interfaces a montante e a jusante consideradas.

Quando a inclusão direta não é confirmada, é aplicado um mecanismo de *look-ahead* estrito. É formada uma janela iniciada no superbloco corrente e avalia sequencialmente seus sucessores elegíveis, acumulando suas demandas líquidas. A primeira janela que satisfaz as condições impostas pelo algoritmo é aceita como um segmento, sendo sua demanda incorporada à potência já comprometida do $Al_{Res}$. A expansão prossegue então a partir do último superbloco incluído no segmento.

Para um segmento candidato $\Omega_s$, a condição de potência é definida pela (76), enquanto sua potência reativa, quando considerada é dada pela (77):

$$P_{ac,r}(h) + \sum_{i \in \Omega_s} P_i^{liq}(h) \leq P_r^{res}(0,h) \quad (76)$$

$$Q_{ac,r}(h) + \sum_{i \in \Omega_s} Q_i^{liq}(h) \leq Q_r^{res}(0,h) \quad (77)$$

em que:

$P_{ac,r}(h)$ é a potência ativa já comprometidas pelas restaurações anteriormente aceitas pelo alimentador $r$;

$\Omega_s$ é o conjunto de superblocos pertencentes ao segmento candidato;

$P_i^{liq}(h)$ é a demanda ativa líquida do superbloco $i$;

$P_r^{res}(0,h)$ é a potência ativa inicialmente disponível no alimentador r;

$Q_{ac,r}(h)$ é a potência reativa já comprometida pelas restaurações anteriormente aceitas pelo alimentador $r$;

$Q_i^{liq}$(h) é a demanda reativa líquida do superbloco $i$; e

$Q_r^{res}(0,h)$ é a potência reativa inicialmente disponível no alimentador $r$.

Uma vez confirmada a restauração, os superblocos aceitos são incorporados a $LBRA_m$ e associados ao respectivo $Al_{Res}$. Um superbloco já restaurado não pode ser posteriormente atribuído a outro alimentador de reserva, assegurando a exclusividade de atendimento durante o processamento sequencial dos $Al_{Res}$.

Após a avaliação de todos os alimentadores candidatos, os superblocos da região a montante que não puderam ser transferidos automaticamente são incluídos em $LBRM_m$, correspondendo à recomposição manual pela fonte principal. O SBF permanece em $LSBI_m$ até a normalização da contingência.

Dessa forma, ao término da restauração a montante, os resultados são representados pelos conjuntos $LBRA_m$, $LBRM_m$ e $LSBI_m$.

O procedimento computacional da Fase 2 é sintetizado no pseudocódigo apresentado a seguir no Quadro 3:

Quadro 3 - Fase 2 da restauração a montante via AL_Res e REDs

| | |
|---|---|
| **Entrada** | superblocos candidatos $\Omega_{ALRes,m}$; associações entre $AL_{Res}$, superbloco-raiz e chave NA; grafo de superblocos; estados e automação das chaves; potências disponíveis dos $AL_{Res}$; demandas dos superblocos; disponibilidade dos REDs no patamar $h$; SBF e limite de isolamento; parâmetros $\eta_Q$, $fp_{min}$ e condição de avaliação da potência reativa. |
| **Saída** | $LBRA_m$, $LBRM_m$ e $LSBI_m$ atualizados; registros dos $AL_{Res}$ responsáveis pelos superblocos transferidos. |
| 1 | Ordenar os $AL_{Res}$ em ordem decrescente de potência ativa disponível, conforme a Equação (72) |
| 2 | Inicializar $\Omega_{rest} \leftarrow \varnothing$ |
| 3 | Para cada $AL_{Res}$ $r$, com raiz $SB_r$ e chave de interligação $NA_r$, na ordem definida, faça |

Continuação: Quadro 3 - Fase 2 da restauração a montante via AL_Res e REDs

| | |
|---|---|
| 4 | Se $SB_r \in \Omega_{rest}$, continuar para o próximo $AL_{Res}$ |
| 5 | Se $NA_r$ não possuir automação, continuar para o próximo $AL_{Res}$ |
| 6 | Construir o subgrafo $G_r$ sobre os superblocos de $\Omega_{ALRes,m}$, a partir de $SB_r$ |
| 7 | Excluir de $G_r$ o SBF, o superbloco limite de isolamento e as conexões não automáticas |
| 8 | Inicializar $fila \leftarrow [SB_r]$, $visitados \leftarrow \varnothing$, $\Omega_r \leftarrow \varnothing$, $P_{ac,r} \leftarrow 0$ e $Q_{ac,r} \leftarrow 0$ |
| 9 | Enquanto $fila \neq \varnothing$, faça |
| 10 | Retirar da frente da fila o superbloco $i$ |
| 11 | Se $i \in visitados$, continuar para a próxima iteração |
| 12 | Adicionar $i$ a $visitados$ e inicializar $segmento \leftarrow \varnothing$ |
| 13 | Determinar $P_i^{RED}(h)$ e $Q_{i,disp}^{RED}(h)$; limitar $Q_i^{RED}(h)$ pela Equação (75), quando aplicável |
| 14 | Calcular $P_i^{liq}(h)$ e $Q_i^{liq}(h)$ pelas Equações (73) e (74) |
| 15 | Se $i$ satisfizer as condições topológicas e de automação e as Equações (76) e (77), com $\Omega_s = \{i\}$, então |
| 16 | Definir $segmento \leftarrow [i]$ |
| 17 | Senão |
| 18 | Inicializar $janela \leftarrow [i]$ |
| 19 | Para cada sucessor elegível $j$ de $i$ em $G_r$, faça |
| 20 | Determinar $P_j^{RED}(h)$ e $Q_j^{RED}(h)$ e calcular $P_j^{liq}(h)$ e $Q_j^{liq}(h)$ |
| 21 | Se $j$ não satisfizer a condição local de automação, interromper o look-ahead |
| 22 | Adicionar $j$ à $janela$ |
| 23 | Se as Equações (76) e (77) forem satisfeitas para $\Omega_s = janela$, então |
| 24 | Definir $segmento \leftarrow janela$ e encerrar o look-ahead |
| 25 | Fim Se |
| 26 | Fim Para |
| 27 | Fim Se |
| 28 | Se $segmento \neq \varnothing$, então |
| 29 | Adicionar os superblocos do segmento a $\Omega_r$ |
| 30 | Atualizar $P_{ac,r}$ e $Q_{ac,r}$ com as demandas líquidas do segmento |
| 31 | Inserir na fila os sucessores do último superbloco do segmento |
| 32 | Fim Se |
| 33 | Fim Enquanto |
| 34 | Remover de $\Omega_r$ os superblocos já pertencentes a $\Omega_{rest}$ |
| 35 | Adicionar os superblocos restantes de $\Omega_r$ a $LBRA_m$ e a $\Omega_{rest}$, registrando o modo TA e o $AL_{Res}$ responsável |
| 36 | Fim Para |
| 37 | Para cada $SB_i \in \Omega_{ALRes,m}$, faça |
| 38 | Se $SB_i \neq SBF$, $SB_i \notin LBRA_m$ e $SB_i \notin LBRM_m$, adicionar $SB_i$ a $LBRM_m$ |
| 39 | Fim Para |
| 40 | Preservar o SBF em $LSBI_m$ |
| 41 | Retornar $LBRA_m$, $LBRM_m$, $LSBI_m$ e os registros de restauração por $AL_{Res}$ |

Fonte: Elaborado pelo autor.

## 5.2 RESTAURAÇÃO HIERÁRQUICA A JUSANTE

Após a avaliação das possibilidades de recomposição a montante, a ISRM processa os superblocos que permanecem desenergizados na região a jusante do SBF. Essa região pode apresentar diferentes ramificações, dispositivos de manobra e REDs distribuídos ao longo da topologia, exigindo um procedimento distinto daquele empregado na restauração a montante.

Para distinguir os resultados dessa etapa daqueles obtidos na região a montante, são definidos os conjuntos $LBRA_j$, $LBRM_j$ e $LSBI_j$. O conjunto $LBRA_j$ reúne os superblocos restaurados automaticamente a jusante pelos alimentadores de reserva, $LBRM_j$ reúne aqueles restaurados por transferência manual e $LSBI_j$ contém os superblocos que permanecem isolados ao término das duas passagens.

A restauração a jusante é realizada por meio dos $Al_{Res}$ conectados à região desenergizada por chaves normalmente abertas (NA). Para cada possibilidade de transferência, são consideradas a topologia da rede, a condição de automação das chaves, as reservas de potência ativa e reativa do alimentador no patamar analisado e a contribuição dos REDs presentes nos superblocos candidatos. Os $Al_{Res}$ são processados em ordem decrescente da potência ativa disponível.

O procedimento é organizado em duas etapas sequenciais. Na primeira, correspondente à transferência automática (TA), a região candidata é analisada por meio da formação de hiperblocos (HB). Cada hiperbloco reúne superblocos cuja restauração é avaliada conjuntamente, considerando as conexões internas, as condições de automação e a disponibilidade de potência do $Al_{Res}$, com participação dos REDs locais. Os hiperblocos aceitos são incorporados ao conjunto LBRA.

Na segunda etapa, correspondente à transferência manual (TM), os superblocos que permanecem desenergizados são avaliados individualmente. A expansão ocorre de forma incremental a partir da região já restaurada por cada $Al_{Res}$, sendo incorporados os superblocos de fronteira que apresentem conectividade com a região energizada e atendam às restrições de potência ativa e, quando considerada, de potência reativa. Nessa etapa, a contribuição local dos REDs também participa da avaliação da capacidade de atendimento.

Assim, o hiperbloco constitui a unidade de decisão da etapa automática, enquanto o superbloco constitui a unidade incremental de decisão da etapa manual. Ao final das duas etapas, os superblocos não atendidos pelos alimentadores de reserva permanecem no conjunto residual e são posteriormente encaminhados para avaliação da formação de microrredes.

### 5.2.1 Representação topológica e conjuntos de estado

O conjunto de superblocos candidatos à restauração a jusante é obtido após a retirada dos resultados já definidos na região a montante. Essa transição é expressa pela Equação (78):

$$\Omega_j^0(h) = \Omega_D(h) \backslash (LBRA_m \cup LBRM_m \cup LBSI_m) \tag{78}$$

em que:

$\Omega_j^0(h)$ é o conjunto inicial de superblocos candidatos à restauração a jusante no patamar $h$;

$\Omega_D(h)$ é o conjunto de superblocos inicialmente desligados após a atuação do dispositivo de proteção;

$LBRA_m$ é o conjunto de SBs restaurados a montante;

$LBRM_m$ é o conjunto de SBs restaurados a montante;

e $\text{LSBI}_\text{m}$ é o conjunto residual de SBs, definido ao término da restauração a montante.

A região equivalente a jusante após o isolamento da falta é representada por um grafo de superblocos $\mathcal{G}_J(h)$, conforme (79):

$$\mathcal{G}_J(h) = \left(\Omega_J^0(h), \mathcal{E}_J\right) \tag{79}$$

em que,

$\mathcal{G}_J(h)$ é o grafo correspondente à região a jusante no patamar $h$;

$\Omega_J^0(h)$ é o conjunto de superblocos candidatos dessa região; e

$\mathcal{E}_J$ é o conjunto de conexões existentes entre esses superblocos.

As conexões são classificadas de acordo com a condição de automação das respectivas chaves. A partição é definida pela Equação (80):

$$\mathcal{E}_J = \mathcal{E}_A \cup \mathcal{E}_M, \quad \mathcal{E}_A \cap \mathcal{E}_M = \emptyset \tag{80}$$

em que, $\mathcal{E}_A$ e $\mathcal{E}_M$ correspondem, respectivamente, às conexões associadas a dispositivos automatizados e não automatizados. A interseção vazia indica que uma mesma conexão não pertence simultaneamente às duas classes.

Essa distinção é utilizada na formação dos hiperblocos durante a transferência automática. Quando uma conexão automática é encontrada durante a exploração de um hiperbloco, o superbloco adjacente é registrado como uma nova fronteira para expansão posterior. Por outro lado, uma conexão manual pode ser percorrida durante a análise recursiva do hiperbloco corrente, desde que não corresponda à conexão com o SBF. Dessa forma, a condição de automação das chaves determina tanto a composição do hiperbloco quanto os pontos a partir dos quais novas regiões poderão ser avaliadas.

Ao término das duas passagens, os superblocos pertencentes à região a jusante ficam classificados em restaurados automaticamente, restaurados manualmente e não restaurados. Essa partição é expressa pela Equação (81):

$$\Omega_j^0(h) = LBRA_j(h) \cup LBRM_j(h) \cup LBSI_j(h) \tag{81}$$

sendo esses conjuntos mutuamente exclusivos. $LBRA_j(h)$ reúne os superblocos recompostos por transferência automática, $LBRM_j(h)$ aqueles recompostos por transferência manual e $LBSI_j(h)$ os superblocos que permanecem desenergizados após as tentativas de restauração. Os três conjuntos são mutuamente exclusivos para o evento analisado.

À medida que um superbloco é restaurado, ele deixa a parcela ainda não atendida e passa a integrar $\text{LBRA}_\text{j}$ ou $\text{LBRM}_\text{j}$, conforme o modo de recomposição. Um superbloco já restaurado também deixa de participar das avaliações dos demais $Al_{Res}$, preservando a exclusividade do atendimento.

Os superblocos que permanecerem em $LBSI_j(h)$ ao final das etapas automática e manual serão posteriormente encaminhados para avaliação da formação de microrredes.

### 5.2.2 Reserva de carga e priorização dos alimentadores

Para cada patamar horário $h$, os $Al_{Res}$ são caracterizados pelas respectivas disponibilidades de potência ativa e reativa, $P_r^{\text{res}}(0,h)$ e $Q_r^{\text{res}}(0,h)$. Essas grandezas representam a capacidade disponível do alimentador $r$ no início do processo de restauração a jusante e são utilizadas como limites para a transferência dos superblocos desenergizados.

Quando mais de um $Al_{Res}$ pode participar da restauração, é adotada a mesma regra de prioridade utilizada na restauração a montante: os alimentadores são processados em ordem decrescente da potência ativa disponível, conforme definido anteriormente pela (72). A potência reativa não participa da ordenação, sendo utilizada posteriormente na avaliação da viabilidade elétrica das transferências.

Para cada $Al_{Res}$, as reservas de potência ativa e reativa são atualizadas à medida que novos superblocos são aceitos. Dessa forma, uma restauração já realizada reduz a capacidade disponível para as expansões seguintes associadas ao mesmo alimentador. Os superblocos anteriormente incorporados a $\text{LBRA}_\text{j}$ ou $\text{LBRM}_\text{j}$ também deixam de participar das avaliações posteriores, evitando a atribuição de uma mesma carga a mais de um $Al_{Res}$.

Essa sequência de prioridade é mantida tanto na etapa automática quanto na etapa manual, de modo que a segunda passagem utiliza as reservas remanescentes após as restaurações anteriormente aceitas.

### 5.2.3 Modelagem da geração por REDs e demandas líquidas nos superblocos

A avaliação dos superblocos a jusante considera a contribuição dos REDs disponíveis no patamar horário $h$. A potência ativa fornecida pelos REDs corresponde à contribuição conjunta dos sistemas fotovoltaicos e BESS presentes no superbloco, sendo a disponibilidade do BESS previamente limitada pelas condições energéticas do sistema de armazenamento. A potência reativa é determinada conforme os limites de suporte adotados para os conversores.

Para manter a nomenclatura utilizada na restauração a montante, as potências fornecidas pelos REDs são representadas por $P_i^{RED}(h)$ e $Q_i^{RED}(h)$. A contribuição reativa segue o critério já definido pela (75), enquanto as demandas líquidas ativa e reativa do superbloco $i$ permanecem definidas pelas (73) e (74), respectivamente.

Na restauração a jusante, entretanto, existe uma particularidade adicional. Quando a potência disponibilizada pelos REDs supera a demanda local do superbloco, pode ocorrer excedente de potência ativa e, quando considerada, reativa. O excedente ativo é definido pela (82), enquanto o reativo é definido pela (83), respectivamente.

$$P_i^{exc}(h) = max\left[0, P_i^{RED}(h) - P_i^{L}(h)\right] \tag{82}$$

e

$$Q_i^{exc}(h) = max\left[0, Q_i^{RED}(h) - Q_i^{L}(h)\right] \tag{83}$$

em que,

$P_i^{exc}(h)$ é o excedente de potência ativa disponível no superbloco $i$;

$P_i^{RED}(h)$ é a potência ativa disponibilizada pelos REDs locais;

$P_i^{L}(h)$ é a demanda ativa do superbloco $i$;

$Q_i^{exc}(h)$ é o excedente de potência reativa disponível no superbloco $i$;

$Q_i^{RED}(h)$ é a potência reativa disponibilizada pelos REDs locais;

$Q_i^{L}(h)$ é a demanda reativa do superbloco $i$; e

$h$ representa o patamar horário analisado.

Durante a expansão da região restaurada, esse excedente pode ser incorporado ao saldo disponível para as avaliações subsequentes associadas ao mesmo $Al_{Res}$. Assim, os REDs podem atuar tanto reduzindo a potência requerida do alimentador de reserva quanto aumentando a

capacidade disponível para a continuidade da restauração quando sua geração local excede a demanda do respectivo superbloco.

Na etapa manual, o mesmo princípio é aplicado individualmente a cada superbloco de fronteira: o $Al_{Res}$ fornece apenas a parcela líquida não atendida pelos REDs locais, enquanto eventual excedente é incorporado ao saldo utilizado nas avaliações seguintes.

Dessa forma, de (73) a (75), representam as demandas líquidas e a contribuição dos REDs, enquanto (82) e (83) definem os excedentes locais considerados durante a expansão da restauração a jusante.

### 5.2.4 Descoberta Topológica e Fechamento do Hiperbloco Automático

Na primeira passagem da restauração a jusante, cada $Al_{Res}$ é avaliado a partir do respectivo superbloco-raiz. Para participar da transferência automática, a chave NA de interligação com a região desenergizada deve permitir operação automatizada. Caso essa condição não seja atendida, o alimentador não participa dessa etapa e os superblocos correspondentes permanecem disponíveis para a avaliação manual posterior.

A partir do superbloco-raiz, inicia-se a formação do hiperbloco (HB). Para cada superbloco visitado, verifica-se inicialmente se sua carga pode ser atendida pela potência disponível do $Al_{Res}$, considerando a contribuição do RED local. Essa condição é avaliada para as potências ativa e reativa, quando esta última é considerada, utilizando as demandas líquidas definidas pelas Equações (73) e (74).

Em seguida, são analisadas as conexões do superbloco corrente. Quando a conexão com um superbloco adjacente é automática, esse superbloco não é incorporado imediatamente ao hiperbloco corrente, sendo registrado como uma nova fronteira para expansão automática posterior. Quando a conexão é manual, a análise prossegue recursivamente pelo respectivo ramo, verificando os superblocos subsequentes e suas condições de atendimento. A conexão manual em direção ao SBF interrompe a expansão desse ramo.

Durante essa análise recursiva, a potência disponível é atualizada à medida que cada superbloco é percorrido. A parcela não atendida pelos REDs reduz a reserva disponível do $Al_{Res}$, enquanto eventual excedente local, definido pelas Equações (82) e (83), é incorporado ao saldo utilizado na continuidade da avaliação do ramo.

O hiperbloco somente é considerado válido quando todas as condições avaliadas em seus superblocos e ramos internos são satisfeitas. Se qualquer ramo não atender às condições de potência ou atingir uma condição de conexão que impeça sua continuidade, o hiperbloco

corrente é rejeitado integralmente. Nesse caso, seus superblocos permanecem disponíveis para outras possibilidades de restauração.

As fronteiras automáticas identificadas durante essa busca são posteriormente processadas em sequência, permitindo a expansão do hiperbloco a partir da região já alcançada. Esse procedimento amplia progressivamente a área candidata à transferência automática, sempre utilizando a reserva remanescente do respectivo $Al_{Res}$.

### 5.2.5 Avaliação Energética e Aceitação do Hiperbloco

Após a formação do hiperbloco, sua aceitação depende do atendimento simultâneo das condições topológicas e elétricas estabelecidas na etapa anterior. O HB é tratado como uma unidade de decisão: somente quando todos os superblocos que o compõem são considerados viáveis o conjunto é efetivamente restaurado. Caso alguma das condições não seja satisfeita, o hiperbloco é rejeitado integralmente, sem alteração dos conjuntos de restauração.

Quando o hiperbloco é aceito, seus superblocos são incorporados a $\text{LBRAJ}_j$. As demandas líquidas, ativa e reativa totais associadas ao HB são obtidas a partir das demandas líquidas individuais definidas pelas Equações (73) e (74) , conforme as Equações (84) e (85):

$$P_{HB}^{\text{liq}}(h) = \sum_{\text{i}\in\text{HB}} P_i^{\text{liq}}(h) \tag{84}$$

$$Q_{HB}^{\text{liq}}(h) = \sum_{\text{i}\in\text{HB}} Q_i^{\text{liq}}(h) \tag{85}$$

em que,

$P_{HB}^{\text{liq}}(h)$ é a demanda ativa líquida total do hiperbloco HB no patamar $h$;

$P_i^{\text{liq}}(h)$ é a demanda ativa líquida do superbloco $i$;

$Q_{HB}^{\text{liq}}(h)$ é a demanda ativa líquida total do hiperbloco HB no patamar $h$;

$Q_i^{\text{liq}}(h)$ é a demanda ativa líquida do superbloco $i$; e

HB representa o conjunto de superblocos pertencentes ao hiperbloco avaliado.

A reserva remanescente do $Al_{Res}$ é então atualizada descontando-se a demanda líquida dos superblocos restaurados. Esse saldo passa a constituir a capacidade disponível para a continuidade da restauração automática.

As fronteiras automáticas identificadas durante a formação do primeiro HB são processadas sucessivamente, e novos SBs podem ser incorporados aos hiperblocos locais, caso

sua demanda líquida não ultrapasse a reserva remanescente do $Al_{Res}$ e suas chaves de fronteiras sejam automáticas. Para cada novo conjunto aceito, os superblocos são adicionados a $LBRA_j$ e as reservas de potência ativa e reativa são novamente atualizadas. Nessas expansões, eventual excedente local dos REDs, definido pelas Equações (82) e (83), também é considerado na atualização do saldo disponível para a continuidade da restauração.

O processo prossegue enquanto existirem fronteiras automáticas a serem avaliadas e houver capacidade disponível no respectivo $Al_{Res}$. Ao término dessa passagem, os superblocos que não foram incorporados aos hiperblocos automáticos permanecem disponíveis para a etapa de restauração manual.

### 5.2.6 Segunda passagem: restauração manual incremental (TM)

Concluída a etapa automática, os superblocos que permanecem desenergizados são avaliados para transferência manual (TM), utilizando a capacidade remanescente dos mesmos $Al_{Res}$. Diferentemente da primeira passagem, na qual a decisão é realizada sobre hiperblocos, nesta etapa cada superbloco é analisado individualmente.

Para cada $Al_{Res}$, são identificados os superblocos ainda desligados que possuem conexão com a região já restaurada. Caso nenhum superbloco tenha sido anteriormente restaurado pelo alimentador, a avaliação pode iniciar pelo seu próprio superbloco-raiz. A partir de uma restauração aceita, esse superbloco passa a constituir uma nova fronteira para a avaliação dos demais superblocos adjacentes.

A viabilidade de cada candidato é verificada utilizando a reserva remanescente do $Al_{Res}$ e a contribuição do RED localizado no próprio superbloco. Assim, as demandas líquidas permanecem definidas por (73) e (74), e a inclusão é permitida quando essas demandas não excedem as reservas ativa e reativa disponíveis do alimentador.

Quando o superbloco é aceito, ele é incorporado a $LBRM_j$ e retirado do conjunto de superblocos desligados. A reserva do $Al_{Res}$ é então atualizada descontando-se a demanda líquida correspondente. Caso exista excedente local dos REDs, definido por (82) e (83), esse excedente é acrescentado ao saldo disponível para as avaliações seguintes.

A expansão é repetida enquanto houver novos superblocos de fronteira que satisfaçam as condições de atendimento. Dessa forma, a etapa manual aproveita a capacidade remanescente dos alimentadores para ampliar progressivamente a região restaurada, sem utilizar a formação de hiperblocos.

Ao término dessa segunda passagem, os superblocos restaurados manualmente permanecem registrados em $LBRM_j$, enquanto aqueles que não puderam ser atendidos permanecem na $LSBI_j$ e seguem para a etapa subsequente da ISRM.

### 5.2.7 Consolidação dos conjuntos de restauração e conjunto residual

Concluída a restauração a jusante, os resultados obtidos nas duas regiões são consolidados. O conjunto geral de superblocos restaurados automaticamente é definido pela Equação (86):

$$\mathrm{LBRA} = \mathrm{LBRA}_m \cup \mathrm{LBRA}_j \tag{86}$$

em que LBRA é o conjunto consolidado de superblocos restaurados automaticamente, $LBRA_m$ é o conjunto restaurado automaticamente a montante e $LBRA_j$ é o conjunto restaurado automaticamente a jusante.

De forma análoga, o conjunto geral de superblocos restaurados manualmente é definido por (87):

$$\mathrm{LBRM} = \mathrm{LBRM}_m \cup \mathrm{LBRM}_j \tag{87}$$

em que LBRM é o conjunto consolidado de superblocos restaurados manualmente, $LBRM_m$ é o conjunto restaurado manualmente a montante e $LBRM_j$ é o conjunto restaurado manualmente a jusante.

Os superblocos que permanecem isolados após as duas regiões são consolidados conforme (88):

$$\mathrm{LSBI} = \mathrm{LSBI}_m \cup \mathrm{LSBI}_j \tag{88}$$

em que LSBI é o conjunto consolidado de superblocos que permanecem isolados após as etapas de restauração a montante e a jusante, $LSBI_m$ é o conjunto residual da região a montante e $LSBI_j$ é o conjunto residual da região a jusante. Como se trata de uma união de conjuntos, eventuais repetições são consideradas uma única vez.

A partir dessa consolidação, os conjuntos (LBRA) e (LBRM) preservam a condição inicial de recomposição dos superblocos restaurados, indicando, respectivamente, a atuação automática, associada ao tempo (TA(h)), e a atuação manual, associada ao tempo (TM(h)). Nesse estágio, esses registros caracterizam apenas o modo e o instante da recomposição inicial, não constituindo ainda os tempos efetivos de interrupção empregados na avaliação da confiabilidade.

Os superblocos pertencentes a (LSBI) permanecem desligados após as etapas de restauração a montante e a jusante. O SBF permanece nesse conjunto até a normalização

definitiva da contingência, enquanto os demais elementos de (LSBI) constituem a entrada da etapa seguinte da ISRM, na qual será avaliada a possibilidade de recomposição por meio da formação de microrredes.

A determinação dos tempos efetivos de interrupção é realizada posteriormente, após a formação das microrredes e a avaliação temporal da sustentabilidade dos recursos restaurativos, conforme apresentado na Subseção 5.4.5. Dessa forma, evita-se atribuir antecipadamente o tempo (TI(h)) aos superblocos que ainda podem ser restaurados em etapas subsequentes da metodologia. O procedimento completo da recomposição a jusante é resumido no Quadro 4.

Quadro 4 - Pseudocódigo: Procedimento de restauração a jusante por alimentadores de reserva e REDs

| | |
|---|---|
| **Entrada** | grafo de superblocos a jusante; conjunto inicial $\Omega_j^0(h)$; raízes dos $AL_{Res}$ e respectivas chaves NA; estados e automação das chaves; demandas ativa e reativa dos superblocos; reservas P e Q dos $AL_{Res}$; disponibilidade dos REDs no patamar $h$; conjuntos $LBRA_m$, $LBRM_m$ e $LSBI_m$; parâmetros $\eta_Q$, $fp_{min}$ e $considerar_kvar$. |
| **Saída** | $LBRA_j$, $LBRM_j$ e $LSBI_j$; conjuntos consolidados $LBRA$, $LBRM$ e $LSBI$; reservas remanescentes e registros do modo de restauração e do $AL_{Res}$ responsável. |
| 1 | Definir $\Omega_j^0(h)$ conforme a Equação (78) e inicializar $\Omega_{des} \leftarrow \Omega_j^0(h)$ |
| 2 | Inicializar $LBRA_j \leftarrow \varnothing$, $LBRM_j \leftarrow \varnothing$ e $LSBI_j \leftarrow \varnothing$ |
| 3 | **FASE 1 - TRANSFERÊNCIA AUTOMÁTICA (TA)** |
| 4 | Ordenar os $AL_{Res}$ em ordem decrescente da potência ativa disponível, conforme a Equação (72) |
| 5 | Para cada $AL_{Res}$ $r$, com superbloco-raiz $SB_r$, na ordem definida, faça |
| 6 | Inicializar $P_r^{rem}$ e $Q_r^{rem}$ com as reservas disponíveis do alimentador $r$ |
| 7 | Construir o subgrafo a jusante de $r$ sobre os superblocos de $\Omega_{des}$ |
| 8 | Identificar a chave NA de interligação entre $r$ e $SB_r$ |
| 9 | Se a chave de interligação não permitir transferência automática, continuar para o próximo $AL_{Res}$ |
| 10 | Excluir do subgrafo os superblocos já atribuídos a outro $AL_{Res}$ |
| 11 | Formar o hiperbloco inicial $HB$ a partir de $SB_r$ e inicializar os saldos temporários $\hat{P}_r \leftarrow P_r^{rem}$ e $\hat{Q}_r \leftarrow Q_r^{rem}$ |
| 12 | Para cada superbloco $i$ visitado durante a formação de $HB$, faça |
| 13 | Determinar $P_i^{RED}(h)$ e $Q_i^{RED}(h)$, aplicando o limite da Equação (75), quando habilitado |
| 14 | Calcular $P_i^{liq}(h)$ e $Q_i^{liq}(h)$ pelas Equações (73) e (74) e $P_i^{exc}(h)$ e $Q_i^{exc}(h)$ pelas Equações (82) e (83) |
| 15 | Atualizar os saldos temporários: $\hat{P}_r \leftarrow \hat{P}_r - P_i^{liq}(h) + P_i^{exc}(h)$ e, quando aplicável, $\hat{Q}_r \leftarrow \hat{Q}_r - Q_i^{liq}(h) + Q_i^{exc}(h)$ |
| 16 | Se $\hat{P}_r < 0$ ou, quando considerada a potência reativa, $\hat{Q}_r < 0$, invalidar o hiperbloco |
| 17 | Para cada conexão entre $i$ e um superbloco adjacente $k$, faça |
| 18 | Se a conexão for automática, registrar $k$ como fronteira para expansão automática posterior |
| 19 | Senão, se $k = SBF$, invalidar esse ramo do hiperbloco |
| 20 | Senão, prosseguir recursivamente pelo ramo manual |

Continuação: Quadro 4 – Pseudocódigo: Procedimento de restauração a jusante por Al_Res e REDs

| | |
|---|---|
| 21 | Fim Para |
| 22 | Fim Para |
| 23 | Se $HB$ for válido, então |
| 24 | Adicionar os superblocos de $HB$ a $LBRA_j$ e registrar o modo TA e o $AL_{Res}$ responsável |
| 25 | Efetivar $P_r^{rem} \leftarrow \hat{P}_r$ e $Q_r^{rem} \leftarrow \hat{Q}_r$, preservando o compartilhamento dos excedentes no balanço agregado |
| 26 | Remover os superblocos de $HB$ de $\Omega_{des}$ |
| 27 | Inicializar a fila $F_A$ com as fronteiras automáticas identificadas |
| 28 | Enquanto $F_A \neq \varnothing$, faça |
| 29 | Retirar da frente da fila um superbloco $i$ |
| 30 | Formar e avaliar um hiperbloco local $HB_i$ pelas mesmas regras topológicas e energéticas, usando saldos temporários |
| 31 | Se $HB_i$ for válido, incorporá-lo a $LBRA_j$, efetivar os saldos, removê-lo de $\Omega_{des}$ e inserir em $F_A$ as novas fronteiras automáticas |
| 32 | Fim Enquanto |
| 33 | Fim Se |
| 34 | Armazenar $P_r^{rem}$ e $Q_r^{rem}$ |
| 35 | Fim Para |
| 36 | FASE 2 - TRANSFERÊNCIA MANUAL INCREMENTAL (TM) |
| 37 | Para cada $AL_{Res}$ $r$, na mesma ordem de prioridade, faça |
| 38 | Obter $P_r^{rem}$, $Q_r^{rem}$ e o conjunto $\Omega_r$ de superblocos já restaurados pelo alimentador $r$ |
| 39 | Definir $progresso \leftarrow verdadeiro$ |
| 40 | Enquanto $progresso = verdadeiro$, faça |
| 41 | Definir $progresso \leftarrow falso$ |
| 42 | Para cada superbloco $i \in \Omega_{des}$, faça |
| 43 | Verificar se $i$ é o superbloco-raiz de $r$ ou possui predecessor pertencente a $\Omega_r$; caso contrário, continuar |
| 44 | Determinar $P_i^{RED}(h)$ e $Q_i^{RED}(h)$ e calcular as demandas líquidas e os excedentes pelas Equações (73), (74), (82) e (83) |
| 45 | Se $P_i^{liq}(h) \leq P_r^{rem}$ e a restrição reativa aplicável também for satisfeita, então |
| 46 | Atualizar $P_r^{rem} \leftarrow P_r^{rem} - P_i^{liq}(h) + P_i^{exc}(h)$ |
| 47 | Quando a potência reativa for considerada, atualizar $Q_r^{rem} \leftarrow Q_r^{rem} - Q_i^{liq}(h) + Q_i^{exc}(h)$ |
| 48 | Adicionar $i$ a $LBRM_j$ e a $\Omega_r$, registrar o modo TM e remover $i$ de $\Omega_{des}$ |
| 49 | Definir $progresso \leftarrow verdadeiro$ |
| 50 | Fim Se |
| 51 | Fim Para |
| 52 | Fim Enquanto |
| 53 | Fim Para |
| 54 | **FECHAMENTO E CONSOLIDAÇÃO** |
| 55 | Definir $LSBI_j \leftarrow \Omega_{des}$ |
| 56 | Consolidar $LBRA \leftarrow LBRA_m \cup LBRA_j$, conforme a Equação (86) |
| 57 | Consolidar $LBRM \leftarrow LBRM_m \cup LBRM_j$, conforme a Equação (87) |
| 58 | Consolidar $LSBI \leftarrow LSBI_m \cup LSBI_j$, conforme a Equação (88), preservando o SBF em $LSBI_m$ |
| 59 | Consolidar os registros dos modos de recomposição e dos $AL_{Res}$ responsáveis |
| 60 | Retornar $LBRA_j$, $LBRM_j$, $LSBI_j$, $LBRA$, $LBRM$, $LSBI$, as reservas remanescentes e os registros de restauração |

Fonte: Elaborado pelo autor

## 5.3 FORMAÇÃO E AVALIAÇÃO DE MICRORREDES DINÂMICAS EM SUPERBLOCOS ISOLADOS

Após as etapas de restauração a montante e a jusante, os superblocos que permanecem isolados são avaliados quanto à possibilidade de recomposição local por meio da formação de microrredes. Nessa etapa, a ISRM utiliza os REDs disponíveis nos próprios superblocos isolados para estabelecer regiões eletricamente autônomas, preservando a conectividade da rede e verificando simultaneamente os balanços de potência ativa e reativa.

A formação de cada microrrede é iniciada por um superbloco que contenha BESS com potência ativa disponível no patamar da falta. A partir dessa semente, a região é expandida superbloco a superbloco por busca em largura (BFS). Sistemas fotovoltaicos isolados não iniciam uma microrrede, mas podem contribuir para o balanço de potência quando o respectivo superbloco é incorporado durante a expansão. Os superblocos aceitos são classificados quanto ao modo de restauração e retirados do conjunto residual, impedindo sua utilização por mais de uma microrrede.

### 5.3.1 Estado inicial da região isolada

O estado inicial dessa etapa é obtido a partir do conjunto consolidado LSBI definido ao final da Subseção 5.2.7. O SBF não participa da formação das microrredes, pois sua reenergização depende da normalização definitiva da contingência. Assim, o conjunto de superblocos efetivamente candidatos à restauração local é definido pela Equação (89):

$$\Omega_I(h) = LSBI_{(h)}\{SBF\} \tag{89}$$

em que,

$\Omega_I(h)$ é o conjunto de superblocos isolados candidatos à formação de microrredes no patamar $h$;

$LSBI_{(h)}$ é o conjunto consolidado de superblocos ainda isolados após as restaurações a montante e a jusante; e

$SBF$ é o superbloco no qual ocorreu a falta.

Cada microrrede é formada exclusivamente com elementos pertencentes a $\Omega_I(h)$. À medida que um superbloco é incorporado a uma microrrede, ele é retirado desse conjunto, garantindo que uma mesma região não seja atribuída simultaneamente a microrredes distintas.

### 5.3.2 Classificação Operacional dos Recursos Energéticos Distribuídos

A formação de uma microrrede requer uma fonte capaz de sustentar a operação ilhada. Nesta metodologia, adota-se como critério operacional para a semente a presença de BESS com potência ativa disponível no patamar da contingência. Essa potência já considera a limitação energética do sistema de armazenamento no instante da falta. Consequentemente, o conjunto de sementes candidatas é definido pela Equação (90):

$$\Omega_{Seed}(\mathrm{h}) = \left\{SB_i \in \Omega_I(h) | P_i^{BESS}(h) > 0\right\} \tag{90}$$

em que,

$\Omega_{Seed}(\mathrm{h})$ é o conjunto de superblocos sementes candidatos;

$SB_i$ representa o superbloco isolado $i$;

$P_i^{BESS}(h)$ representa a potência ativa instantaneamente disponível do sistema de armazenamento instalado no superbloco $SB_i$, considerando o $SoC$ no patamar horário $h$.

Os sistemas fotovoltaicos sem BESS não pertencem ao conjunto $\Omega_{Seed}(\mathrm{h})$ . Entretanto, sua geração é considerada quando o superbloco correspondente é alcançado durante a expansão de uma microrrede já estabelecida.

Para cada superbloco, a potência ativa total disponibilizada pelos REDs é definida pela Equação (91):

$$P_i^{\mathrm{RED}}(h) = P_i^{\mathrm{PV}}(h) + P_i^{\mathrm{BESS}}(h) \tag{91}$$

em que,

$P_i^{\mathrm{RED}}(h)$ é a potência ativa total disponibilizada pelos REDs do superbloco $i$,

$P_i^{\mathrm{PV}}(h)$ é a potência ativa do sistema fotovoltaico; e

$P_i^{\mathrm{BESS}}(h)$ é a potência ativa disponível do sistema de armazenamento no patamar $h$.

De forma análoga, a disponibilidade reativa agregada dos REDs é definida pela Equação (92):

$$Q_{i,\mathrm{disp}}^{\mathrm{RED}}(h) = Q_i^{\mathrm{PV}}(h) + Q_i^{\mathrm{BESS}}(h) \tag{92}$$

em que,

$Q_{i,\mathrm{disp}}^{\mathrm{RED}}(h)$ é a potência reativa agregada disponível nos conversores dos REDs do superbloco $i$,

$Q_i^{\mathrm{PV}}(h)$ corresponde à disponibilidade reativa do sistemas fotovoltaico;

$Q_i^{\mathrm{BESS}}(h)$ corresponde à disponibilidade reativa do BESS.

A potência reativa efetivamente utilizada na avaliação segue o limite definido anteriormente pela Equação (75):

Quando existem várias sementes elegíveis no mesmo evento, elas são processadas em ordem decrescente da potência ativa total disponível dos REDs. A prioridade é estabelecida pela Equação (93):

$$P_{\pi_1}^{\mathrm{RED}}(h) \geq P_{\pi_2}^{\mathrm{RED}}(h) \geq \cdots \geq P_{\pi_{N_s}}^{\mathrm{RED}}(h) \tag{93}$$

em que,

$\pi_k$ identifica a semente que ocupa a posição $k$ na sequência de processamento;

$N_s$ é o número de sementes candidatas; e

$P_{\pi_k}^{\mathrm{RED}}(h)$ é a potência ativa total dos REDs disponível na respectiva semente no patamar $h$.

A elegibilidade da semente depende, portanto, da existência de BESS ativo, enquanto sua posição na sequência de processamento considera a soma das contribuições ativas de PV e BESS existentes no mesmo superbloco.

### 5.3.3 Expansão Topológica da Microrrede

Para cada semente ainda pertencente a $\Omega_{\mathrm{I}}(h)$, a microrrede é expandida sobre o grafo de superblocos. A busca inicia-se na semente e prossegue em largura, avaliando somente os superblocos adjacentes que permanecem no conjunto residual. A fronteira de expansão da microrrede $k$ pode ser representada por (94):

$$\partial MR_k = \{j \in \Omega_i(h) | \exists\ \mathrm{i} \in\ MR_k : (i,j) \in \varepsilon\ \} \tag{94}$$

em que,

$\partial MR_k$ é o conjunto de superblocos candidatos localizados na fronteira da microrrede $k$;

$MR_k$ é o conjunto de superblocos já incorporados a essa microrrede;

$\Omega_{\mathrm{I}}(h)$ é o conjunto residual de candidatos; e

$\mathcal{E}$ representa as conexões do grafo de superblocos.

A expansão preserva a conectividade porque somente superblocos alcançados a partir de um elemento já pertencente à microrrede podem ser avaliados. Um candidato rejeitado por insuficiência de potência permanece no conjunto residual e pode ser posteriormente alcançado por outra microrrede iniciada a partir de uma semente distinta.

### 5.3.4 Atualização Incremental do Orçamento Energético

A viabilidade da microrrede é determinada por dois saldos instantâneos de potência, um ativo e outro reativo. Inicialmente, a própria semente deve ser capaz de atender sua demanda

utilizando os REDs disponíveis no respectivo superbloco. O orçamento ativo inicial é definido por (95):

$$B_{P,k}^{(0)}(h) = P_{s_k}^{\mathrm{RED}}(h) - P_{s_k}^{\mathrm{L}}(h) \tag{95}$$

em que,

$B_{P,k}^{(0)}(h)$ é o orçamento inicial de potência ativa da microrrede $k$;

$s_k$ é sua semente;

$P_{s_k}^{\mathrm{RED}}(h)$ é a potência ativa total disponibilizada pelos REDs da semente; e

$P_{s_k}^{\mathrm{L}}(h)$ é a demanda ativa desse superbloco.

O orçamento reativo inicial é definido pela Equação (96):

$$B_{Q,k}^{(0)}(h) = Q_{s_k}^{\mathrm{RED,ef}}(h) - Q_{s_k}^{\mathrm{L}}(h) \tag{96}$$

em que

$B_{Q,k}^{(0)}(h)$ é o orçamento inicial de potência reativa da microrrede $k$;

$Q_{s_k}^{\mathrm{RED,ef}}(h)$ é a potência reativa efetivamente disponível dos REDs da semente após a aplicação dos limites operacionais; e

$Q_{s_k}^{\mathrm{L}}(h)$ é sua demanda reativa.

A semente somente inicia uma microrrede quando ambos os orçamentos iniciais são não negativos. Após essa validação, cada superbloco candidato modifica o saldo disponível de acordo com sua geração local e sua demanda. Para um candidato $j$, o orçamento ativo após sua inclusão potencial é calculado pela Equação (97):

$$B_{P,k}^{+}(h) = B_{P,k}(h) + P_j^{\mathrm{RED}}(h) - P_j^{\mathrm{L}}(h) \tag{97}$$

em que,

$B_{P,k}^{+}(h)$ é o orçamento ativo candidato após a inclusão do superbloco $j$;

$B_{P,k}(h)$ é o orçamento ativo disponível antes dessa inclusão;

$P_j^{\mathrm{RED}}(h)$ é a potência ativa fornecida pelos REDs locais; e

$P_j^{\mathrm{L}}(h)$ é a demanda ativa do candidato.

De forma correspondente, o orçamento reativo candidato é definido pela Equação (98):

$$B_{Q,k}^{+}(h) = B_{Q,k}(h) + Q_j^{\mathrm{RED,ef}}(h) - Q_j^{\mathrm{L}}(h) \tag{98}$$

em que,

$B_{Q,k}^{+}(h)$ é o orçamento reativo candidato;

$B_{Q,k}(h)$ é o saldo reativo disponível antes da inclusão;

$Q_j^{\mathrm{RED,ef}}(h)$ é a contribuição reativa efetiva dos REDs locais, e

$Q_j^{\mathrm{L}}(h)$ é a demanda reativa do superbloco $j$.

Dessa forma, um superbloco com geração superior à própria demanda aumenta o orçamento disponível para as expansões seguintes, enquanto um superbloco com déficit reduz esse saldo. Essa característica diferencia a formação das microrredes da restauração a montante por $AL_{\mathrm{Res}}$, na qual o excedente local dos REDs não é transferido para os superblocos subsequentes.

### 5.3.5 Critério de Aceitação de Novos Superblocos

A inclusão de um superbloco candidato exige que os saldos de potência ativa e reativa permaneçam não negativos após sua incorporação. Assim, a condição de aceitação é expressa pela Equação (99):

$$B_{P,k}^{+}(h) \geq 0 \quad \wedge \quad B_{Q,k}^{+}(h) \geq 0 \tag{99}$$

em que,

$B_{P,k}^{+}(h)$ e $B_{Q,k}^{+}(h)$ são, respectivamente, os orçamentos candidatos de potência ativa e reativa da microrrede $k$ após a avaliação do novo superbloco.

Quando a condição da Equação (99) é satisfeita, o superbloco é incorporado à microrrede e os orçamentos candidatos tornam-se os novos saldos de referência. Essa atualização é representada pela Equação (100):

$$MR_k \leftarrow MR_k \cup \{j\}, \quad B_{P,k} \leftarrow B_{P,k}^{+}, \quad B_{Q,k} \leftarrow B_{Q,k}^{+} \tag{100}$$

em que,

$MR_k$ é o conjunto de superblocos que compõem a microrrede $k$;

$j$ é o superbloco aceito; e

$B_{P,k}$ e $B_{Q,k}$ passam a representar os novos orçamentos disponíveis após sua incorporação.

O superbloco aceito é retirado imediatamente de $\Omega_{\mathrm{I}}(h)$ e inserido na fila da busca em largura, tornando-se uma nova origem para avaliação dos seus vizinhos. Se a condição em (100) não for atendida, o candidato permanece no conjunto residual e não modifica os orçamentos da microrrede corrente.

### 5.3.6 Classificação Operacional dos Superblocos Restaurados

Cada superbloco incorporado à microrrede é classificado quanto ao modo de restauração utilizado na determinação do seu tempo inicial de interrupção. Essa classificação considera somente as fronteiras do superbloco associadas a chaves catalogadas que se encontrem

fechadas; chaves abertas não participam dessa decisão. O conjunto dessas fronteiras fechadas é definido pela Equação (101):

$$\partial_i^{\mathrm{F}} = \{e \in \partial_i \mid \text{estado}(e) = \text{Fechado}\} \tag{101}$$

em que,

$\partial_i^{\mathrm{F}}$ é o conjunto de fronteiras fechadas do superbloco $i$;e

$\partial_i$ representa o conjunto de fronteiras desse superbloco associadas às chaves registradas na estrutura topológica.

A modalidade de restauração do superbloco é então determinada pela Equação (102):

$$m_i = \begin{cases} \text{TM}, & \text{se } \partial_i^{\mathrm{F}} = \emptyset \text{ ou } \exists\, e \in \partial_i^{\mathrm{F}} \text{ associado a chave não automática} \\ \text{TA}, & \text{se } \partial_i^{\mathrm{F}} \neq \emptyset \text{ e todas as suas chaves são automáticas} \end{cases} \tag{102}$$

em que,

$m_i$ é a modalidade de restauração atribuída ao superbloco $i$;

TA indica restauração automática; e

TM indica restauração manual.

A semente é classificada inicialmente pela Equação (102). Quando a semente é classificada como TM, todos os superblocos posteriormente incorporados àquela microrrede são também classificados como manuais. Quando a semente é classificada como TA, cada novo superbloco aceito é classificado individualmente pela Equação (102), de acordo com suas próprias fronteiras fechadas. Assim, nessa condição, a classificação manual de um superbloco intermediário não é propagada automaticamente aos demais descendentes; cada novo elemento é novamente avaliado segundo suas características locais.

### 5.3.7 Consolidação da Formação das Microrredes

Após a expansão associada a cada semente, os superblocos restaurados são agrupados de acordo com a modalidade atribuída durante sua inclusão. Para a microrrede $k$, o conjunto total restaurado é definido pela Equação (103):

$$MR_k = MR_k^{\mathrm{A}} \cup MR_k^{\mathrm{M}} \tag{103}$$

em que,

$MR_k$ é o conjunto total de superblocos pertencentes à microrrede $k$;

$MR_k^{\mathrm{A}}$ é o subconjunto classificado para restauração automática; e

$MR_k^{\mathrm{M}}$ é o subconjunto classificado para restauração manual.

Os superblocos aceitos são removidos do conjunto residual durante a própria expansão. Consequentemente, uma semente ou um superbloco já absorvido por uma microrrede deixa de

participar das avaliações seguintes, garantindo a exclusividade da atribuição. Após o processamento de todas as sementes, o conjunto global de superblocos restaurados automaticamente por microrredes é definido pela Equação (104):

$$LBRA_{\text{mr}} = \bigcup_{k=1}^{N_{\text{mr}}} M\,R_k^{\text{A}} \tag{104}$$

em que,

$LBRA_{\text{mr}}$ é o conjunto global de superblocos restaurados automaticamente por microrredes;

$MR_k^{\text{A}}$ é o subconjunto automático da microrrede $k$; e

$N_{\text{mr}}$ é o número total de microrredes formadas no evento.

O conjunto global de superblocos restaurados manualmente por microrredes é definido pela Equação (105):

$$LBRM_{\text{mr}} = \bigcup_{k=1}^{N_{\text{mr}}} M\,R_k^{\text{M}} \tag{105}$$

em que,

$LBRM_{\text{mr}}$ é o conjunto global de superblocos restaurados manualmente por microrredes; e

$MR_k^{\text{M}}$ é o subconjunto manual da microrrede $k$.

Os superblocos que não forem incorporados a nenhuma microrrede permanecem isolados. O conjunto residual final é definido pela Equação (106):

$$LSBI_{\text{final}} = LSBI \setminus (LBRA_{\text{mr}} \cup LBRM_{\text{mr}}) \tag{106}$$

em que,

$LSBI_{\text{final}}$ é o conjunto final de superblocos não restaurados após a tentativa de formação das microrredes;

$LSBI$ é o conjunto recebido da etapa anterior; e

$LBRA_{\text{mr}}$ e $LBRM_{\text{mr}}$ são os conjuntos restaurados por microrredes.

Como o $SBF$ não participa de $\Omega_{\text{I}}(h)$, ele permanece em $LSBI_{\text{final}}$ até a normalização definitiva da contingência.

Ao término dessa etapa, os resultados da formação das microrredes são representados por $LBRA_{\text{mr}}$, $LBRM_{\text{mr}}$, $LSBI_{\text{final}}$ e pelos registros que associam cada superbloco à respectiva microrrede e ao modo de restauração. Esses resultados são encaminhados à avaliação temporal da sustentabilidade, apresentada na Seção 5.4, na qual é verificada a capacidade de manutenção do suprimento ao longo do período de interrupção.

O procedimento completo de formação das microrredes dinâmicas é sintetizado no Quadro 5.

Quadro 5 - Formação e Avaliação de Microrredes Dinâmicas

| | |
|---|---|
| **Entrada** | $LSBI$; SBF; grafo de superblocos; estados e automação das chaves; demandas P e Q dos superblocos; potências disponíveis de PV e BESS no patamar $h$; parâmetros $\eta_Q$, $aplica_fp_min$ e $fp_{min}$. |
| **Saída** | $LBRA_{mr}$, $LBRM_{mr}$ e $LSBI_{final}$; registros das microrredes formadas e dos modos de restauração. |
| 1 | Definir $\Omega_I(h)$ como o subconjunto de $LSBI$ obtido pela exclusão do SBF, conforme a Equação (89) |
| 2 | Mapear $P^{PV}$, $P^{BESS}$, $Q^{PV}$ e $Q^{BESS}$ para os superblocos de $\Omega_I(h)$ |
| 3 | Construir $\Omega_{Seed}(h)$ com os superblocos que possuem $P_i^{BESS}(h) > 0$, conforme a Equação (90) |
| 4 | Calcular $P_i^{RED}(h)$ e $Q_{i,disp}^{RED}(h)$ pelas Equações (91) e (92) e determinar $Q_i^{RED,ef}(h)$ com o limite da Equação (75) |
| 5 | Ordenar as sementes em ordem decrescente de $P_i^{RED}(h)$, conforme a Equação (93) |
| 6 | Inicializar $LBRA_{mr} \leftarrow \varnothing$, $LBRM_{mr} \leftarrow \varnothing$ e o conjunto residual $R \leftarrow \Omega_I(h)$ |
| 7 | Para cada semente $s_k$ na ordem definida, faça |
| 8 | Se $s_k \notin R$, continuar para a próxima semente |
| 9 | Calcular $B_{P,k}^{(0)}(h)$ e $B_{Q,k}^{(0)}(h)$ pelas Equações (95) e (96) |
| 10 | Se $B_{P,k}^{(0)}(h) < 0$ ou $B_{Q,k}^{(0)}(h) < 0$, continuar para a próxima semente |
| 11 | Classificar a semente como TA ou TM pela Equação (102) |
| 12 | Inicializar $MR_k \leftarrow \{s_k\}$, remover $s_k$ de $R$ e inicializar $fila \leftarrow [s_k]$ |
| 13 | Adicionar $s_k$ a $LBRA_{mr}$ ou $LBRM_{mr}$, conforme sua classificação |
| 14 | Enquanto $fila \neq \varnothing$, faça |
| 15 | Retirar da frente da fila o superbloco pai $i$ |
| 16 | Para cada superbloco $j$ adjacente a $i$, faça |
| 17 | Se $j \notin R$, continuar para o próximo adjacente |
| 18 | Calcular $B_{P,k}^{+}(h)$ e $B_{Q,k}^{+}(h)$ pelas Equações (97) e (98) |
| 19 | Se a condição da Equação (99) for satisfeita, então |
| 20 | Incorporar $j$ a $MR_k$ e atualizar os orçamentos conforme a Equação (100) |
| 21 | Remover $j$ de $R$ |
| 22 | Se a semente tiver sido classificada como TM, classificar $j$ como TM |
| 23 | Senão, classificar $j$ individualmente pela Equação (102) |
| 24 | Adicionar $j$ a $LBRA_{mr}$ ou $LBRM_{mr}$, conforme a classificação obtida |
| 25 | Inserir $j$ no final da fila |
| 26 | Fim Se |
| 27 | Fim Para |
| 28 | Fim Enquanto |
| 29 | Registrar $MR_k = MR_k^A \cup MR_k^M$ e os modos de restauração, conforme a Equação (103) |
| 30 | Fim Para |
| 31 | Consolidar $LBRA_{mr}$ e $LBRM_{mr}$ conforme as Equações (104) e (105) |
| 32 | Definir $LSBI_{final}$ como o subconjunto de $LSBI$ formado pelos superblocos não pertencentes a $LBRA_{mr}$ nem a $LBRM_{mr}$, conforme a Equação (106) |
| 33 | Retornar $LBRA_{mr}$, $LBRM_{mr}$, $LSBI_{final}$ e os registros das microrredes |

Fonte: Elaborado pelo autor.

## 5.4 AVALIAÇÃO TEMPORAL DA SUSTENTABILIDADE DA RESTAURAÇÃO

As etapas apresentadas nas Seções 5.1 - 5.3 determinam a configuração inicial de restauração estabelecida após a ocorrência da contingência, identificando os superblocos recompostos pela fonte principal, pelos $Al_{Res}$ e pelas microrredes. Entretanto, a viabilidade verificada no instante da restauração não garante que esse atendimento possa ser mantido durante todo o período necessário à normalização definitiva da rede.

Essa condição é particularmente importante quando a restauração depende de recursos cuja disponibilidade varia ao longo do tempo. A demanda dos consumidores modifica-se de acordo com os perfis horários das diferentes classes de carga; a capacidade disponível dos acompanha suas curvas de carregamento; a geração fotovoltaica depende da irradiância; e a potência disponibilizada pelos sistemas BESS é condicionada pela energia armazenada em cada instante.

Para incorporar esses efeitos, a ISRM realiza uma avaliação cronológica horária da sustentabilidade da restauração ao longo do período de interrupção. A configuração topológica estabelecida nas etapas anteriores é mantida, não sendo executadas novas manobras ou uma nova busca por soluções restaurativas. Em cada patamar subsequente, são atualizadas apenas as condições energéticas necessárias à manutenção dos superblocos previamente restaurados.

Para os superblocos atendidos por $Al_{Res}$, a metodologia verifica se a capacidade disponível do respectivo alimentador, acrescida da contribuição local dos REDs, permanece suficiente para suprir as demandas restauradas. Para as microrredes, a sustentabilidade é avaliada comparando-se a demanda agregada dos superblocos atendidos com a potência efetivamente disponibilizada pelos REDs que compõem a ilha.

A evolução energética dos BESS é acompanhada durante toda a simulação. Quando a geração fotovoltaica é insuficiente para atender a demanda, o armazenamento pode complementar o suprimento, respeitando seus limites de potência e a energia remanescente. Quando a geração fotovoltaica excede a demanda local, parte desse excedente pode ser utilizada para recarregar o BESS, até os limites de potência e capacidade de armazenamento. Dessa forma, a disponibilidade futura do sistema depende do histórico energético acumulado desde o início da contingência.

Caso a capacidade disponível deixe de ser suficiente para manter integralmente determinada região restaurada, inicia-se a retirada de superblocos segundo a ordem estabelecida pela estratégia de restauração. A primeira perda de suprimento de cada superbloco é registrada e utilizada posteriormente na determinação de seu tempo efetivo de interrupção.

Portanto, esta etapa transforma a configuração inicial de restauração em uma trajetória temporal de atendimento, permitindo distinguir uma restauração que permanece sustentável durante todo o período de reparo daquela que perde capacidade de suprimento antes da normalização definitiva. Os tempos efetivos resultantes constituem a informação utilizada na construção da MTIB e, consequentemente, na determinação dos indicadores de continuidade apresentados no Capítulo 4.

### 5.4.1 Estrutura Geral da Simulação Temporal

A avaliação temporal é realizada a partir da configuração de restauração obtida nas etapas anteriores, preservando-se as associações estabelecidas entre os superblocos restaurados e os respectivos recursos de suprimento. Assim, não são executadas novas buscas por caminhos de restauração nem novas tentativas de transferência entre alimentadores. O objetivo desta etapa é verificar se a configuração inicialmente aceita permanece energeticamente sustentável até a normalização definitiva da contingência.

A simulação é desenvolvida em patamares horários sucessivos. Seja $h$ o patamar em que ocorre a contingência e $TI(h)$ o respectivo tempo de interrupção até a normalização definitiva. O número de patamares horários completos submetidos à avaliação temporal é definido pela Equação (107).

$$N_T(h) = \max[0,\ \lceil TI(h) \rceil - 1] \tag{107}$$

em que,

$N_T(h)$ é o número de patamares horários subsequentes avaliados durante a interrupção;

$TI(h)$ é o tempo de interrupção associado à contingência iniciada no patamar $h$, em horas; e

$\lceil \cdot \rceil$ (ou ceil(·)) representa a função teto.

Para cada passo temporal $k = 1, \ldots, N_T(h)$, o patamar horário correspondente é determinado pela Equação (108).

$$h_k = [(h + k - 1)\ \bmod 24\ ] + 1 \tag{108}$$

em que,

$h_k$ é o patamar horário avaliado no passo temporal $k$;

$h$ é o patamar de ocorrência da contingência;

$k$ é o índice da avaliação cronológica; e

$mod$ representa a operação módulo, utilizada para permitir a continuidade da simulação quando a interrupção ultrapassa a transição entre dois dias.

Em cada patamar $h_k$ são atualizadas as demandas ativa e reativa dos superblocos restaurados de acordo com as curvas horárias das classes de consumidores. Simultaneamente, são atualizadas a geração fotovoltaica, a energia remanescente dos BESS e a capacidade disponível dos $Al_{Res}$. Essas grandezas constituem o estado energético utilizado para verificar a permanência do atendimento.

A sequência de avaliação é mantida separadamente para os superblocos restaurados pelos $Al_{Res}$ e para aqueles pertencentes às microrredes. No primeiro caso, verifica-se se a demanda líquida agregada dos superblocos ainda atendidos permanece compatível com a capacidade disponível do respectivo alimentador de reserva. No segundo, compara-se a demanda agregada da microrrede com a potência efetivamente disponibilizada pelos REDs associados aos superblocos ainda atendidos.

Quando as condições de potência ativa e reativa permanecem satisfeitas, o conjunto atendido é mantido e a avaliação prossegue para o patamar seguinte. Caso a disponibilidade energética se torne insuficiente, são retirados superblocos segundo a ordem definida pelo processo restaurativo até que a condição de atendimento seja novamente satisfeita ou que não restem superblocos sustentáveis pelo respectivo recurso.

A retirada de um superbloco possui caráter definitivo para a contingência analisada. Dessa forma, ainda que as condições de geração ou carregamento melhorem em patamares posteriores, não é realizada uma nova tentativa de reconexão. Consequentemente, a trajetória temporal do conjunto restaurado é monotonicamente não crescente: ao longo da interrupção, os superblocos podem permanecer atendidos ou perder o suprimento, mas não retornar ao estado restaurado após sua retirada.

O instante da primeira perda de suprimento é registrado para cada superbloco e posteriormente utilizado na determinação de seu tempo efetivo de interrupção. Para os superblocos que permanecem sustentáveis durante todo o horizonte temporal, conserva-se o tempo de recomposição originalmente associado à restauração automática ou manual.

O Quadro 6 sintetiza essas condições por meio de um exemplo ilustrativo de três trajetórias de atendimento: restauração automática (10h02) mantida até a normalização definitiva; restauração manual (10h30) seguida de perda de sustentabilidade (12h) até a conclusão da manutenção (15h), e ausência de restauração até a conclusão da manutenção (15h). As trajetórias representadas definem tanto o tempo efetivo de interrupção $tef_{ij}^{(h)}$, registrado na MTIB, quanto a função indicadora do estado de atendimento $\gamma_{ij}^{(h)}(\tau)$, utilizada no cálculo da END.

Quadro 6 - Exemplo ilustrativo das trajetórias temporais de atendimento e do registro da primeira perda de sustentabilidade dos superblocos

| Superbloco | 10h (falta) | 10h02 ($T_A$) | 10h30 ($T_M$) | 12h ($\tau_{perda}$) | 15h ($T_I^{(h)}$) (Normalização) |
|---|---|---|---|---|---|
| $SB_A$: Automático | Interrompido | Atendido | Atendido | Atendido | Normalizado |
| $SB_M$: Manual | Interrompido | Interrompido | Atendido | 1ª perda Interrompido | Normalizado |
| $SB_I$: Não restaurado | Interrompido | Interrompido | Interrompido | Interrompido | Normalizado |

$$SB_M: \quad t_{ij}^{(h)} = T_M + (T_I^{(h)} - \tau_{perda})$$

Fonte: Elaborada pelo autor

### 5.4.2 Inicialização da Simulação Temporal

A avaliação cronológica é inicializada a partir dos resultados consolidados das etapas de restauração. Para cada contingência, são preservados os superblocos restaurados automaticamente e manualmente pela fonte principal e pelos alimentadores de reserva, os superblocos restaurados por microrredes, os elementos que permanecem em $LSBI_{\text{final}}$ e os registros que associam cada superbloco ao respectivo recurso de suprimento. Essas informações definem a condição operacional inicial utilizada durante toda a avaliação temporal.

No patamar $h$ de ocorrência da falta, são também obtidos os tempos característicos $TA(h)$, $TM(h)$ e $TI(h)$, correspondentes, respectivamente, à recomposição automática, à recomposição manual e à normalização definitiva da contingência. Esses tempos permanecem como referências para a determinação do tempo efetivo de interrupção de cada superbloco, enquanto o horizonte cronológico da avaliação é estabelecido por $N_T(h)$, definido anteriormente pela Equação (107).

A principal variável de estado inicial dessa etapa é a energia disponível nos sistemas BESS. Para cada superbloco $i$ que contenha armazenamento, considera-se a energia disponível no instante da falta e a capacidade nominal do equipamento. O valor utilizado como condição inicial é limitado fisicamente pela capacidade nominal, conforme a Equação (109).

$$E_i^{\text{BESS}}(0,h) = \min\left\{\max\left[0,\ E_{i,\text{disp}}^{\text{BESS}}(h)\right],\ \max\left[0,\ E_{i,\text{nom}}^{\text{BESS}}\right]\right\} \tag{109}$$

em que,

$E_i^{\mathrm{BESS}}(0,h)$ é a energia inicialmente disponível no BESS associado ao superbloco $i$ para a contingência iniciada no patamar $h$;

$E_{i,\mathrm{disp}}^{\mathrm{BESS}}(h)$ é a energia disponível no instante da falta, já considerando a condição energética adotada para esse patamar; e

$E_{i,\mathrm{nom}}^{\mathrm{BESS}}$ é a capacidade nominal de armazenamento do BESS.

A operação $\max(0,\cdot)$ impede a utilização de valores negativos e a operação $\min(\cdot)$ limita a energia inicial à capacidade física do equipamento.

A condição energética definida pela Equação (109) é reinicializada para cada contingência analisada. Assim, cada evento de falta constitui uma realização independente, cuja energia inicial do BESS é determinada pelo valor da curva horária de SoC correspondente ao patamar em que a contingência se inicia. As alterações do estado energético decorrentes dos processos de carga e descarga são mantidas apenas durante a evolução temporal desse evento, não sendo transferidas para contingências anteriores ou subsequentes.

A energia $E_i^{\mathrm{BESS}}(0,h)$ constitui apenas a condição inicial da trajetória energética do sistema de armazenamento. A partir desse instante, a energia remanescente não é mantida constante nem substituída por um novo valor predeterminado a cada hora. Sua evolução passa a depender dos processos de descarga e recarga ocorridos durante a própria contingência, de modo que o estado do BESS em cada patamar subsequente depende do histórico energético acumulado desde a ocorrência da falta.

Também são inicializados os registros utilizados para armazenar a primeira perda de suprimento dos superblocos restaurados. Nenhum tempo adicional é atribuído previamente a esses elementos: o registro é realizado somente se ocorrer perda de sustentabilidade durante a avaliação ou, ao final do horizonte, de acordo com a condição operacional consolidada. Essa estratégia evita que uma condição posterior sobrescreva o primeiro instante efetivo de perda de atendimento.

Concluída a inicialização, a configuração topológica permanece inalterada e a simulação avança para os patamares horários definidos pela Equação (108). Em cada um deles são recalculadas as demandas dos superblocos, a geração fotovoltaica, a energia remanescente dos BESS e a capacidade disponível dos alimentadores de reserva. A modelagem dessas grandezas é apresentada na Subseção 5.4.3.

### 5.4.3 Modelagem Dinâmica do Balanço Energético dos Recursos Energéticos Distribuídos

A sustentabilidade da restauração depende da evolução conjunta da demanda dos superblocos, da geração fotovoltaica e da energia armazenada nos sistemas BESS. Essas grandezas são atualizadas em cada patamar horário da contingência, de modo que a capacidade de suprimento deixa de ser representada por uma condição fixa e passa a depender do histórico energético desenvolvido desde o instante da falta.

Para cada contingência, a trajetória energética é iniciada a partir do estado de carga correspondente ao seu próprio patamar de ocorrência. A partir dessa condição inicial, os processos de carga e descarga do BESS são calculados apenas durante a evolução temporal desse evento. Portanto, a memória energética existe no interior de uma mesma contingência, mas não é transferida entre eventos de falta distintos.

Em cada passo temporal, a demanda é atualizada pelas curvas horárias das classes de consumidores e a geração fotovoltaica é atualizada pela irradiância. O BESS atua sobre a diferença entre essas duas grandezas: quando a geração fotovoltaica é inferior à demanda, o armazenamento pode fornecer a potência complementar; quando há excedente fotovoltaico, esse excedente pode ser utilizado para recarregar a bateria. A energia resultante ao final do patamar torna-se a condição inicial do passo seguinte da mesma contingência

#### *5.4.3.1 Atualização da Demanda dos Superblocos Restaurados*

A demanda de cada superbloco é recalculada em todos os patamares da avaliação temporal. Como um mesmo superbloco pode conter consumidores residenciais, comerciais e industriais, a potência ativa demandada no patamar $h_k$ é obtida pela composição das três classes, conforme a Equação (110).

$$P_i^L(h_k) = \sum_{c \in \Omega_C} P_{i,\max}^{L,c} \cdot \gamma_c(h_k) \tag{110}$$

em que,

$P_i^L(h_k)$ é a potência ativa demandada pelo superbloco $i$ no patamar $h_k$;

$\Omega_C$ é o conjunto das classes de consumidores consideradas, composto por residencial, comercial e industrial;

$P_{i,\max}^{L,c}$ é a potência ativa máxima da classe $c$ no superbloco $i$; e

$\gamma_c(h_k)$ é o fator da curva horária de carga da classe $c$ no patamar $h_k$.

De forma análoga, a potência reativa do superbloco é determinada pela Equação (111).

$$Q_i^L(h_k) = \sum_{c \in \Omega_C} Q_{i,\max}^{L,c} \cdot \gamma_c(h_k) \quad (111)$$

em que,

$Q_i^L(h_k)$ é a potência reativa demandada pelo superbloco $i$ no patamar $h_k$;

$Q_{i,\max}^{L,c}$ é a potência reativa máxima da classe $c$ no superbloco $i$; e

$\gamma_c(h_k)$ é o fator da curva horária de carga da classe $c$ no patamar $h_k$.

As Equações (110) e (111) fazem com que a demanda equivalente de cada superbloco acompanhe cronologicamente o perfil diário das classes que o compõem. Assim, mesmo sem alteração topológica, a potência requerida pelo recurso responsável pela restauração pode aumentar ou diminuir durante a interrupção.

#### *5.4.3.2 Geração Fotovoltaica e do Sistema de Armazenamento*

A geração fotovoltaica é determinada diretamente a partir da potência ativa do PVS instalado no superbloco e do valor da irradiância no patamar observado. Assim, a potência ativa fotovoltaica disponível é calculada pela Equação por (112),

$$P_i^{PV}(h_k) = P_i^{PVS}\, G(h_k) \quad (112)$$

em que,

$P_i^{\mathrm{PV}}(h_k)$ é a potência ativa disponibilizada pelo sistema fotovoltaico do superbloco $i$ no patamar $h_k$;

$P_i^{PVS}$ é a potência ativa agregada dos PVS instalados nesse superbloco;

$G(h_k)$ é o valor normalizado da irradiância no patamar avaliado em $p.u.$

Em todos os passos da avaliação temporal, ($P_i^{PV}(h_k)$) é recalculada pela Equação (112), utilizando-se a irradiância ($G(h_k)$) correspondente ao patamar, independentemente da geração fotovoltaica disponível no horário de início da contingência. Assim, um valor nulo de geração em determinado patamar não é utilizado como referência para os patamares subsequentes.

A condição de operação do BESS é determinada pela diferença entre a demanda ativa do superbloco e a geração fotovoltaica disponível. Essa diferença é definida pela Equação (113).

$$\Delta P_i(h_k) = P_i^L(h_k) - P_i^{\mathrm{PV}}(h_k) \quad (113)$$

em que,

$\Delta P_i(h_k)$ é o desequilíbrio de potência ativa no superbloco $i$ no patamar $h_k$;

$P_i^L(h_k)$ é a demanda ativa definida pela Equação (110); e

$P_i^{\mathrm{PV}}(h_k)$ é a geração fotovoltaica disponível.

Valores $\Delta P_i(h_k) \geq 0$ representam déficit de geração fotovoltaica, enquanto valores $\Delta P_i(h_k) < 0$ representam excedente fotovoltaico.

A potência de descarga do BESS é limitada pela potência ativa máxima do conversor e pela energia disponível no início do patamar, conforme a Equação (114). O valor efetivamente despachado dentro desse intervalo depende do balanço da região restaurada. Na restauração a montante, a descarga é limitada ao déficit do próprio superbloco. Na restauração a jusante e nas microrredes, ela também pode contribuir para o atendimento dos demais superblocos pertencentes à mesma área energizada, respeitando-se a ordem de atendimento registrada durante a formação dessa área.

$$0 \leq P_{i,dis}^{BESS}(h_k) \leq \min\left\{P_{i,\max}^{BESS}, \frac{E_i^{BESS}(k-1)}{\Delta t}\right\} \tag{114}$$

em que

$P_{i,\mathrm{dis}}^{\mathrm{BESS}}(h_k)$ é a potência efetivamente descarregada pelo BESS no patamar $h_k$;

$P_{i,\max}^{\mathrm{BESS}}$ é o limite de potência ativa do BESS associado ao superbloco $i$;

$E_i^{\mathrm{BESS}}(k-1)$ é a energia disponível no início do passo temporal; e

$\Delta t$ é a duração do passo de simulação, adotada como 1 h.

Quando a geração fotovoltaica supera a demanda, o excedente local pode ser utilizado para recarregar o BESS. A potência de carga é limitada pelo excedente fotovoltaico, pela potência ativa máxima do BESS e pela capacidade ainda disponível na bateria, conforme a Equação (115).

$$0 \leq P_{i,ch}^{BESS}(h_k) \leq \min\left\{P_{i,exc}^{aloc}(h_k), P_{i,\max}^{BESS}, \frac{E_{i,nom}^{BESS} - E_i^{BESS}(k-1)}{\Delta t}\right\} \tag{115}$$

em que,

$P_{i,ch}^{BESS}(h_k)$ é a potência de carga do BESS no patamar $h_k$;

$E_{i,nom}^{BESS}$ é a capacidade nominal de armazenamento; e

$P_{i,exc}^{aloc}(h_k)$ é a parcela do excedente fotovoltaico remanescente alocada à recarga do BESS $i$ depois do atendimento das cargas abrangidas pela respectiva região restaurada. Na restauração a montante, essa região corresponde ao próprio superbloco. Na restauração a jusante e nas microrredes, a soma das parcelas alocadas à recarga não pode ultrapassar o excedente que permanece após o compartilhamento de potência entre os superblocos atendidos. Dessa forma, o atendimento das cargas restauradas precede a recarga do BESS.

As demais variáveis mantêm as definições anteriores. A recarga ocorre somente quando existe excedente fotovoltaico em relação à demanda do superbloco.

#### *5.4.3.3 Atualização Incremental do Estado Energético*

A energia armazenada é atualizada ao final de cada patamar e passa a constituir a condição inicial do patamar seguinte da mesma contingência. Como, em cada passo, apenas uma das potências de carga ou descarga pode assumir valor positivo, a evolução do estado energético é expressa pela Equação (116).

$$E_i^{BESS}(k) = E_i^{BESS}(k-1) - P_{i,dis}^{BESS}(h_k)\,\Delta t + P_{i,ch}^{BESS}(h_k)\,\Delta t \tag{116}$$

em que,

$E_i^{BESS}(k)$ é a energia armazenada ao final do passo temporal $k$;

$E_i^{BESS}(k-1)$ é a energia disponível no início desse passo;

$P_{i,dis}^{BESS}(h_k)$ e $P_{i,ch}^{BESS}(h_k)$ são, respectivamente, as potências de descarga e carga definidas pelas Equações (114) e (115); e

$\Delta t = 1$ h.

Os limites impostos nessas equações mantêm a energia armazenada no intervalo físico entre zero e a capacidade nominal do BESS.

Para a avaliação da sustentabilidade, considera-se apenas a parcela dos REDs efetivamente utilizada no atendimento da carga. Assim, a potência ativa disponibilizada pelo conjunto PV+BESS é definida pela Equação (117).

$$P_i^{RED,disp}(h_k) = P_i^{PV}(h_k) + P_{i,dis}^{BESS}(h_k) - P_{i,ch}^{BESS}(h_k) \tag{117}$$

em que,

$P_i^{RED,disp}(h_k)$ é a potência ativa líquida disponibilizada pelos REDs associados ao superbloco $i$ no patamar $h_k$, antes da aplicação da regra de alocação correspondente à região restaurada. A potência destinada à recarga do BESS é subtraída da geração disponível, evitando que a mesma parcela de potência seja contabilizada simultaneamente no atendimento das cargas e no carregamento do sistema de armazenamento.

A utilização de $P_i^{RED,disp}(h_k)$ depende da estratégia de restauração. A montante, sua contribuição é limitada ao abatimento da demanda do próprio superbloco. A jusante, eventual saldo positivo pode ser incorporado ao balanço dos superblocos subsequentes atendidos pelo mesmo alimentador de reserva. Nas microrredes, a potência disponível é agregada e

compartilhada entre os superblocos que permanecem energizados. Essa distinção preserva, na avaliação temporal, as regras estabelecidas nas Seções 5.1, 5.2 e 5.3.

Na avaliação temporal adotada nesta etapa, a contribuição reativa utilizada no balanço de sustentabilidade é proveniente do componente fotovoltaico, conforme a Equação (118).

$$Q_i^{RED,disp}(h_k) = Q_i^{PV,disp}(h_k) \tag{118}$$

em que,

$Q_i^{RED,disp}(h_k)$ é a potência reativa total disponibilizada pelos REDs associados ao superbloco $i$ no patamar $h_k$; e

$Q_i^{PV,disp}(h_k)$ é a contribuição reativa disponível do sistema fotovoltaico, respeitados os limites operacionais definidos para seu inversor. Na avaliação temporal da sustentabilidade, a contribuição reativa do BESS não é considerada.

As Equações (113) a (118) estabelecem a evolução recursiva do armazenamento durante a contingência. Dessa forma, a energia utilizada em determinado patamar depende das operações de carga e descarga ocorridas anteriormente no mesmo evento. Ao iniciar uma nova falta, essa trajetória é reinicializada a partir do SoC correspondente ao novo patamar de ocorrência, preservando a independência entre as contingências.

### 5.4.4 Avaliação da Sustentabilidade da Restauração

Após a atualização cronológica das demandas e dos REDs, a ISRM verifica, em cada patamar horário subsequente da contingência, se os recursos responsáveis pela restauração permanecem capazes de sustentar os superblocos previamente energizados. Nessa etapa, a configuração topológica obtida nas fases anteriores é mantida, não sendo executadas novas buscas por caminhos de restauração nem novas manobras de recomposição.

A avaliação é realizada separadamente para os superblocos atendidos pelos alimentadores de reserva e para aqueles pertencentes às microrredes. Em ambos os casos são verificadas simultaneamente as condições de potência ativa e reativa. Enquanto essas condições permanecem satisfeitas, o conjunto restaurado é preservado. Caso uma delas deixe de ser atendida, inicia-se a retirada progressiva de superblocos segundo a ordem inversa daquela registrada durante o processo restaurativo, até que a condição de sustentabilidade seja restabelecida ou que não restem superblocos atendidos pelo respectivo recurso.

A primeira perda de suprimento de cada superbloco é registrada para a determinação posterior de seu tempo efetivo de interrupção. Uma vez retirado por perda de sustentabilidade,

o superbloco não é reincorporado durante a mesma contingência, ainda que as condições energéticas melhorem em patamares posteriores.

#### *5.4.4.1 Avaliação Temporal dos Alimentadores de Reserva*

A avaliação temporal dos alimentadores de reserva é realizada separadamente para as regiões restauradas a montante e a jusante. Para a contingência analisada, cada alimentador de reserva permanece associado exclusivamente à região atendida durante a respectiva etapa de restauração. Portanto, as potências requeridas a montante e a jusante não são somadas nem comparadas com a disponibilidade de um mesmo alimentador.

Para cada alimentador de reserva $AL_r^{mon}$ empregado na restauração a montante, seja $\Omega_r^{mon}(h_k)$ o conjunto de superblocos que permanecem atendidos por esse alimentador no patamar $h_k$. Nessa região, a contribuição dos REDs é considerada individualmente no cálculo da demanda líquida de cada superbloco. Assim, a potência ativa requerida é determinada pela Equação (119).

$$P_r^{req,mon}(h_k) = \sum_{i \in \Omega_r^{mon}(h_k)} \max\left[0, P_i^L(h_k) - P_i^{RED,disp}(h_k)\right] \tag{119}$$

Para cada alimentador de reserva $AL_s^{jus}$ empregado na restauração a jusante, seja $\Omega_s^{jus}(h_k)$ o conjunto de superblocos que permanecem atendidos por esse alimentador no patamar $h_k$. Nessa região, os saldos individuais são agregados antes da aplicação da função $\max(0,\cdot)$, permitindo o compartilhamento do excedente entre os superblocos atendidos pelo mesmo alimentador. A potência ativa requerida é determinada pela Equação (120).

$$P_s^{req,jus}(h_k) = \max\left\{0, \sum_{i \in \Omega_s^{jus}(h_k)} \left[P_i^L(h_k) - P_i^{RED,disp}(h_k)\right]\right\} \tag{120}$$

em que,

$P_r^{req,mon}(h_k)$ é a potência ativa total requerida do alimentador de reserva $AL_r^{mon}$ na restauração a montante;

$P_s^{req,jus}(h_k)$ é a potência ativa total requerida do alimentador de reserva $AL_s^{jus}$ na restauração a jusante;

$\Omega_r^{mon}(h_k)$ e $\Omega_s^{jus}(h_k)$ são os respectivos conjuntos de superblocos que permanecem atendidos no patamar $h_k$;

$P_i^L(h_k)$ é a demanda ativa do superbloco $i$, definida pela Equação (110); e

$P_i^{RED,disp}(h_k)$ é a potência ativa disponibilizada pelos REDs associados ao superbloco $i$, definida pela Equação (117).

De forma análoga, as potências reativas requeridas nas regiões a montante e a jusante são determinadas, respectivamente, pelas Equações (121) e (122):

$$Q_r^{req,mon}(h_k) = \sum_{i \in \Omega_r^{mon}(h_k)} \max\left[0, Q_i^L(h_k) - Q_i^{RED,disp}(h_k)\right] \tag{121}$$

$$Q_s^{req,jus}(h_k) = \max\left\{0, \sum_{i \in \Omega_s^{jus}(h_k)} \left[Q_i^L(h_k) - Q_i^{RED,disp}(h_k)\right]\right\} \tag{122}$$

em que,

$Q_r^{req,mon}(h_k)$ é a potência reativa total requerida do alimentador de reserva $AL_r^{mon}$ na restauração a montante;

$Q_s^{req,jus}(h_k)$ é a potência reativa total requerida do alimentador de reserva $AL_s^{jus}$ na restauração a jusante;

$Q_i^L(h_k)$ é a demanda reativa do superbloco $i$, definida pela Equação (111); e

$Q_i^{RED,disp}(h_k)$ é a potência reativa disponibilizada pelos REDs associados ao superbloco $i$, definida pela Equação (118). As demais variáveis mantêm as definições apresentadas para as Equações (119) e (120).

Nas Equações (119) e (121), referentes à restauração a montante, a função $\max(0,\cdot)$ é aplicada individualmente a cada superbloco. Consequentemente, a geração local pode reduzir a potência requerida pelo próprio elemento, mas eventual excedente não é transferido aos demais superblocos. Nas Equações (120) e (122), referentes à restauração a jusante, os saldos individuais são somados antes da aplicação da função $\max(0,\cdot)$. Dessa forma, o excedente de um superbloco pode compensar o déficit de outro pertencente à região atendida pelo mesmo alimentador de reserva, sem produzir uma potência requerida negativa.

As potências ativa e reativa disponíveis de cada alimentador de reserva são atualizadas em cada patamar de acordo com sua curva horária de carregamento. A sustentabilidade é verificada exclusivamente para a região associada ao respectivo alimentador, conforme a Equação (123).

$$\begin{cases} P_r^{req,mon}(h_k) \le P_r^{disp}(h_k) \ \wedge \ Q_r^{req,mon}(h_k) \le Q_r^{disp}(h_k), & AL_r^{mon}, \\ P_s^{req,jus}(h_k) \le P_s^{disp}(h_k) \ \wedge \ Q_s^{req,jus}(h_k) \le Q_s^{disp}(h_k), & AL_s^{jus}. \end{cases} \tag{123}$$

em que,

$P_r^{disp}(h_k)$ e $Q_r^{disp}(h_k)$ são, respectivamente, as potências ativa e reativa disponíveis do alimentador $AL_r^{mon}$ no patamar $h_k$; e

$P_s^{disp}(h_k)$ e $Q_s^{disp}(h_k)$ são as grandezas correspondentes ao alimentador $AL_s^{jus}$.

Quando a condição correspondente da Equação (123) é satisfeita, todos os superblocos associados ao alimentador avaliado permanecem energizados e a análise avança para o patamar seguinte. Caso contrário, são retirados, um a um, somente os superblocos pertencentes à respectiva região restaurada, seguindo-se a ordem inversa do registro de restauração. Após cada retirada, as potências requeridas são recalculadas pela equação ativa e pela equação reativa aplicáveis àquela região, e a condição da Equação (123) é novamente verificada. A redução da área atendida prossegue até que as restrições de potência ativa e reativa sejam restabelecidas ou que não restem superblocos sustentáveis pelo alimentador considerado.

#### *5.4.4.2 Avaliação Temporal das Microrredes*

A avaliação temporal das microrredes segue o mesmo princípio cronológico adotado para os alimentadores de reserva. Entretanto, sua disponibilidade energética não depende da capacidade remanescente de um alimentador convencional, sendo determinada exclusivamente pelos recursos energéticos distribuídos que compõem cada microrrede.

Diferentemente da avaliação dos alimentadores de reserva, nas microrredes não se estabelece distinção entre regiões a montante e a jusante. Todos os superblocos que permanecem energizados integram uma única região de balanço, na qual a potência disponibilizada pelos REDs pode ser compartilhada. Dessa forma, o excedente de geração de um superbloco pode contribuir para o atendimento dos demais elementos pertencentes à mesma microrrede.

Para cada microrrede $m$, seja $\Omega_m(h_k)$ o conjunto de superblocos que permanecem energizados no patamar $h_k$. Nessa condição, a sustentabilidade é verificada comparando-se as demandas ativa e reativa agregadas dos superblocos ainda atendidos com as respectivas potências disponibilizadas pelos REDs associados a esses mesmos elementos.

A demanda ativa total da microrrede é definida pela Equação (124).

$$P_m^L(h_k) = \sum_{i \in \Omega_m(h_k)} P_i^L(h_k) \tag{124}$$

em que,

$P_m^L(h_k)$ é a demanda ativa total da microrrede $m$ no patamar $h_k$;

$\Omega_m(h_k)$ é o conjunto de superblocos ainda atendidos pela microrrede; e

$P_i^L(h_k)$ é a demanda ativa do superbloco $i$, definida pela Equação (110).

A demanda reativa total é determinada pela Equação (125).

$$Q_m^L(h_k) = \sum_{i \in \Omega_m(h_k)} Q_i^L(h_k) \tag{125}$$

em que,

$Q_m^L(h_k)$ é a demanda reativa total da microrrede $m$ no patamar $h_k$; e

$Q_i^L(h_k)$ é a demanda reativa do superbloco $i$, definida pela Equação (111).

As demais variáveis mantêm as definições apresentadas para a Equação (124).

A potência ativa efetivamente disponibilizada pelos REDs da microrrede é obtida pela Equação (126).

$$P_m^{RED}(h_k) = \sum_{i \in \Omega_m(h_k)} P_i^{RED}(h_k) \tag{126}$$

em que,

$P_m^{RED}(h_k)$ é a potência ativa total disponibilizada pelos REDs da microrrede $m$ no patamar $h_k$;

$P_i^{RED}(h_k)$ é a potência ativa disponibilizada pelos REDs do superbloco $i$, definida pela Equação (117).

Na Equação (126), a contribuição de cada RED não é limitada previamente à demanda do superbloco em que está instalado. Consequentemente, eventual saldo positivo permanece disponível para o atendimento dos demais superblocos que integram a microrrede.

De forma análoga, a contribuição reativa total dos REDs é dada pela Equação (127).

$$Q_m^{RED}(h_k) = \sum_{i \in \Omega_m(h_k)} Q_i^{RED}(h_k) \tag{127}$$

em que,

$Q_m^{RED}(h_k)$ é a potência reativa total considerada para os REDs da microrrede $m$ no patamar $h_k$;

$Q_i^{RED}(h_k)$ é a contribuição reativa do RED associado ao superbloco $i$, definida pela Equação (118).

A sustentabilidade da microrrede é verificada pela Equação (128).

$$P_m^L(h_k) \leq P_m^{RED}(h_k) \quad \wedge \quad Q_m^L(h_k) \leq Q_m^{RED}(h_k) \tag{128}$$

em que as grandezas de demanda e de potência disponível da microrrede são aquelas definidas por (124) a (127). A condição somente é satisfeita quando os balanços de potência ativa e reativa permanecem simultaneamente viáveis.

Quando (128) deixa de ser satisfeita, os superblocos da microrrede são retirados progressivamente na ordem inversa daquela registrada durante sua formação. Após cada retirada, são recalculadas, para o conjunto remanescente, tanto as demandas agregadas definidas

pelas Equações (124) e (125) quanto as potências disponibilizadas pelos REDs definidas pelas Equações (126) e (127). A condição de sustentabilidade é então novamente verificada, repetindo-se o procedimento até que o conjunto remanescente possa ser mantido ou que não restem superblocos atendidos pela microrrede.

A evolução da irradiância, da demanda e da energia armazenada pode melhorar as condições energéticas em patamares posteriores. Entretanto, essa etapa não executa uma nova expansão da microrrede. Assim, a recuperação da disponibilidade beneficia apenas os superblocos que ainda permanecem atendidos; aqueles anteriormente retirados não são religados durante a mesma contingência. Consequentemente, o conjunto restaurado apresenta trajetória monotonicamente não crescente ao longo da avaliação temporal.

### 5.4.5 Atualização dos Tempos Individuais de Interrupção

A etapa final da avaliação temporal converte o histórico cronológico de atendimento de cada superbloco nos tempos individuais de interrupção utilizados na avaliação da confiabilidade. Essa etapa não introduz novas definições matemáticas, pois aplica diretamente a formulação estabelecida na Seção 4.4.

Para cada contingência $F_i$ iniciada no patamar $h$, a rotina acompanha os superblocos restaurados automaticamente, restaurados manualmente e não restaurados. Quando a condição de atendimento permanece inalterada até a normalização definitiva, o tempo de interrupção de cada bloco de carga é determinado pelos casos elementares da Equação (26): tempo de recomposição automática, tempo de recomposição manual, tempo total da contingência ou tempo nulo, conforme a condição do bloco.

Os superblocos inicialmente restaurados são acompanhados durante a avaliação cronológica descrita nas Subseções 5.4.3 e 5.4.4. Se um superbloco perde sustentabilidade antes de $T_I^{(h)}$, registra-se somente o primeiro instante dessa perda. Uma vez retirado, o superbloco permanece desligado até a normalização definitiva da contingência, sem novos ciclos de desligamento e religamento. Para os blocos pertencentes a esse superbloco, o tempo efetivo de interrupção é calculado pela Equação (28), que combina o intervalo anterior à restauração inicial com o intervalo compreendido entre a perda posterior de suprimento e a normalização definitiva.

No nível de implementação, a primeira perda é identificada no histórico de atendimento do superbloco $SB_k^{(i)}$. O tempo efetivo correspondente, representado por $\theta_{ik}^{(h)}$, é então transferido aos blocos de carga que compõem esse superbloco mediante o mapeamento $\Phi_i$, conforme a

Equação (32), resultando em $t_{ij}^{(h)}$ para cada bloco $BL_j$ afetado pela contingência $F_i$. Dessa forma, os índices permanecem compatíveis com a Matriz dos Tempos de Interrupção dos Blocos (MTIB): $i$ identifica a contingência, $j$ identifica o bloco de carga, $h$ identifica o patamar de início da falta e $k$ identifica o superbloco durante a simulação temporal.

O mesmo histórico cronológico de atendimento utilizado para determinar $t_{ij}^{(h)}$ define a função $\gamma_{ij}^{(h)}(\tau)$ empregada na Equação (58). Essa função assume valor unitário enquanto o bloco permanece sem atendimento, valor nulo durante o intervalo em que o suprimento está restabelecido e, caso ocorra perda posterior de sustentabilidade, retorna ao valor unitário até $T_I^{(h)}$. Assim, o tempo efetivo de interrupção e a energia não distribuída são obtidos a partir da mesma trajetória de atendimento, evitando divergências entre a MTIB e a END.

Ao término da simulação de cada contingência $F_i$ no patamar $h$, o vetor $t_i^{(h)}$, constituído pelos valores $t_{ij}^{(h)}$, é incorporado à MTIB correspondente ao patamar analisado. A matriz resultante reúne, portanto, os efeitos da restauração inicial e das eventuais perdas posteriores de sustentabilidade identificadas ao longo da simulação temporal.

## 5.5 INTEGRAÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO DA ISRM COM A AVALIAÇÃO DA CONFIABILIDADE

As etapas desenvolvidas neste capítulo descrevem integralmente o processo de restauração implementado pela metodologia ISRM, desde a formação dos superblocos até a avaliação temporal da sustentabilidade energética das áreas restauradas. Como resultado, são obtidas, para cada contingência simulada, as informações necessárias para caracterizar a evolução do atendimento da rede durante o período de interrupção.

Entre essas informações destacam-se os superblocos interrompidos, a estratégia de restauração empregada, os REDs responsáveis pelo suprimento das cargas, a evolução temporal da demanda líquida, os instantes de perda de sustentabilidade energética e, principalmente, os tempos efetivos de interrupção dos blocos de carga, os quais são registrados na MTIB. Esses resultados representam a ligação entre a simulação física do processo restaurativo e a avaliação probabilística da confiabilidade desenvolvida no Capítulo 4.

Conforme apresentado anteriormente, os tempos efetivos de interrupção obtidos durante a simulação cronológica são incorporados à MTIB, enquanto a classificação das interrupções permanentes alimenta a MBIP. Essas estruturas, combinadas com a MDB e com a modelagem

probabilística das contingências, constituem a base para a determinação dos indicadores de continuidade e dos índices econômicos formulados na Seção 4.6.

Dessa forma, a metodologia proposta estabelece uma separação clara entre a simulação do comportamento físico da rede e a avaliação dos indicadores de desempenho. Enquanto o presente capítulo concentra-se na representação do processo restaurativo, considerando a atuação dos alimentadores de reserva, das microrredes e da evolução temporal dos recursos energéticos distribuídos, o Capítulo 4 utiliza as informações produzidas por essa simulação para quantificar os impactos das contingências por meio dos indicadores FEC, DEC, END e CIC.

Essa organização modular constitui uma das principais características da ISRM. Como a simulação do processo restaurativo permanece separada da etapa de agregação probabilística, diferentes técnicas de recomposição podem ser incorporadas à metodologia, desde que forneçam, de forma compatível, os tempos efetivos de interrupção, a classificação das interrupções permanentes e o histórico cronológico do estado de atendimento dos blocos. Dessa forma, a introdução de novos modelos de restauração, de recursos energéticos distribuídos ou de estratégias de operação modifica as informações produzidas pela simulação, mas preserva as regras de agregação empregadas no cálculo dos indicadores FEC, DEC, END e CIC.

A integração entre a simulação da restauração e a avaliação probabilística da confiabilidade é representada de forma complementar nas Figura 2 e Figura 17 e Quadro 6. A Figura 2 apresenta o fluxo operacional completo da ISRM, desde a ocorrência da contingência até a obtenção dos indicadores. A Figura 17 explicita a relação entre a MDB, a MTIB e a MBIP, enquanto o Quadro 6 ilustra a trajetória cronológica de atendimento utilizada na determinação dos tempos efetivos de interrupção e da função indicadora $\gamma_{ij}^{(h)}(\tau)$. Ao término de cada contingência, os valores $t_{ij}^{(h)}$ são incorporados à MTIB, a classificação das interrupções permanentes alimenta a MBIP e o histórico cronológico de atendimento é utilizado no cálculo da END. Em conjunto com a MDB e com a modelagem probabilística das contingências, essas informações fornecem as entradas necessárias para a determinação de FEC, DEC, END e CIC.

Com isso, conclui-se a implementação computacional da ISRM, estabelecendo um processo integrado capaz de transformar a ocorrência de uma contingência em indicadores quantitativos de desempenho, por meio da representação hierárquica da rede, das estratégias de restauração, da simulação temporal e da avaliação probabilística da confiabilidade. Essa estrutura constitui o mecanismo de avaliação que será utilizado no capítulo seguinte pelo algoritmo NSGA-II para comparar e selecionar diferentes configurações de automação da rede de distribuição.

# 6 OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO DA AUTOMAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO O ALGORITMO NSGA-II

Os capítulos anteriores apresentaram a Metodologia Integrada de Restauração Inteligente (ISRM), desenvolvida para simular o processo de restauração de sistemas de distribuição após faltas permanentes, considerando diferentes níveis de automação, alimentadores de reserva e recursos energéticos distribuídos. A partir dessa metodologia, torna-se possível avaliar quantitativamente o impacto de diferentes configurações de automação sobre os indicadores de continuidade e os custos associados às interrupções do fornecimento de energia.

Entretanto, a definição dos locais onde devem ser instaladas novas chaves automatizadas constitui um problema de otimização combinatória de elevada complexidade. À medida que aumenta o número de posições candidatas à automação, o número de configurações possíveis cresce exponencialmente, tornando inviável a avaliação exaustiva de todas as alternativas.

Além da elevada dimensão do espaço de busca, o planejamento da automação envolve objetivos naturalmente conflitantes. Em geral, soluções que proporcionam maiores melhorias na continuidade do fornecimento requerem investimentos mais elevados, enquanto configurações de menor custo tendem a apresentar desempenho inferior sob o ponto de vista da confiabilidade. Dessa forma, o problema não admite uma única solução ótima, mas um conjunto de soluções eficientes que representam diferentes compromissos entre desempenho técnico e investimento.

Para explorar esse espaço de soluções foi empregado o algoritmo *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm* II (NSGA-II), amplamente utilizado em problemas de otimização multiobjetivo devido à sua capacidade de identificar simultaneamente um conjunto de soluções não dominadas distribuídas ao longo da fronteira de Pareto.

É importante destacar que a contribuição desta tese não consiste na proposição de um novo algoritmo evolutivo nem em modificações ao NSGA-II. A contribuição está na formulação do problema de otimização da automação de redes de distribuição e na integração desse algoritmo evolutivo à metodologia ISRM, permitindo que milhares de configurações candidatas sejam avaliadas automaticamente por meio da simulação completa do processo de restauração desenvolvido nos capítulos anteriores.

Assim, este capítulo apresenta a formulação do problema de otimização, a representação das soluções candidatas, o processo de avaliação realizado pela ISRM e os principais

componentes do NSGA-II empregados nesta pesquisa, enfatizando a integração entre a metodologia de restauração proposta e o processo de busca das soluções de compromisso.

## 6.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

O objetivo da otimização proposta consiste em determinar configurações de automação da rede de distribuição que proporcionem compromissos adequados entre confiabilidade do fornecimento, impactos econômicos das interrupções e investimento necessário para implantação da infraestrutura de automação. Cada solução candidata representa uma combinação específica de instalação de novas chaves automatizadas e de conversão de chaves manuais existentes para operação automática.

Embora a ISRM calcule diferentes indicadores técnicos, energéticos e econômicos, incluindo FEC, DEC, END e CIC, foram selecionadas três funções objetivo para representar dimensões complementares do problema de planejamento: DEC, CIC e CAPEX. O DEC representa a continuidade do fornecimento por meio da duração equivalente anual das interrupções por consumidor; o CIC representa o impacto socioeconômico das interrupções, considerando o Valor da Carga Perdida (VCP); e o CAPEX representa o investimento associado às intervenções de automação.

A utilização dessas três funções objetivo permite considerar simultaneamente os aspectos de confiabilidade, impacto econômico das interrupções e investimento, evitando a inclusão de indicadores que forneçam informações parcialmente redundantes. Os demais indicadores produzidos pela ISRM permanecem disponíveis para a análise complementar das soluções obtidas.

Além das funções objetivo, considera-se um limite orçamentário para a implantação da automação. Para cada configuração candidata, o custo correspondente às novas chaves automatizadas e às conversões de chaves manuais é comparado ao orçamento máximo disponível, permitindo estabelecer sua viabilidade financeira.

Dessa forma, o problema consiste em identificar um conjunto de configurações não dominadas que representem diferentes compromissos entre DEC, CIC e CAPEX, respeitando a restrição orçamentária estabelecida. O desempenho operacional de cada configuração é determinado pela ISRM, enquanto o CAPEX é calculado a partir das intervenções de automação representadas pela solução candidata. A exploração do espaço de soluções e a identificação da fronteira de Pareto são realizadas pelo algoritmo NSGA-II.

A formulação matemática considera um conjunto de posições candidatas à automação, previamente identificadas a partir da estrutura da rede e dos dispositivos existentes. O objetivo é determinar configurações capazes de estabelecer diferentes compromissos entre continuidade do fornecimento, impacto econômico das interrupções e investimento em automação.

Seja,

$$\Omega_C = \{c_1, c_2, \dots, c_{N_c}\} \tag{129}$$

o conjunto formado pelas $N_c$ posições candidatas à automação da rede.

Cada solução candidata é representada pelo vetor binário de decisão (130), cuja avaliação é realizada integralmente pela metodologia ISRM.

$$\boldsymbol{x} = [x_1, x_2, \dots, x_{N_c}] \tag{130}$$

em que

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{se a posição candidata } c_i \text{ for automatizada;} \\ 0, & \text{caso contrário,} \end{cases} \quad i = 1, \dots, N_C \tag{131}$$

Dessa forma, cada vetor $\boldsymbol{x}$ representa uma configuração completa de automação da rede de distribuição, definindo quais posições candidatas receberão novas chaves automatizadas ou terão suas chaves manuais convertidas para operação automática.

A configuração definida pelo vetor de decisão é incorporada ao modelo da rede. Para cada solução, a ISRM executa o processo de restauração para as contingências consideradas e fornece os indicadores operacionais utilizados na otimização, enquanto o investimento correspondente às intervenções é contabilizado separadamente.

O problema de otimização pode então ser formulado como mostrado na equação (132):

$$\min F_{(x)} = [f1_{(x)}, f2_{(x)}, f3_{(x)}] \tag{132}$$

em que

$$f1_{(x)} = DEC_{(x)} \tag{133}$$

$$f2_{(x)} = CIC_{(x)} \tag{134}$$

$$f3_{(x)} = CAPEX_{(x)} \tag{135}$$

As funções objetivo representam, respectivamente, a duração equivalente anual das interrupções por consumidor (DEC), o custo anual das interrupções suportado pelos consumidores (CIC) e o investimento necessário para implantação da configuração de automação (CAPEX).

Além das funções objetivo, considera-se o orçamento máximo disponível para implantação da automação. O custo total da configuração deve satisfazer (136),

$$CAPEX_{(x)} \leq B \tag{136}$$

A violação orçamentária associada a uma solução é definida por (137),

$$v_{B(x)} = max\{0, CAPEX_{(x)} - B\} \tag{137}$$

Uma solução é considerada financeiramente viável quando $v_{B(x)} = 0$. Caso contrário, $v_{B(x)}$ representa o montante pelo qual seu custo excede o orçamento estabelecido.

Nessa formulação, DEC e CIC são obtidos pela avaliação operacional realizada pela ISRM, enquanto o CAPEX é calculado a partir das novas chaves automatizadas e das conversões de chaves manuais representadas pela solução candidata.

A restrição orçamentária é incorporada à relação de dominância. Uma solução viável possui preferência sobre uma solução inviável; quando ambas são inviáveis, é favorecida aquela com menor violação orçamentária. Quando ambas são viáveis, aplica-se a dominância de Pareto sobre DEC, CIC e CAPEX.

A formulação apresentada define o problema de engenharia de forma independente do mecanismo de busca. Nas seções seguintes, essa representação é utilizada pelo NSGA-II para explorar o espaço de soluções e identificar as configurações não dominadas.

### 6.1.1 Formação dos custos de investimento

Os custos unitários utilizados na composição do CAPEX foram determinados com base nos dados de implantação apresentados por Pinney (2014), no relatório *Costs and Benefits of Smart Feeder Switching: Quantifying the Operating Value of SFS*, elaborado no âmbito do projeto de demonstração do DOE/NRECA. O relatório apresenta, para a automação de redes aéreas de distribuição aéreas, o custo unitário de USD 22.792,00 para uma chave aérea equipada com controle e de USD 2.245,00 para o respectivo equipamento de radiocomunicação. Também são informados acréscimos de 2% referentes ao frete e de 5,5% relativos aos tributos incidentes sobre os equipamentos. Neste trabalho, admitiu-se uma unidade de radiocomunicação para cada chave automatizada. Assim, o custo base do conjunto formado pela chave, pelo controle e pela comunicação foi calculado por (138), totalizando USD 26.914,78 USD, em valores de maio de 2014.

$$C_{\text{eq}} = C_{controle} + R_{com} + frete + tributos \tag{138}$$

Em que,

$C_{\text{eq}}$ é o custo base do conjunto;

$C_{controle}$ é o custo do equipamento de controle da chave;

$R_{com}$ é o custo da unidade de radiocomunicação;

Para a substituição de uma chave manual existente por uma nova chave automatizada, considerou-se o aproveitamento do poste e da estrutura de montagem já disponíveis. Dessa forma, o custo dessa intervenção corresponde ao conjunto de equipamentos, controle, comunicação, frete e tributos, sem a inclusão de uma nova parcela de infraestrutura.

Para estimar o custo adicional associado à implantação de uma chave em uma posição nova, foram utilizados os dados do projeto da *Energy United* apresentados no mesmo relatório. O projeto compreendeu dois religadores e três chaves, totalizando cinco dispositivos automatizados, com custo total de USD 214.000,00, dos quais USD 138.000 corresponderam aos equipamentos e sistemas. A diferença entre esses valores foi distribuída igualmente entre os cinco dispositivos:

$$C_{\text{infra},2014} = \frac{214.000 - 138.000}{5} = 15.200 \text{ USD/dispositivo.}$$

Essa parcela foi adotada como uma aproximação do custo médio de implantação em campo, contemplando adequações de poste e estrutura, montagem, engenharia, integração, testes e comissionamento. Trata-se, portanto, de um rateio médio dos custos não classificados como equipamentos e sistemas, uma vez que o relatório não apresenta a decomposição individual dessas despesas por dispositivo.

Consequentemente, o custo-base da instalação de uma chave automatizada em um ponto novo foi determinado por

$$C_{\text{nova},2014} = 26.914,78 + 15.200 = 42.114,78 \text{ USD.}$$

Os valores de maio de 2014 foram atualizados para maio de 2026 por meio do Consumer *Price Index for All Urban Consumers* (CPI-U), publicado pelo *U.S. Bureau of Labor Statistics*. Para os índices de 237,900 e 335,123, respectivamente, obteve-se o fator de atualização

$$F_{\text{CPI}-\text{U}} = \frac{335,123}{237,900} = 1,40867.$$

O CPI-U é o índice oficial empregado pelo BLS para representar a variação dos preços ao consumidor urbano nos Estados Unidos. Assim, os custos atualizados por dispositivo foram calculados por

$$C_{\text{substituição},2026} = 26.914,78 \times 1,40867 = 37.914,04 \approx 37.914 \text{ USD}$$

e

$$C_{\text{nova},2026} = 42.114,78 \times 1,40867 = 59.325,82 \approx 59.326 \text{ USD.}$$

A Tabela 2 sintetiza a formação dos custos adotados nesse trabalho com base em Pinney (2014).

Tabela 2 - Composição dos custos unitários das intervenções de automação em valores de maio de 2014 e maio de 2026.

| Componente | Substituição (USD de 2014) | Instalação nova (USD de 2014) |
|---|---|---|
| Chave aérea com controle | 22.792,00 | 22.792,00 |
| Equipamento de radiocomunicação | 2.245,00 | 2.245,00 |
| Frete – 2% | 500,74 | 500,74 |
| Tributos – 5,5% | 1.377,04 | 1.377,04 |
| Infraestrutura e implantação em campo | – | 15.200,00 |
| Total em maio de 2014 | 26.914,78 | 42.114,78 |
| Fator de atualização CPI-U | 1,40867 | 1,40867 |
| Total em maio de 2026 | 37.914,04 | 59.325,82 |
| Valor adotado no algoritmo | 37.914,00 | 59.326,00 |

Fonte: Elaborada pelo autor com base em Pinney (2014) e BLS (2026).

Para uma solução candidata, o investimento total é dado por (139),

$$CAPEX = N_{\text{nova}}\, C_{\text{nova}} + N_{\text{subs}}\, C_{\text{subs}} \tag{139}$$

em que,

$N_{\text{nova}}$, representa o número de chaves automatizadas instaladas em novas posições e

$N_{\text{subs}}$, corresponde ao número de chaves manuais substituídas por novas unidades automatizadas.

## 6.2 REPRESENTAÇÃO CROMOSSÔMICA DAS SOLUÇÕES CANDIDATAS

Cada configuração candidata de automação é representada por um cromossomo binário, no qual cada gene está associado a uma posição previamente identificada como elegível à intervenção. Essa representação estabelece uma correspondência direta entre as decisões do algoritmo evolutivo e os elementos da rede que podem receber uma nova chave automatizada ou ter uma chave manual existente convertida para operação automática.

Considere o conjunto de posições candidatas dado por (140):

$$\Omega_l = \{l_1, l_2, \dots, l_{Nl}\} \tag{140}$$

em que cada elemento $l_i$ corresponde a uma linha da rede considerada elegível para a automação, e $N_l$ representa o número total de posições candidatas.

A cada posição candidata associa-se um gene binário conforme (141),

$$g_i \in \{0,1\},\ i = 1, \dots, N_l \tag{141}$$

em que

$g_i = 1$ indica que a posição candidata $c_i$ será automatizada;

$g_i = 0$ indica que nenhuma alteração será realizada nessa posição.

Assim, um indivíduo da população pode ser representado pelo cromossomo dado em (142):

$$G = [g_1, g_2, \dots, g_{Nl}] \tag{142}$$

O conjunto de posições candidatas é definido antes do início do processo evolutivo. Na implementação utilizada, não são incluídas posições associadas a chaves normalmente abertas, fusíveis, disjuntores, religadores ou chaves originalmente automatizadas. Permanecem como candidatas as linhas nas quais pode ser instalada uma nova chave automatizada e aquelas que possuem chave manual elegível à conversão para operação automatizada.

A decodificação do cromossomo é direta: os genes ativos são associados às respectivas linhas candidatas e as intervenções correspondentes são aplicadas ao modelo da rede antes da avaliação pela ISRM. Dessa forma, a mesma estrutura de representação pode ser utilizada em redes de diferentes portes, variando apenas o número de posições candidatas e, consequentemente, o comprimento do cromossomo.

A Figura 18 ilustra a correspondência entre as posições candidatas da rede e os genes do cromossomo binário utilizado pelo algoritmo.

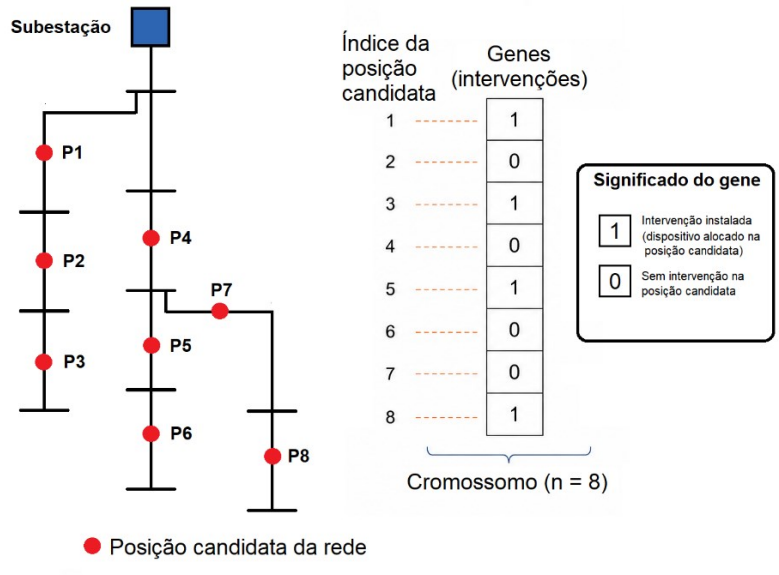



Figura 18 - Correspondência entre as posições candidatas da rede e a codificação binária do cromossomo. Gene igual a “1” instala chave automática ou substitui chave manual por automática. Gene igual a “0”, mantém como condição original.

Fonte: Elaborada pelo autor

## 6.3 PROCESSO EVOLUTIVO DO NSGA-II

O algoritmo NSGA-II proposto é empregado como mecanismo de busca no espaço de configurações de automação. Sua função é gerar, selecionar e evoluir as soluções candidatas, enquanto a avaliação de cada configuração é realizada pela Metodologia Integrada de Restauração Inteligente (ISRM).

Essa integração estabelece uma separação clara entre o processo evolutivo e o modelo de avaliação. Para cada indivíduo, o cromossomo é decodificado e as intervenções correspondentes são aplicadas à rede. A ISRM executa então a simulação completa do processo de restauração para as contingências consideradas, determinando os valores de DEC e CIC associados à configuração. O CAPEX é calculado separadamente a partir do número de novas chaves automatizadas e das conversões de chaves manuais representadas pelo indivíduo.

Dessa forma, o NSGA-II não utiliza aproximações analíticas para estimar o desempenho das configurações candidatas. As soluções são comparadas a partir dos resultados obtidos pelo mesmo modelo de restauração desenvolvido nos capítulos anteriores, preservando a coerência entre a metodologia proposta e o processo de otimização.

A Figura 19 apresenta a interação entre os dois componentes da metodologia. O NSGA-II fornece as configurações candidatas de automação; a ISRM avalia o comportamento operacional correspondente; e os valores de DEC, CIC e CAPEX, juntamente com a informação de viabilidade orçamentária, retornam ao processo evolutivo para classificação e seleção das soluções.

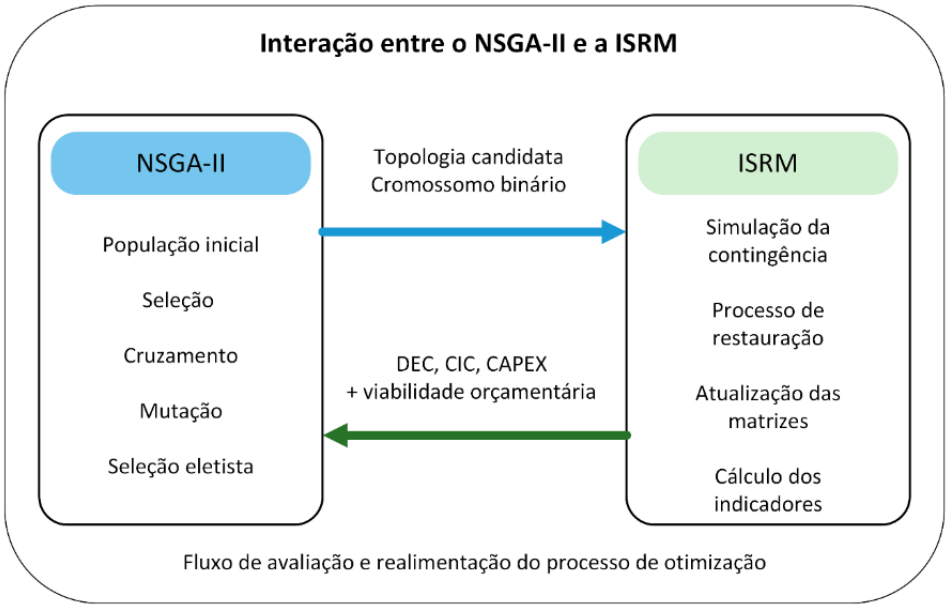



Figura 19 - Integração entre o NSGA-II e a metodologia ISRM

Fonte: Elaborada pelo autor

A partir dessa arquitetura, cada geração do processo evolutivo é composta por etapas de avaliação, classificação, reprodução e seleção ambiental. Sendo assim, em cada geração, o procedimento é executado segundo as seguintes etapas:

1. geração da população inicial;
2. avaliação da população corrente;
3. classificação por dominância e cálculo da distância de aglomeração;
4. seleção dos indivíduos para reprodução;
5. aplicação dos operadores de cruzamento e mutação para formação da população descendente;
6. avaliação da população descendente;
7. combinação das populações corrente e descendente e seleção ambiental para formação da geração seguinte;
8. atualização das métricas de convergência e verificação do critério de parada.

As subseções seguintes descrevem apenas os mecanismos necessários para caracterizar a implementação empregada, com ênfase nos aspectos que interferem diretamente na avaliação das configurações de automação e na obtenção da frente de Pareto.

### 6.3.1 Inicialização da População

A execução do NSGA-II inicia-se com a geração da população inicial $P_0$, composta por indivíduos binários cujo comprimento corresponde ao número de posições candidatas à automação. Cada gene é gerado de forma independente, podendo assumir os estados 0 ou 1.

Para reduzir a ocorrência inicial de configurações com custos muito superiores ao orçamento disponível, a probabilidade de ativação de cada gene é ajustada em função do orçamento máximo e do custo médio das intervenções. Essa probabilidade é definida por (143),

$$p_1 = \min\left(p_{max}, \frac{B}{N_C C_{med}}\right) \tag{143}$$

com:

$$p_{max} = 0{,}15 \tag{144}$$

e

$$C_{med} = \frac{C_{aut} + C_{subst}}{2} \tag{145}$$

em que:

$p_1$ é a probabilidade inicial de um gene assumir o valor 1;

$p_{\max}$ é o limite superior adotado para essa probabilidade;

$B$ é o orçamento máximo destinado à implantação da automação;

$N_C$ é o número de posições candidatas à automação;

$C_{\text{med}}$ é o custo médio entre a instalação de uma nova chave automatizada ($C_{aut}$) e a conversão de uma chave manual existente ($C_{subst}$).

Na implementação, adota-se pmax = 0,15. Esse valor funciona como um limite heurístico para evitar populações iniciais excessivamente densas em intervenções. O ajuste orienta apenas a geração da população inicial e não garante, por si só, a viabilidade orçamentária de todos os indivíduos; essa condição é tratada posteriormente pela relação de dominância com restrição.

### 6.3.2 Avaliação das Soluções Candidatas

Após a geração da população, cada indivíduo é avaliado para determinar o desempenho da configuração de automação representada pelo cromossomo. Inicialmente, os genes ativos são decodificados nas respectivas linhas candidatas e as intervenções correspondentes são aplicadas ao modelo da rede.

Cada gene ativo pode representar a instalação de uma nova chave automatizada ou a conversão de uma chave manual existente para operação automatizada. A instalação de uma nova chave pode alterar a segmentação da rede em blocos de carga, enquanto a conversão modifica a condição operacional do dispositivo durante o processo de restauração. Após a aplicação das intervenções, a estrutura da rede é reconstruída antes da execução das simulações.

A ISRM executa então o processo completo de restauração para as contingências consideradas, incluindo a atuação dos dispositivos de proteção, a formação dos blocos e superblocos, a restauração por alimentadores de reserva, a formação das microrredes e a avaliação temporal da disponibilidade dos recursos energéticos distribuídos. Dessa avaliação, são obtidos os valores anuais de DEC e CIC associados à configuração candidata.

O CAPEX é calculado separadamente a partir do número de novas chaves automatizadas e das conversões de chaves manuais. O custo total é comparado ao orçamento máximo, sendo registradas a viabilidade da solução e, quando aplicável, a magnitude da violação orçamentária. Os valores de DEC, CIC e CAPEX constituem o vetor de objetivos utilizado nas etapas seguintes do NSGA-II.

Como a avaliação pela ISRM representa a etapa de maior custo computacional do processo evolutivo, a implementação utiliza cache para reutilizar resultados de cromossomos já avaliados e evita a repetição de simulações quando um mesmo indivíduo aparece mais de

uma vez na população. As novas avaliações podem ainda ser executadas em paralelo, preservando-se a ordem original dos indivíduos na população. Essas estratégias reduzem o tempo de processamento sem alterar o modelo de avaliação das soluções. O Fluxo de avaliação de um indivíduo no processo integrado ISRM–NSGA-II pode ser visto na Figura 20.

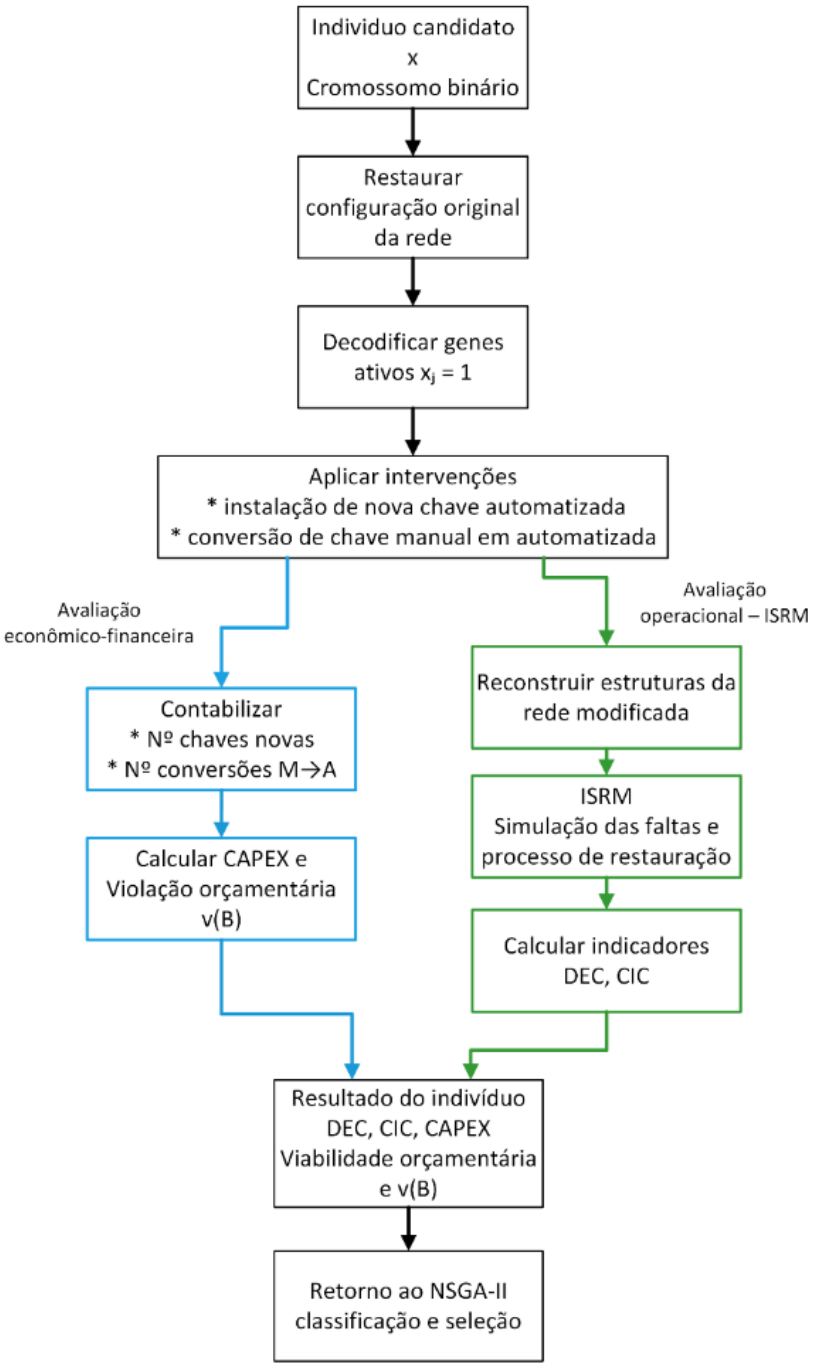



Figura 20 - Fluxo de avaliação de um indivíduo no processo integrado ISRM–NSGA-II.

Fonte: Elaborada pelo autor

### 6.3.3 Classificação por Dominância de Pareto

Concluída a avaliação de cada indivíduo da população, o algoritmo NSGA-II realiza a classificação com base em uma relação de dominância de Pareto.

Considere duas soluções candidatas *a* e *b*, avaliadas segundo o vetor de funções objetivo definido em (146):

$$F_{(x)} = \left[DEC_{(x)}, CIC_{(x)}, CAPEX_{(x)}\right] \tag{146}$$

Quando ambas as soluções são financeiramente viáveis, aplica-se a dominância de Pareto convencional. A solução *a* domina *b* quando não apresenta valor superior em nenhum dos objetivos e apresenta valor estritamente inferior em pelo menos um deles, conforme (147) e (148):

$$f_k(x_a) \leq f_k(\boldsymbol{x}_b),\ \forall k \in \{1,2,3\} \tag{147}$$

e

$$\exists\ k \in \{1,2,3\} :\ f_k(x_a) < f_k(x_b) \tag{148}$$

Na implementação desenvolvida, essa relação é precedida pela verificação da restrição orçamentária. Uma solução viável tem preferência sobre uma solução inviável. Quando ambas são inviáveis, é favorecida aquela com menor violação do orçamento; quando ambas são viáveis, aplica-se a dominância de Pareto definida anteriormente. Soluções inviáveis com a mesma violação não dominam uma à outra segundo esse critério.

Com base nessa relação, a população é organizada em frentes sucessivas de Pareto. A primeira frente reúne as soluções não dominadas da população, e as frentes seguintes agrupam progressivamente as demais soluções. O rank associado a essas frentes é utilizado nas etapas posteriores de seleção do NSGA-II.

Após a classificação por dominância, calcula-se a distância de aglomeração (*crowding distance*) para diferenciar soluções pertencentes à mesma frente. Essa medida favorece a preservação de indivíduos localizados em regiões menos densamente ocupadas do espaço de objetivos.

Para cada função objetivo, os indivíduos da frente são ordenados em ordem crescente. As soluções localizadas nas extremidades recebem distância infinita e, para as demais, a contribuição de cada objetivo é determinada pela distância normalizada entre os vizinhos imediatamente anterior e posterior. A distância de aglomeração, conforme definida por Deb et al. (2002), é dada por (149):

$$CD_i = \sum_{k=1}^{M} \frac{f_k(i+1) - f_k(i-1)}{f_k^{\max} - f_k^{\min}} \tag{149}$$

em que:

$CD_i$ é a distância de aglomeração do indivíduo $i$;

$M$ é o número de funções objetivo;

$f_k(i+1)$ e $f_k(i-1)$ são os valores da função objetivo $k$ associados aos indivíduos vizinhos após a ordenação;

$f_k^{\max}$ e $f_k^{\min}$ correspondem, respectivamente, aos valores máximo e mínimo dessa função na frente considerada.

Na implementação, o cálculo é realizado separadamente para cada frente e considera os objetivos ativos DEC, CIC e CAPEX. Quando todos os indivíduos apresentam o mesmo valor para determinado objetivo, esse objetivo não acrescenta contribuição à distância. A viabilidade e a violação orçamentária não participam diretamente desse cálculo, pois já foram consideradas na relação de dominância.

A distância de aglomeração é utilizada posteriormente como critério de desempate entre indivíduos de mesmo rank, tanto na seleção dos genitores quanto na seleção ambiental.

### 6.3.4 Seleção dos Indivíduos

Após a classificação da população em frentes de Pareto e o cálculo da distância de aglomeração, os indivíduos que atuarão como genitores são selecionados por torneio binário.

Em cada torneio, dois indivíduos são sorteados aleatoriamente e comparados de forma hierárquica. Inicialmente, seleciona-se aquele com menor rank, correspondente à melhor frente de Pareto. Caso ambos pertençam à mesma frente, é escolhido o indivíduo com maior distância de aglomeração. Dessa forma, a seleção prioriza simultaneamente a qualidade da solução e a diversidade dentro de uma mesma frente.

O procedimento é repetido até que sejam obtidos os genitores necessários à formação da população descendente $Q_t$. Os indivíduos selecionados nessa etapa não são incorporados diretamente à geração seguinte, porém eles participam do processo de cruzamento.

### 6.3.5 Operador de Cruzamento (Crossover)

Após a seleção dos genitores, aplica-se o operador de cruzamento para produzir novas combinações das decisões de automação representadas pelos cromossomos. Na implementação desenvolvida, foi adotado o cruzamento de um ponto.

Para cada par de genitores, seleciona-se aleatoriamente uma posição interna do cromossomo. Os descendentes são formados pela combinação do segmento inicial de um genitor com o segmento final do outro, conforme ilustrado na Figura 21. Essa operação preserva segmentos contíguos dos cromossomos parentais, sem pressupor correspondência direta entre esses segmentos e regiões eletricamente adjacentes da rede.

O cruzamento é aplicado com probabilidade $p_c = 0{,}9$. Quando o cruzamento não ocorre, os dois cromossomos parentais são copiados diretamente para a população descendente antes da etapa de mutação. Quando ocorre, o ponto de corte é escolhido aleatoriamente entre as posições internas do cromossomo.

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Pai 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| Pai 2 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| | | | | | | | | |
| Filho 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| Filho 2 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |

Figura 21 - Cruzamento de um ponto entre dois indivíduos

Fonte: Elaborada pelo autor

Os descendentes resultantes compõem a população $Q_t$ e são posteriormente submetidos ao operador de mutação.

### 6.3.6 Operador de Mutação

Após o cruzamento, cada indivíduo descendente é submetido ao operador de mutação, responsável por introduzir alterações aleatórias no cromossomo e contribuir para a exploração de novas regiões do espaço de soluções.

Como a representação adotada é binária, emprega-se a mutação bit-flip. Cada gene é avaliado independentemente e, quando selecionado para mutação, tem seu estado invertido: um gene 0 passa a 1 e um gene 1 passa a 0. Assim, a mutação pode, respectivamente, introduzir ou remover uma intervenção de automação da configuração candidata.

A taxa de mutação é dada por (150):

$$p_m = \frac{1}{n} \tag{150}$$

em que $n$ corresponde ao número de genes do cromossomo. Com essa definição, o número esperado de genes modificados por indivíduo é igual a um, embora uma realização específica possa resultar em nenhuma, uma ou várias alterações.

Na implementação, a mutação é aplicada aos dois descendentes após o cruzamento ou, quando este não ocorre, às cópias dos cromossomos parentais. Os indivíduos resultantes passam a compor a população descendente $Q_t$, que é posteriormente avaliada antes da seleção ambiental.

Por exemplo, a Figura 22 apresenta um exemplo conceitual da operação de mutação *bit-flip*, em que a posição indicada foi selecionada aleatoriamente para mutação.

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Antes | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| Depois | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |

Figura 22 - Exemplo de mutação bit-flip em um cromossomo binário.
Fonte: Elaborada pelo autor

### 6.3.7 Formação da Nova População – Seleção Ambiental e Elitismo

Após a geração e avaliação da população descendente $Q_t$, o NSGA-II realiza a seleção ambiental responsável pela formação da população da geração seguinte. Inicialmente, a população corrente $P_t$ e a população descendente $Q_t$, ambas com $N$ indivíduos, são reunidas em uma população combinada $R_t$, definida por (151):

$$R_t = P_t \cup Q_t \tag{151}$$

A população combinada, composta por $2N$ indivíduos, é novamente classificada segundo a relação de dominância com restrição orçamentária. A distância de aglomeração é então calculada para os indivíduos de cada frente de Pareto.

As frentes são incorporadas sucessivamente à nova população $P_{t+1}$, da melhor para a pior classificação, até atingir o tamanho $N$. Quando a última frente a ser considerada não pode ser incluída integralmente, seus indivíduos são ordenados em ordem decrescente de distância de aglomeração e apenas aqueles necessários para completar a população são selecionados.

Esse procedimento constitui o mecanismo de elitismo empregado pelo NSGA-II, pois indivíduos da população corrente e da população descendente competem conjuntamente pela permanência na geração seguinte. Assim, soluções de melhor classificação obtidas anteriormente podem ser preservadas sem a inserção explícita de um indivíduo previamente definido como o melhor.

A população selecionada passa a constituir $P_{t+1}$ e é utilizada como população corrente na iteração seguinte. A Figura 23 apresenta, de forma esquemática, o processo de seleção ambiental empregado.

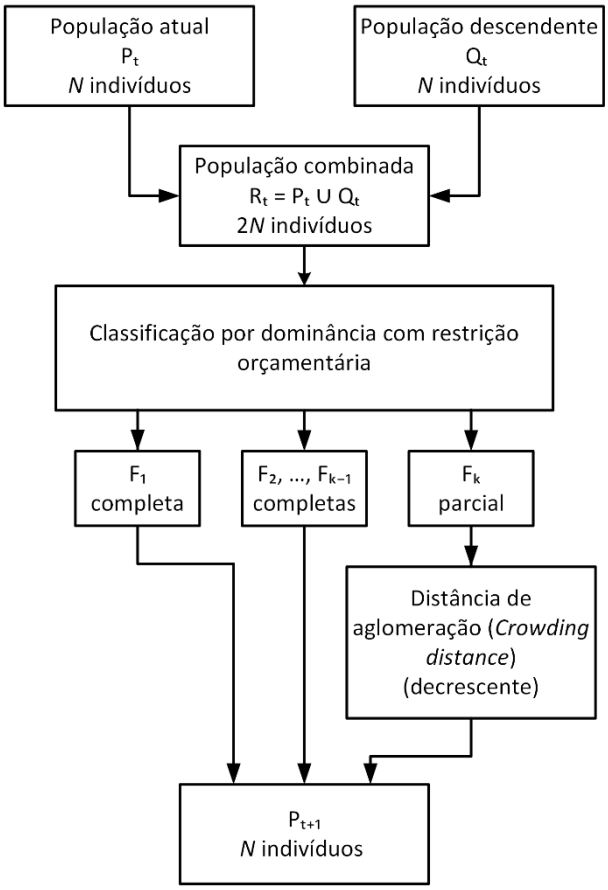



Figura 23 - Formação de $P_{t+1}$ a partir da população combinada $R_t = P_t \cup Q_t$

Fonte: Elaborada pelo autor

Após a formação da nova população, são atualizadas as métricas utilizadas para acompanhar a evolução do processo e verificar o critério de parada (ou convergência).

### 6.3.8 Critério Adaptativo de Convergência

Além do número máximo de gerações, a implementação utiliza um critério adaptativo de parada baseado na evolução da frente de Pareto global acumulada. O objetivo é interromper o processo evolutivo quando não forem observadas alterações relevantes tanto no hipervolume quanto nos melhores valores das funções objetivo ativas.

A estabilidade do hipervolume é avaliada pela média das variações percentuais absolutas observadas em uma janela móvel de gerações. Paralelamente, monitora-se o menor valor obtido para cada objetivo ativo na frente global. Uma melhoria somente é considerada relevante

quando supera a tolerância relativa estabelecida, evitando que pequenas oscilações numéricas prolonguem desnecessariamente a execução.

A parada antecipada ocorre somente quando, simultaneamente, é atingido o número mínimo de gerações, a janela de avaliação do hipervolume está completa, o hipervolume permanece estável e todos os objetivos ativos permanecem sem melhoria relevante durante o número de gerações estabelecido. Caso essas condições não sejam satisfeitas, o processo prossegue até nova verificação ou até o número máximo de gerações.

## 6.4 SÍNTESE DO PROCEDIMENTO DE OTIMIZAÇÃO

A metodologia de otimização integra o NSGA-II à ISRM para identificar configurações de automação que representem diferentes compromissos entre DEC, CIC e CAPEX. Cada solução é codificada por um cromossomo binário associado às posições candidatas da rede.

Durante o processo evolutivo, as configurações candidatas são avaliadas pela ISRM, que fornece os valores de DEC e CIC. O CAPEX para cada estrutura cromossômica. A viabilidade em relação ao orçamento é incorporada à relação de dominância utilizada pelo algoritmo.

A partir dessas avaliações, o NSGA-II obtém-se um conjunto de soluções não dominadas que representa diferentes alternativas de planejamento da automação. A escolha de uma configuração específica permanece associada às prioridades do planejador quanto à continuidade do fornecimento, aos impactos econômicos das interrupções e ao investimento disponível. A Figura 24 apresenta o fluxo geral do processo integrado ISRM–NSGA-II.

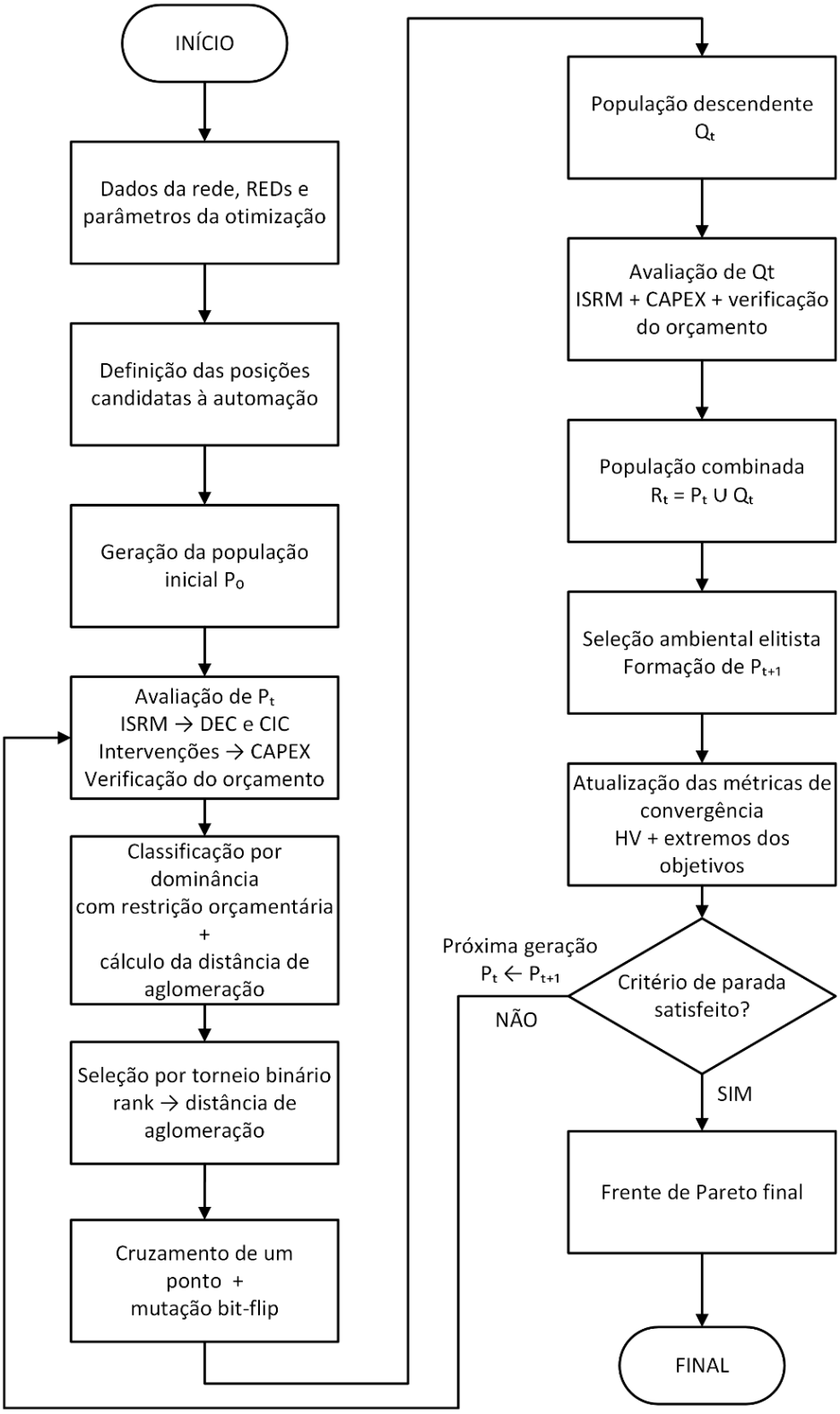



Figura 24 - Fluxo geral do processo de otimização integrado ISRM–NSGA-II.

Fonte: Elaborada pelo autor

# 7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo reúne duas etapas complementares da pesquisa. A primeira avalia o desempenho operacional e a escalabilidade da Metodologia Integrada de Restauração Inteligente (ISRM), incluindo a formação de superblocos, a restauração por alimentadores de reserva e a operação de recursos energéticos distribuídos em microrredes. A segunda examina os resultados do NSGA-II integrado à ISRM para o planejamento multiobjetivo da automação das redes de 69 e 135 barras. Essa organização permite demonstrar, inicialmente, a capacidade da ISRM como modelo de avaliação e, em seguida, sua utilização repetida como função avaliadora das configurações candidatas geradas pelo processo evolutivo.

Os resultados da validação operacional foram obtidos antes da consolidação da denominação ISRM e deram origem ao artigo científico desenvolvido no âmbito desta pesquisa. Nesta tese, eles são incorporados à arquitetura metodológica final sem alteração dos experimentos: o procedimento de restauração anteriormente apresentado de forma descritiva corresponde ao framework posteriormente denominado ISRM. A integração evita a simples justaposição dos resultados do artigo e evidencia a continuidade entre a validação operacional, a análise de redes de grande porte e a otimização da alocação de chaves automatizadas.

Nas tabelas provenientes do artigo, os indicadores originalmente apresentados como SAIFI, SAIDI e ENS são expressos, respectivamente, pelas denominações adotadas nesta tese: frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora (FEC), duração equivalente de interrupção por unidade consumidora (DEC) e energia não distribuída (END). O custo de interrupção ao consumidor permanece representado por CIC.

## 7.1 ORGANIZAÇÃO E CONFIGURAÇÃO DOS ESTUDOS

### 7.1.1 Etapas de avaliação

A avaliação foi estruturada em duas etapas com finalidades distintas. Na validação operacional, a ISRM foi aplicada diretamente a cenários predeterminados de automação, disponibilidade de alimentadores de reserva e penetração de RED. Nessa etapa, o objetivo foi verificar a capacidade de representar redes de diferentes dimensões, executar a sequência restauradora e quantificar seus efeitos sobre FEC, DEC, END e CIC. Na otimização, a ISRM passou a avaliar cada cromossomo gerado pelo NSGA-II, fornecendo DEC e CIC para a comparação das alternativas de automação, enquanto o modelo econômico forneceu o CAPEX.

Os valores absolutos das duas etapas não devem ser interpretados como repetições do mesmo experimento. A validação operacional compara cenários de restauração e médias de diferentes topologias de instalação de RED; a otimização mantém as condições definidas para cada estudo de caso e altera as posições automatizadas segundo o cromossomo. Portanto, a primeira etapa sustenta a validade e a escalabilidade do avaliador, enquanto a segunda investiga as decisões de planejamento produzidas por sua integração ao NSGA-II.

### 7.1.2 Configuração da validação operacional da ISRM

A validação operacional utilizou o sistema IEEE de 69 barras e um sistema brasileiro de grande porte com 1.946 barras. A Tabela 3 apresenta as características utilizadas nos experimentos. O sistema de 69 barras permite acompanhar detalhadamente os efeitos das decisões de restauração, enquanto o sistema de 1.946 barras avalia a capacidade da ISRM de processar uma rede com centenas de blocos de carga, dispositivos de proteção e chaves de manobra.

Tabela 3 - Características dos sistemas empregados na validação operacional da ISRM.

| Característica | 69 barras | 1.946 barras |
|---|---|---|
| Tensão nominal | 12,66 kV | 13,8 kV |
| Demanda ativa e reativa | 1.260 kW e 894 kvar | 2.416 kW e 1.221 kvar |
| Consumidores | 1.275 | 4.704 |
| Classes de consumidores | 1.088 res.; 44 com.; 143 ind. | 4.351 res.; 330 com.; 23 ind. |
| Blocos de carga iniciais | 22 | 355 |
| Dispositivos de manobra e proteção | 8 fusíveis; 12 chaves NF e 4 NA; 1 religador | 210 fusíveis; 136 NF; 36 NA; 4 religadores |
| Alimentadores de reserva | 4 | 4 |
| Topologias de RED simuladas | 100 para 30% e 100 para 50% | 1.000 para 30% |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para isolar os efeitos da automação e da redundância operacional, foram definidos os três cenários apresentados na Tabela 4. O Cenário 1 representa a condição de referência, com manobras manuais e sem transferência por alimentadores de reserva. O Cenário 2 acrescenta chaves automáticas, mas mantém indisponível a reserva dos alimentadores vizinhos. O Cenário 3 combina automação com a transferência de carga pelos alimentadores de reserva.

Tabela 4 - Cenários empregados na validação operacional da ISRM.

| Cenário | Dispositivos de manobra | Alimentadores de reserva | Finalidade |
|---|---|---|---|
| 1 | Somente operação manual | Indisponíveis | Condição de referência |
| 2 | Operação manual e automática | Indisponíveis | Isolar o efeito da automação |
| 3 | Operação manual e automática | Disponíveis | Avaliar automação e redundância operacional |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na análise dos REDs, foram considerados os níveis de 30% e 50% da demanda total para a rede de 69 barras e 30% para a rede de 1.946 barras. Para cada topologia de instalação, os REDs foram simulados no modo seguidor de rede, contribuindo apenas para a restauração convencional, e no modo formador de rede, permitindo também a constituição de microrredes intencionais. Essa comparação separa o benefício obtido pela disponibilidade energética dos REDs do ganho adicional decorrente da operação ilhada.

### 7.1.3 Configuração da otimização multiobjetivo

A otimização foi aplicada aos sistemas de 69 e 135 barras, considerando, em ambos, 30% e 50% de penetração de RED e as sementes pseudoaleatórias 365 e 548. A Tabela 9, apresentada após os resultados de validação da ISRM, sintetiza a população, o limite máximo de gerações e o orçamento de cada uma das oito execuções.

Nas tabelas de convergência, $Gmax$ representa o limite máximo de gerações permitido para a execução; $Gexec$ é o número de gerações efetivamente executadas; e $Gevit$ corresponde às gerações evitadas pelo critério adaptativo, calculadas por $Gevit = Gmax - Gexe$c. Em todas as execuções, a probabilidade de cruzamento foi 0,90 e a mutação bit-flip foi aplicada com taxa igual ao inverso do número de genes.

O hipervolume (HV) é o volume da região do espaço dos objetivos dominada pela frente aproximada e limitada por um ponto de referência. Como DEC, CIC e CAPEX são minimizados, o crescimento e a posterior estabilização do HV indicam, respectivamente, avanço e estabilização conjunta da frente. O HV interno é usado no critério de parada; para comparar sementes de um mesmo caso, ele é recalculado com limites de normalização comuns. Valores absolutos obtidos com normalizações diferentes não são diretamente comparáveis.

A coincidência das decisões entre sementes é avaliada pelo índice de Jaccard, definido por, $J(A,B) = |A \cap B|/|A \cup B|$, em que $A$ e $B$ são os conjuntos de configurações não dominadas de cada execução. O valor 1 indica conjuntos idênticos e o valor 0 indica ausência

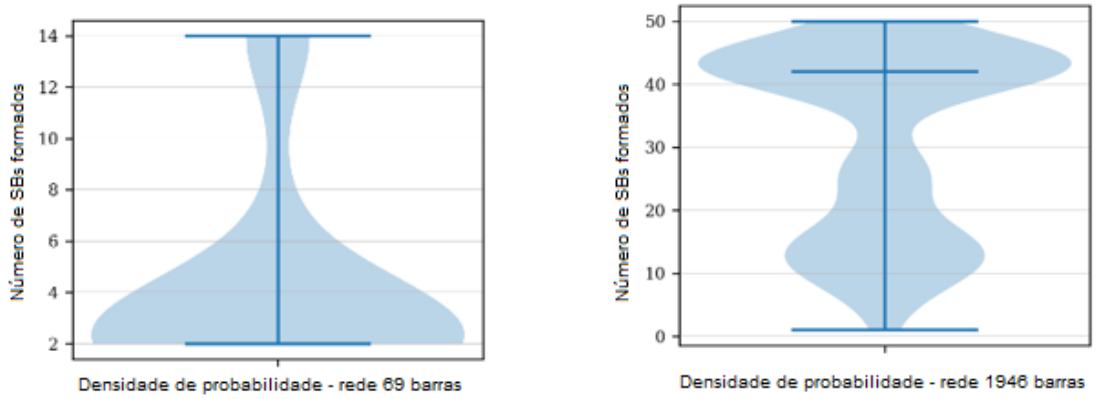
de configurações em comum. Esse índice examina a repetibilidade no espaço das decisões e complementa o HV, que avalia a qualidade no espaço dos objetivos.

A solução de compromisso é a configuração não dominada com menor distância euclidiana ao ponto ideal após a normalização min–máx de DEC, CIC e CAPEX, com pesos iguais. Ela não representa média das soluções nem uma única alternativa ótima; constitui uma referência equilibrada para discutir simultaneamente continuidade, impacto econômico das interrupções e investimento.

## 7.2 VALIDAÇÃO OPERACIONAL E ESCALABILIDADE DA ISRM

### 7.2.1 Formação de superblocos e desempenho computacional

A ISRM inicia a análise de cada contingência reorganizando os blocos de carga em superblocos de restauração, definidos segundo a localização da falta e os dispositivos disponíveis para manobra. Esse procedimento substitui a representação completa da rede por um modelo equivalente específico para o evento. A Figura 25 apresenta as distribuições do número de superblocos formados nos dois sistemas de validação.




(a) 69 barras (b) 1.946 barras

Figura 25 - Distribuição estatística do número de superblocos de restauração: (a) sistema de 69 barras; (b) sistema de 1.946 barras

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na rede de 69 barras, o número de superblocos variou de 2 a 14, com mediana próxima de 2 e forte concentração nos menores valores. Como a configuração inicial possui 22 blocos de carga, a mediana representa redução aproximada de 91% no número de elementos processados. Na rede de 1.946 barras, o número de superblocos variou de 1 a 50, com mediana próxima de 42. Em relação aos 355 blocos iniciais, a redução mediana foi de aproximadamente 88%.

A redução dimensional foi acompanhada por tempos de processamento compatíveis com aplicações de apoio à operação. No sistema de 69 barras, os tempos mediano e máximo da restauração foram de aproximadamente 20 ms e 31 ms. No sistema de 1.946 barras, a mediana foi de 0,73 s, a maior parte dos casos permaneceu abaixo de 0,8 s e os valores extremos alcançaram cerca de 1,35 s. Esses resultados demonstram que a agregação em superblocos limita o crescimento do problema efetivamente processado e sustenta a aplicação da ISRM em redes de grande porte.

### 7.2.2 Efeito da automação e dos alimentadores de reserva

Os indicadores anuais obtidos nos três cenários são apresentados na Tabela 5. A comparação entre os Cenários 1 e 2 isola o efeito de automatizar dispositivos sem acrescentar caminhos de transferência; a comparação entre os Cenários 1 e 3 inclui também a reserva dos alimentadores vizinhos.

Tabela 5 – Indicadores anuais dos três cenários de restauração.

| Sistema | Cenário | FEC | DEC (h) | END (MWh) | CIC (×10³ USD) |
|---|---|---|---|---|---|
| 69 barras | 1 | 5,67 | 26,45 | 29,92 | 170,18 |
| 69 barras | 2 | 5,62 | 26,43 | 29,87 | 169,92 |
| 69 barras | 3 | 5,29 | 23,04 | 24,42 | 139,99 |
| 1.946 barras | 1 | 9,84 | 15,94 | 16,09 | 119,88 |
| 1.946 barras | 2 | 3,79 | 10,70 | 11,85 | 88,41 |
| 1.946 barras | 3 | 3,40 | 6,35 | 8,69 | 64,88 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na rede de 69 barras, a passagem do Cenário 1 para o Cenário 2 produziu reduções inferiores a 1% em todos os indicadores. O resultado mostra que a automação, quando aplicada em posições que não ampliam significativamente as alternativas de transferência, pode reduzir os tempos de manobra sem alterar substancialmente os indicadores anuais. Na rede de 1.946 barras, por outro lado, o Cenário 2 reduziu aproximadamente 61% do FEC, 33% do DEC e 26% da END e do CIC, refletindo a maior quantidade de dispositivos e a diversidade topológica do sistema.

O Cenário 3 apresentou os maiores benefícios. Na rede de 69 barras, as reduções em relação ao Cenário 1 foram de aproximadamente 6,7% no FEC, 12,9% no DEC, 18,4% na END e 17,7% no CIC. Na rede de 1.946 barras, as reduções alcançaram aproximadamente 65% no FEC, 60% no DEC e 46% na END e no CIC. A diferença entre os sistemas confirma que os benefícios da automação dependem de sua coordenação com caminhos alternativos de

suprimento: a rede maior oferece mais possibilidades de isolamento seletivo e transferência de carga.

### 7.2.3 Contribuição dos REDs e das microrredes

As Tabelas Tabela 6 e Tabela 7 apresentam as médias anuais das 100 topologias simuladas em cada nível de penetração na rede de 69 barras, respectivamente com e sem alimentadores de reserva. Os resultados incluem a operação das microrredes formadoras de rede quando a topologia e as condições horárias permitem sua formação.

Tabela 6 - Médias dos indicadores anuais na rede de 69 barras com alimentadores de reserva disponíveis.

| RED | FEC | DEC (h) | END (MWh) | CIC (×10³ USD) |
|---|---|---|---|---|
| 0% | 5,29 | 23,04 | 24,42 | 139,99 |
| 30% | 2,97 | 12,08 | 11,70 | 67,68 |
| 50% | 2,89 | 11,76 | 11,51 | 66,46 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Com os alimentadores de reserva disponíveis, o aumento de 30% para 50% de RED reduziu as médias de FEC, DEC, END e CIC em 2,88%, 2,61%, 1,64% e 1,80%, respectivamente. O efeito incremental da maior penetração foi, portanto, moderado. Houve formação de ao menos uma microrrede em 38 das 100 topologias de 30% e em 53 das 100 topologias de 50%, indicando que a contribuição das ilhas depende da combinação entre localização dos recursos, horário da falta e possibilidade de transferência convencional.

A Tabela 7 apresenta o mesmo conjunto de indicadores sem a disponibilidade de alimentadores de reserva. Essa comparação permite observar como os resultados operacionais mudam quando a transferência de carga por alimentadores vizinhos não está disponível.

Tabela 7 - Impacto anual dos REDs formadores de rede no sistema de 69 barras sem alimentadores de reserva.

| RED | FEC | DEC (h) | END (MWh) | CIC (×10³ USD) |
|---|---|---|---|---|
| 0% | 5,29 | 23,04 | 24,42 | 139,99 |
| 30% | 3,76 | 17,21 | 15,22 | 88,29 |
| 50% | 3,70 | 16,66 | 15,00 | 86,83 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Sem alimentadores de reserva, as médias foram superiores às obtidas com reserva nos dois níveis de RED. Em 30%, as médias de FEC, DEC, END e CIC foram 3,76, 17,21 h, 15,22 MWh e 88,29 ×10³ USD; em 50%, foram 3,70, 16,66 h, 15,00 MWh e 86,83 ×10³ USD. Entre 30% e 50%, as reduções adicionais ficaram entre 1,44% e 3,15%. Houve registro de microrrede

em 73 das 100 topologias de 30% e em 85 das 100 de 50%, frequência maior que nos casos com reserva disponível.

Para a rede de 1.946 barras, a análise considerou 30% de RED, alimentadores de reserva disponíveis e 1.000 topologias. A Tabela 8 apresenta as médias dos indicadores anuais do conjunto simulado. Ao menos uma microrrede foi registrada em 920 das 1.000 topologias.

Tabela 8 - Médias dos indicadores anuais na rede de 1.946 barras com 30% de RED e alimentadores de reserva disponíveis.

| RED | Modo | FEC | DEC (h) | END (MWh) | CIC (×10³ USD) |
|---|---|---|---|---|---|
| 0% | Sem RED | 3,40 | 6,35 | 8,69 | 64,88 |
| 30% | Com RED | 2,16 | 4,49 | 7,53 | 54,67 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na rede de 1.946 barras, as médias do conjunto foram FEC de 2,16, DEC de 4,49 h, END de 7,53 MWh e CIC de 54,67 ×10³ USD. A elevada frequência de topologias com registro de microrrede confirma que esse recurso participa da restauração em diferentes contingências da rede extensa. Como não há neste conjunto um cenário pareado sem microrredes, os indicadores são apresentados como resultados do cenário simulado, sem atribuir isoladamente às microrredes toda a diferença observada em relação a outros cenários.

A Figura 26 e a Figura 27 apresentam, por horário de início da interrupção, o percentual médio de consumidores atendidos por microrredes nas contingências em que houve registro de atuação. Para a rede de 69 barras, cada curva compara os resultados com e sem alimentadores de reserva.

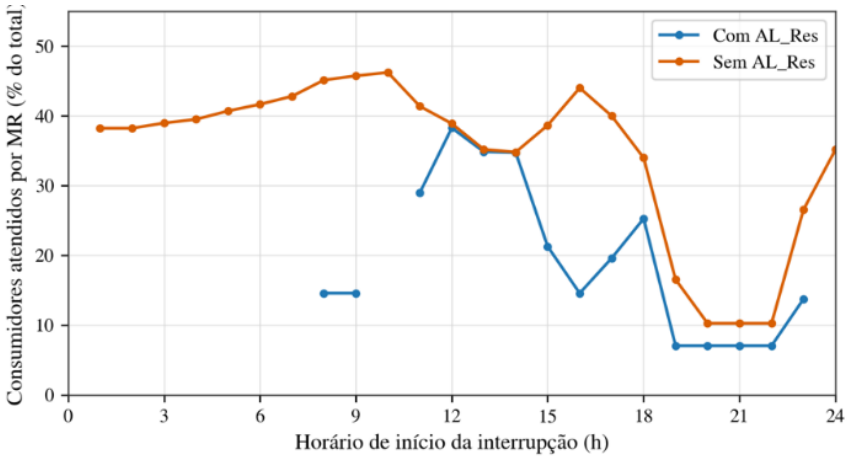



Figura 26 - Percentual médio de consumidores atendidos por microrredes, por horário de início da interrupção, na rede de 69 barras com 30% de RED.

Fonte: Elaborada pelo autor.

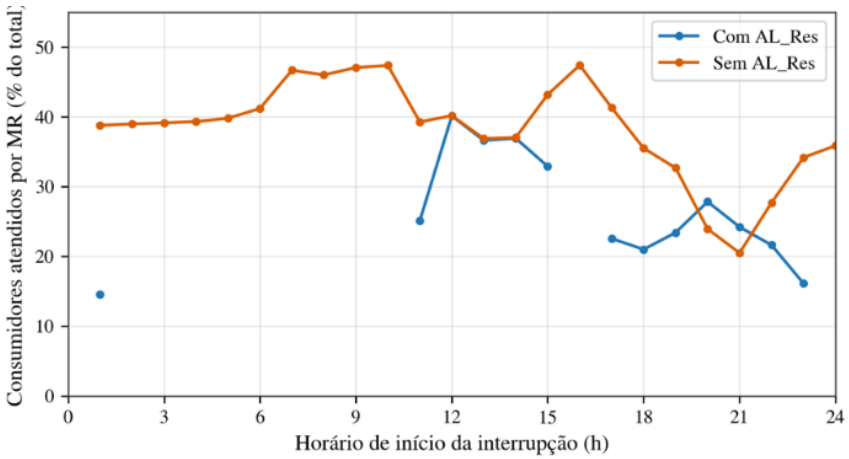



Figura 27 - Percentual médio de consumidores atendidos por microrredes, por horário de início da interrupção, na rede de 69 barras com 50% de RED.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Sem alimentadores de reserva, os maiores percentuais médios condicionais ocorreram entre 7 h e 10 h, alcançando 46,21% para 30% de RED e 47,35% para 50%. Entre 20 h e 22 h, as médias diminuíram para cerca de 10,27% no cenário de 30%; no cenário de 50%, permaneceram entre 20,50% e 27,69%. Com reserva disponível, os percentuais por contingência com atuação de microrrede atingiram máximos de 38,26% em 30% de RED e 40,11% em 50%, ambos às 12 h. Esses perfis evidenciam que a resposta varia com o horário e com a disponibilidade de transferência convencional.

A Figura 28 apresenta o perfil horário para a rede de 1.946 barras, com 30% de RED e alimentadores de reserva disponíveis. As médias condicionais variaram ao longo do dia e atingiram o máximo de 7,53% às 13 h; a distribuição horária dos eventos com microrrede também é indicada pela presença ou ausência de pontos na curva.

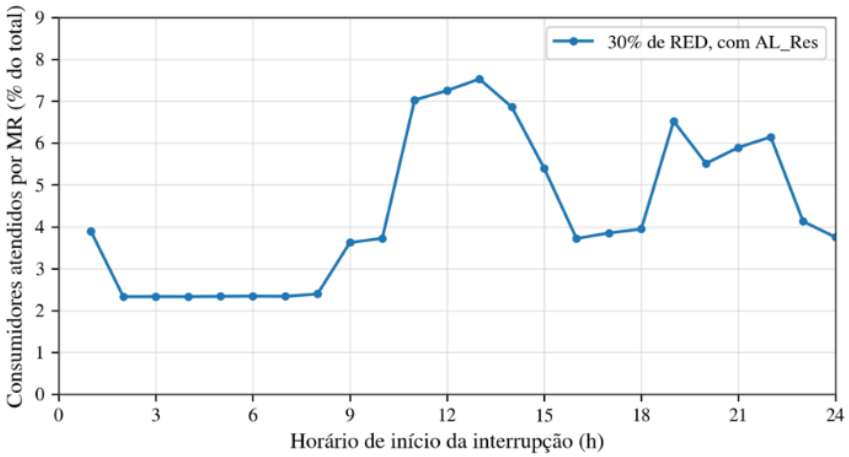



Figura 28 - Consumidores restaurados por microrredes no sistema de 1.946 barras em função do horário de início da interrupção, com 30% de RED.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Em conjunto, as simulações mostram que o efeito das microrredes não é uniforme ao longo do dia. Na rede de 69 barras, a atuação registrada foi mais frequente sem alimentadores de reserva, enquanto os percentuais por contingência variaram com a penetração e com o horário. Na rede de 1.946 barras, houve registro de microrrede em 92% das topologias simuladas. A ISRM permite observar essa dependência temporal e topológica sem reduzir o desempenho das microrredes a um único valor constante.

### 7.2.4 Relação entre a validação da ISRM e a otimização

Na rede de 69 barras, a disponibilidade dos alimentadores de reserva esteve associada a reduções médias de aproximadamente 21% a 22% no FEC, 29% a 30% no DEC, 23% na END e 23% no CIC, em relação aos conjuntos sem reserva, para os dois níveis de RED. Já elevar a penetração de 30% para 50% reduziu os indicadores em cerca de 1% a 3%. Esses resultados reforçam que o acesso a caminhos de transferência pode ter efeito maior que o aumento da penetração, enquanto a atuação das microrredes permanece relevante quando as condições operacionais permitem sua formação.

Na rede de 1.946 barras, as 1.000 topologias a 30% de RED produziram médias de FEC 2,16, DEC 4,49 h, END 7,53 MWh e CIC 54,67 $\times 10^3$ USD, com registro de microrrede em 920 topologias. A dimensão reduzida dos superblocos e os tempos de processamento apresentados nas seções anteriores sustentam o uso da ISRM como avaliadora repetitiva no NSGA-II. As seções seguintes discutem os resultados de planejamento para as redes de 69 e 135 barras.

## 7.3 CONFIGURAÇÃO DA OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO

As execuções do NSGA-II para o sistema de 69 barras e o sistema de 135 barras são sintetizadas na Tabela 9 e Tabela 10, respectivamente. Para o sistema de 69 barras foram 100 indivíduos e para o sistema de 135 barras, 150 indivíduos. Em todos os casos, o limite máximo foi fixado em 250 gerações. As sementes 365 e 548 foram repetidas nos níveis de 30% e 50% de RED, permitindo avaliar as duas penetrações sob as mesmas sequências pseudoaleatórias.

Tabela 9 - Configuração das execuções do NSGA-II para o sistema 69 barras.

| Sistema | RED | Semente | População | Gmax | Orçamento (USD) |
|---|---|---|---|---|---|
| 69 barras | 30% | 365 | 100 | 250 | 390.000 |
| 69 barras | 50% | 365 | 100 | 250 | 390.000 |
| 69 barras | 30% | 548 | 100 | 250 | 390.000 |
| 69 barras | 50% | 548 | 100 | 250 | 390.000 |

Tabela 10 - Configuração das execuções do NSGA-II para o sistema 135 barras.

| Sistema | RED | Semente | População | Gmax | Orçamento (USD) |
|---|---|---|---|---|---|
| 135 barras | 30% | 365 | 150 | 250 | 510.000 |
| 135 barras | 50% | 365 | 150 | 250 | 510.000 |
| 135 barras | 30% | 548 | 150 | 250 | 510.000 |
| 135 barras | 50% | 548 | 150 | 250 | 510.000 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

O valor de Gmax constitui um limite de segurança. A execução pode ser encerrada antes desse limite quando satisfaz simultaneamente as condições adaptativas de estabilidade apresentadas na Tabela 11. Os mesmos parâmetros de parada foram empregados nas oito execuções.

Tabela 11 - Parâmetros adotados no critério adaptativo de convergência.

| Parâmetro | Valor | Função |
|---|---|---|
| Geração mínima | 60 | Evitar a interrupção prematura do processo evolutivo |
| Janela do HV | 20 gerações | Avaliar a estabilidade recente do hipervolume |
| Limiar do HV | 0,05% | Definir a variação do hipervolume considerada desprezível |
| Limite sem melhoria | 60 gerações | Exigir estabilidade prolongada dos objetivos |
| Tolerância de melhoria | 0,001% | Desconsiderar pequenas oscilações numéricas |
| Amostras do HV | 30.000 | Estimar o hipervolume pelo método de Monte Carlo |
| Semente aleatória do HV | 12.345 | Garantir a reprodutibilidade do cálculo do hipervolume |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os valores da Tabela 11 são parâmetros de implementação do critério de convergência, e não limites teóricos do NSGA-II. A geração mínima evita decisões baseadas apenas no comportamento inicial; a janela e o limiar do hipervolume verificam a estabilidade recente da frente; e o limite sem melhoria exige que os melhores valores dos objetivos permaneçam estáveis por um intervalo prolongado. O hipervolume online é estimado por Monte Carlo com 30.000 amostras e semente fixa, garantindo a reprodutibilidade do critério de parada dentro de cada execução.

## 7.4 RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO PARA O SISTEMA DE 69 BARRAS

### 7.4.1 Caracterização do sistema e dos cenários

O primeiro estudo de otimização foi realizado no sistema IEEE de 69 barras, operando em 12,66 kV. A demanda instalada totaliza 1.260 kW e 894 kvar, distribuída entre 1.275 consumidores, dos quais 1.088 são residenciais, 44 comerciais e 143 industriais. A rede dispõe de quatro alimentadores de reserva, com capacidade agregada de 1.010 kW e 713 kvar,

utilizados pela ISRM durante as etapas de transferência de carga. Os principais dados do sistema de 69 barras são apresentados nos apêndices B.1 e C.1. O sistema de 69 barras pode ser visto na Figura 41.

Todas as simulações do sistema de 69 barras foram executadas em um notebook equipado com processador Intel Core i5 e 16 GB de memória RAM. Portanto, os tempos de processamento apresentados para esse sistema referem-se a esse ambiente computacional.

Foram consideradas 60 posições candidatas à instalação de novas chaves automatizadas ou à substituição de chaves manuais elegíveis por novas chaves automatizadas. As chaves normalmente abertas de interligação, os dispositivos de proteção e as posições originalmente automatizadas não integraram o cromossomo. O orçamento máximo foi fixado em 390.000 USD e foram avaliados os níveis de 30% e 50% de RED, conforme pode ser visto nos apêndices D.1 e D.2. As características utilizadas na otimização são reunidas na Tabela 12.

Tabela 12 - Principais características do sistema de 69 barras na otimização.

| Característica | Valor |
|---|---|
| Tensão nominal | 12,66 kV |
| Demanda ativa e reativa | 1.260 kW e 894 kvar |
| Consumidores | 1.275: 1.088 residenciais, 44 comerciais e 143 industriais |
| Alimentadores de reserva | 4 |
| Posições candidatas | 60 |
| Penetração de RED | 30% e 50% da demanda de pico |
| Orçamento máximo | 390.000 USD |

Fonte: Elaborada pelo autor.

### 7.4.2 Convergência e consistência entre as execuções

A Tabela 13 apresenta o limite de gerações, a geração efetivamente executada, as gerações evitadas, o tempo de processamento e o hipervolume online final. Com a semente 365, o critério adaptativo encerrou a busca na geração 119, evitando 131 das 250 gerações previstas. Com a semente 548, a parada ocorreu na geração 89, evitando 161 gerações. Os mesmos pontos de parada foram observados nos dois níveis de penetração.

Tabela 13 - Síntese da convergência das execuções para o sistema de 69 barras.

| RED | Semente | Gmax | Gexec | Gevit | Tempo (h) | HV online final |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 30% | 365 | 250 | 119 | 131 | 6,03 | 0,130773 |
| 30% | 548 | 250 | 89 | 161 | 4,64 | 0,131622 |
| 50% | 365 | 250 | 119 | 131 | 7,06 | 0,130773 |
| 50% | 548 | 250 | 89 | 161 | 4,25 | 0,131622 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

As duas sementes recuperaram exatamente as mesmas 39 configurações não dominadas nos cenários de 30% e 50% de RED, resultando em índice de Jaccard igual a 1,000. Os valores finais do hipervolume online foram 0,130773 para a semente 365 e 0,131622 para a semente 548. Como os limites de normalização do hipervolume online são inicializados separadamente em cada execução, esses valores são empregados para acompanhar a convergência de cada corrida e não, isoladamente, para classificar a qualidade relativa das sementes.

A Figura 29 apresenta as trajetórias do hipervolume online para 30% de RED, e a Figura 30 apresenta o cenário de 50%. As curvas coincidem entre as penetrações quando se mantém a mesma semente. A semente 548 satisfez o critério combinado de parada na geração 89, enquanto a semente 365 foi encerrada na geração 119.

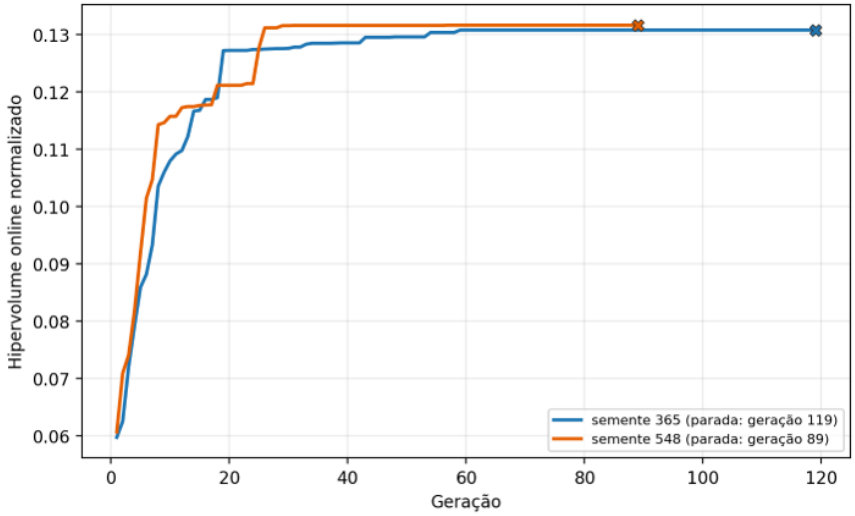



Figura 29 - Evolução do hipervolume online no sistema de 69 barras com 30% de RED.

Fonte: Elaborada pelo autor.

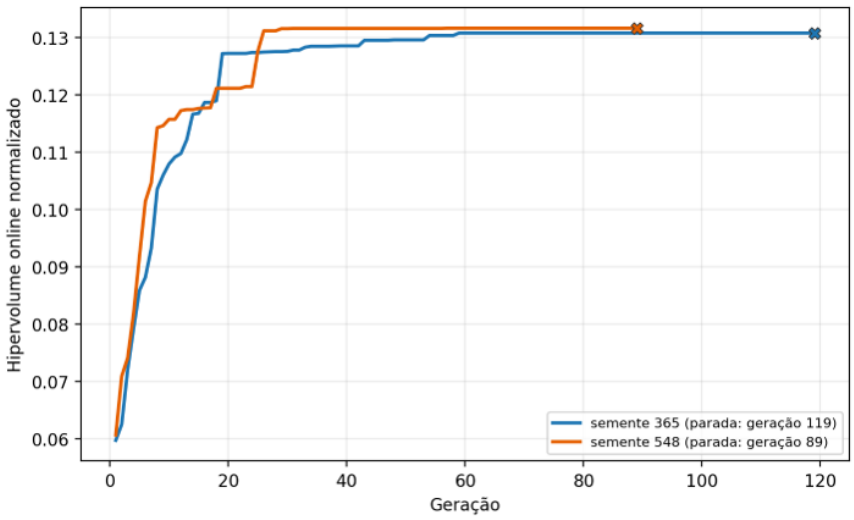



Figura 30 - Evolução do hipervolume online no sistema de 69 barras com 50% de RED.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os tempos de processamento foram de 6,84 h e 7,26 h para a semente 365, respectivamente nos cenários de 30% e 50% de RED. Para a semente 548, foram obtidos 4,59 h e 4,73 h. As diferenças temporais não alteraram o número de gerações, as métricas não temporais dos históricos ou as configurações não dominadas. As taxas finais de reutilização do cache foram de 74,15% para a semente 365 e 73,74% para a semente 548.

### 7.4.3 Frentes de Pareto

A união das duas sementes resultou em 39 configurações não dominadas para cada nível de RED. A Figura 31 apresenta a frente de 30%, e a Figura 32 apresenta a frente de 50%; as duas são numericamente idênticas. Em ambas, DEC e CIC formam os eixos, o CAPEX é indicado pela escala de cores, o quadrado identifica a configuração de menor investimento e a estrela representa a solução de compromisso definida na Seção Configuração da otimização multiobjetivo.

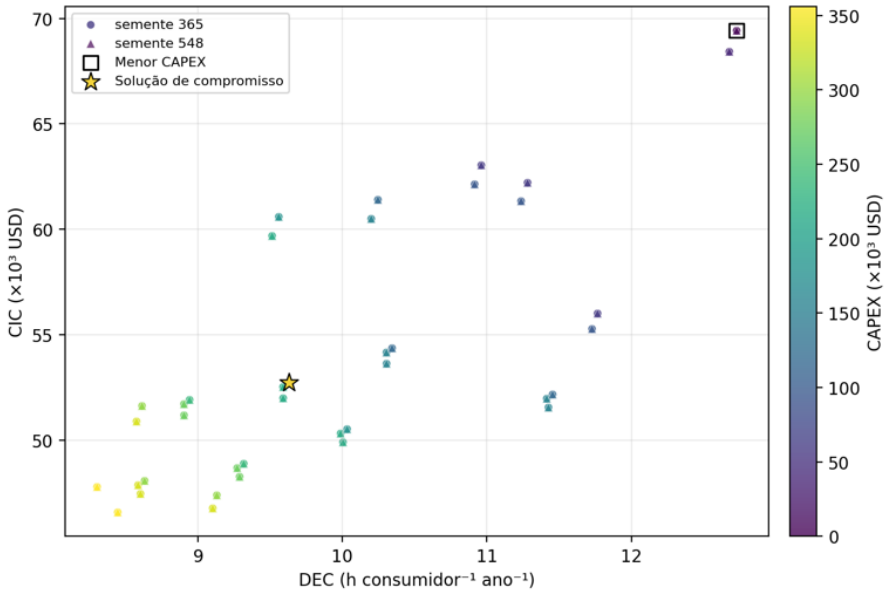



Figura 31 - Frente de Pareto final do sistema de 69 barras com 30% de RED.

Fonte: Elaborada pelo autor.

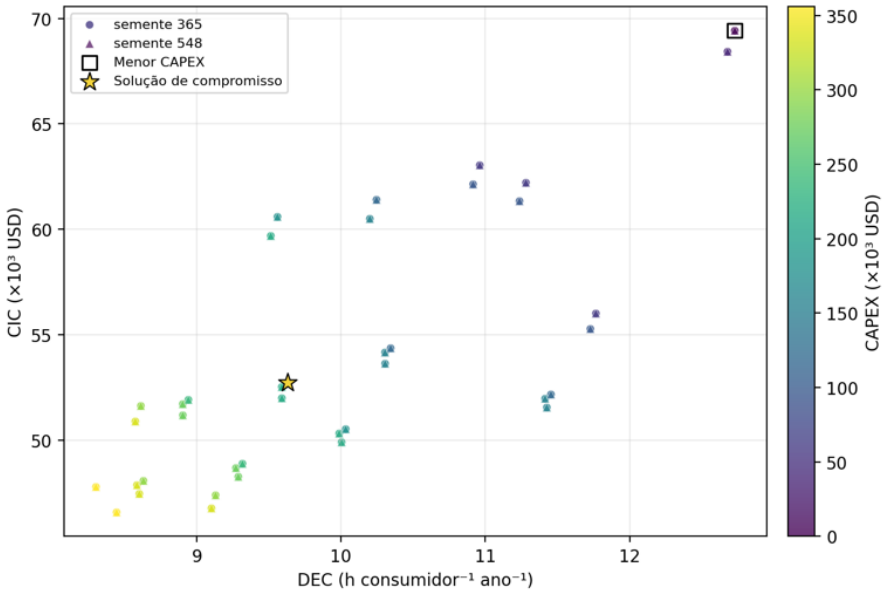



Figura 32 - Frente de Pareto final do sistema de 69 barras com 50% de RED.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A sobreposição dos marcadores das sementes confirma o Jaccard igual a 1,000. A distribuição dos pontos evidencia o conflito entre investimento e desempenho: configurações de baixo CAPEX estão associadas a maiores valores de DEC e CIC, enquanto a redução desses indicadores requer investimentos mais elevados. Soluções com CAPEX semelhante também podem privilegiar objetivos diferentes, justificando a preservação de toda a frente não dominada.

### 7.4.4 Soluções representativas

A Tabela 14 apresenta a configuração-base, a solução de compromisso e os extremos de menor DEC e menor CIC. Os valores são comuns a 30% e 50% de RED. A configuração-base possui DEC de 12,727 h consumidor$^{-1}$ ano$^{-1}$ e CIC de 69,419 ×10³ USD. A solução de compromisso automatiza as linhas L10, L12 e L21, com CAPEX de 177,978 ×10³ USD, equivalente a 45,64% do orçamento.

Tabela 14 - Valores das funções objetivo das soluções representativas do sistema de 69 barras.

| Solução | Linhas automatizadas | DEC | CIC (×10³ USD) | CAPEX (×10³ USD) |
|---|---|---|---|---|
| Base | – | 12,727 | 69,419 | 0,000 |
| Compromisso | L10, L12 e L21 | 9,629 | 52,724 | 177,978 |
| Menor DEC | L10, L11, L12, L16, L21 e L61 | 8,304 | 47,783 | 355,956 |
| Menor CIC | L5, L10, L12, L16, L21 e L61 | 8,447 | 46,577 | 355,956 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

A solução de compromisso reduz simultaneamente DEC e CIC sem consumir todo o orçamento, enquanto os extremos empregam seis novas chaves. A Tabela 15 complementa as funções objetivo com as reduções de FEC e END, indicadores calculados pela ISRM, mas não utilizados diretamente na dominância de Pareto.

Tabela 15 - Reduções percentuais das soluções representativas do sistema de 69 barras.

| Solução | FEC | DEC | END | CIC |
|---|---|---|---|---|
| Compromisso | 23,07% | 24,34% | 24,27% | 24,05% |
| Menor DEC | 29,24% | 34,75% | 31,47% | 31,17% |
| Menor CIC | 30,29% | 33,63% | 33,35% | 32,90% |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme a Tabela 15, a solução de compromisso reduz FEC, DEC, END e CIC entre 23,07% e 24,34%. A solução de menor DEC utiliza seis novas chaves e 91,27% do orçamento, reduzindo o DEC em 34,75%. A solução de menor CIC requer o mesmo CAPEX, mas outra distribuição espacial, e alcança reduções de 33,35% na END e 32,90% no CIC.

As linhas L10, L12 e L21 aparecem na solução de compromisso e nos dois extremos, caracterizando um núcleo recorrente de intervenções. Para passar da solução de compromisso a um dos extremos, o investimento adicional é de 177,978 $\times 10^3$ USD. Os ganhos incrementais são menores que os obtidos pelas três primeiras chaves, evidenciando retornos marginais decrescentes.

### 7.4.5 Influência da penetração de RED

Os níveis de 30% e 50% produziram as mesmas 39 configurações não dominadas, a mesma solução de compromisso e os mesmos extremos. Para cada semente, os campos não temporais dos históricos de convergência também coincidem geração a geração entre as duas penetrações; apenas os tempos de processamento diferem. A equivalência observada abrange, portanto, toda a trajetória registrada do algoritmo e não somente a frente final.

Nos cenários avaliados, o aumento da penetração de RED não modificou os estados de atendimento refletidos por FEC, DEC, END e CIC nem a seleção das posições de automação. Esse resultado é específico do mapa fixo de RED, do conjunto de contingências, das capacidades dos alimentadores de reserva e das posições candidatas adotadas. Assim, para o sistema de 69 barras, a localização das chaves foi mais determinante para a frente eficiente que a mudança de 30% para 50% de RED.

## 7.5 RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO PARA O SISTEMA DE 135 BARRAS

### 7.5.1 Caracterização do sistema e dos cenários

O segundo estudo de otimização foi realizado no sistema de 135 barras, operando em 13,8 kV. A rede possui 100 pontos de carga, demanda total de 6.427,4 kW e 2.737,95 kvar, potência aparente aproximada de 6.986 kVA e extensão de 8,89 km. O atendimento compreende 1.129 consumidores das classes residencial, comercial e industrial. O sistema dispõe de oito alimentadores adjacentes de reserva, cujas capacidades individuais variam de 660 kW e 281 kvar a 1.992 kW e 848 kvar. O sistema de 135 barras é apresentado na Figura 36.

Todas as simulações do sistema de 135 barras foram executadas em computador com Processador Intel Core i9-12900KF de 12ª geração, com 16 núcleos físicos e 24 threads. 64 GB de memória RAM e processamento gráfico NVIDIA GeForce RTX 3080. Portanto, os tempos de processamento apresentados para esse sistema referem-se a esse ambiente computacional.

A configuração inicial inclui oito chaves normalmente fechadas de operação manual e oito chaves de interligação normalmente abertas e automatizadas. Para a otimização foram consideradas 118 posições candidatas, nas quais podem ser instaladas novas chaves automatizadas ou substituídas chaves manuais elegíveis. Os níveis de RED foram 30% e 50%, sob limite orçamentário de 510.000 USD. A Tabela 16 sintetiza essas características.

Tabela 16 - Principais características do sistema de 135 barras na otimização.

| Característica | Valor |
|---|---|
| Tensão nominal | 13,8 kV |
| Demanda ativa e reativa | 6.427,4 kW e 2.737,95 kvar |
| Potência aparente aproximada | 6.986 kVA |
| Pontos de carga | 100 |
| Consumidores | 1.129 |
| Extensão da rede | 8,89 km |
| Alimentadores adjacentes de reserva | 8 |
| Chaves existentes | 8 NF manuais e 8 NA automatizadas |
| Posições candidatas | 118 |
| Penetração de RED | 30% e 50% |
| Orçamento máximo | 510.000 USD |

Fonte: Elaborada pelo autor.

### 7.5.2 Convergência e consistência entre as execuções

As quatro execuções foram encerradas pelo critério adaptativo antes de Gmax = 250. A

Tabela 17 mostra Gexec igual a 214 para a semente 365 e a 162 para a semente 548 nos dois níveis de RED. No cenário de 30%, os tempos foram 19,73 h e 11,24 h; para 50%, foram 21,17 h e 11,71 h. As diferenças de duração dependem das condições de execução e não alteram a coincidência das métricas não temporais.

Tabela 17 - Síntese da convergência das execuções para o sistema de 135 barras.

| RED | Semente | Gmax | Gexec | Gevit | Tempo (h) | HV online final |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 30% | 365 | 250 | 214 | 36 | 19,73 | 0,190043 |
| 30% | 548 | 250 | 162 | 88 | 11,24 | 0,183677 |
| 50% | 365 | 250 | 214 | 36 | 21,17 | 0,190043 |
| 50% | 548 | 250 | 162 | 88 | 11,71 | 0,183677 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na execução com a semente 548, a parada ocorreu na geração 162; com a semente 365, na geração 214. Em ambos os casos, a geração mínima havia sido superada, o hipervolume satisfazia a condição de estabilidade na janela adotada e os melhores valores dos objetivos permaneciam sem melhoria relevante pelo intervalo requerido. Os encerramentos correspondem, portanto, à convergência antecipada segundo a regra estabelecida.

A Figura 33 mostra as trajetórias do hipervolume online para 30% de RED, e a Figura 34 apresenta o caso de 50%. Os valores finais foram 0,190043 para a semente 365 e 0,183677 para a semente 548, repetindo-se nas duas penetrações. Como a normalização é inicializada de forma independente em cada corrida, a comparação das soluções foi realizada pelas configurações e pelos valores dos objetivos das frentes.

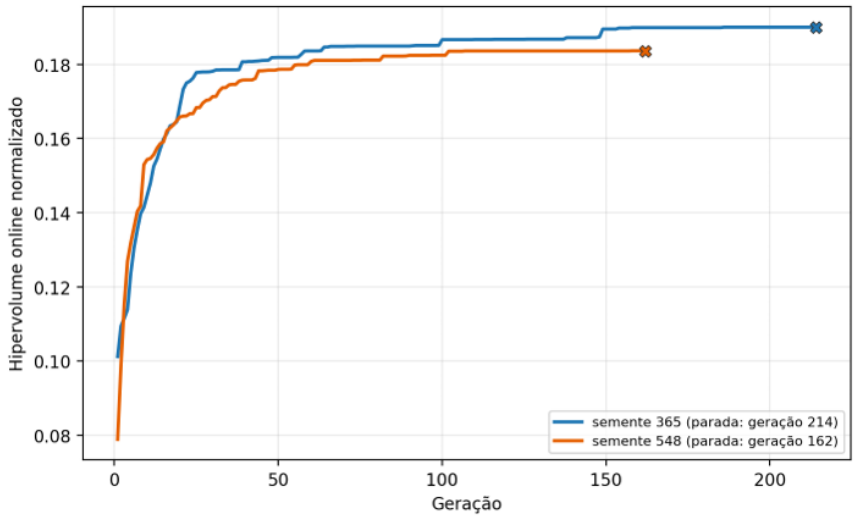



Figura 33 - Evolução do hipervolume online no sistema de 135 barras com 30% de RED.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Cada execução produziu 97 configurações não dominadas com a semente 365 e 93 com a semente 548. Dessas, 75 são comuns, 22 aparecem apenas na semente 365 e 18 apenas na semente 548. O índice de Jaccard entre os conjuntos é 0,652 nos dois níveis de RED, mostrando que a proximidade das trajetórias de convergência não implica identidade completa das decisões discretas.

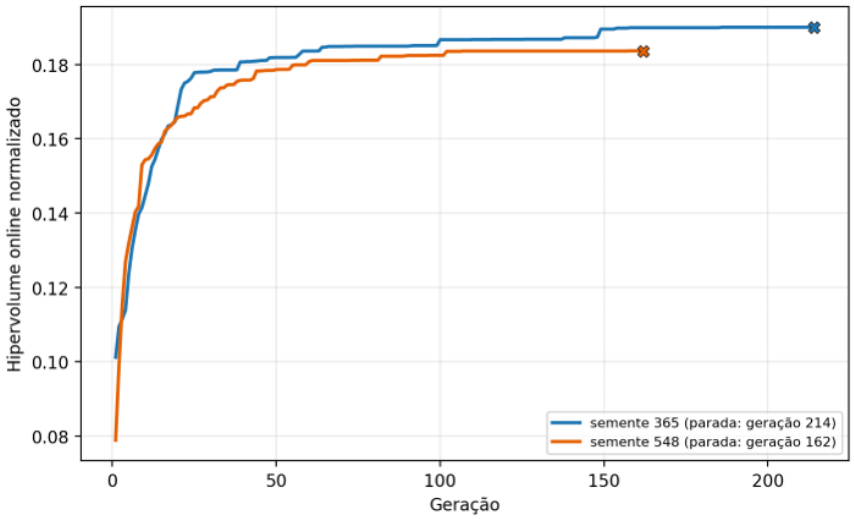



Figura 34 -Evolução do hipervolume online no sistema de 135 barras com 50% de RED.

Fonte: Elaborada pelo autor.

### 7.5.3 Frentes de Pareto

A união direta das sementes contém 115 configurações distintas. Depois de reaplicar a dominância ao conjunto unido, permanecem 102 soluções não dominadas em cada nível de RED. A Figura 35 relaciona DEC e CIC para 30%, e a Figura 36 apresenta a mesma relação para 50%, com o CAPEX representado pela escala de cores. A redução dos indicadores de continuidade e do custo de interrupção exige maior investimento em automação.

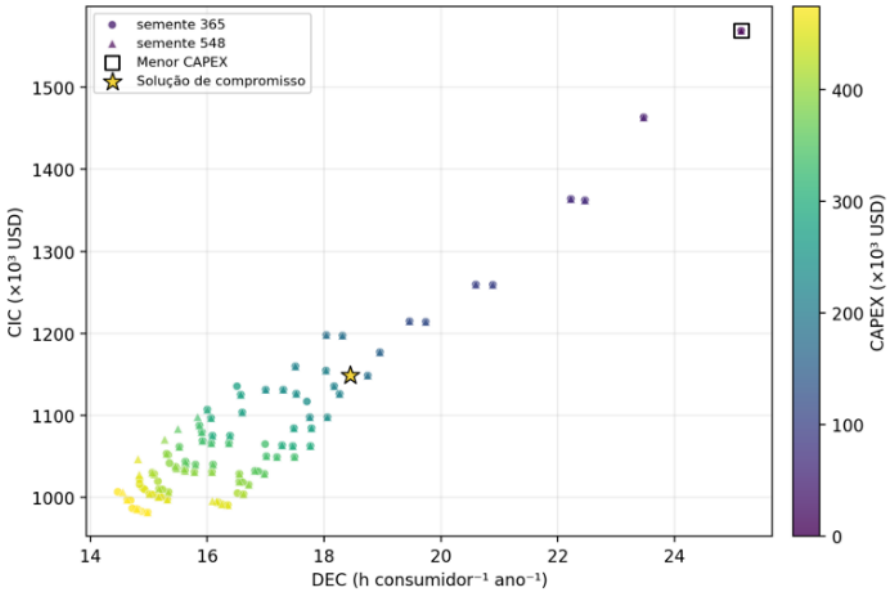



Figura 35 - Frente de Pareto combinada do sistema de 135 barras com 30% de RED.

Fonte: Elaborada pelo autor.

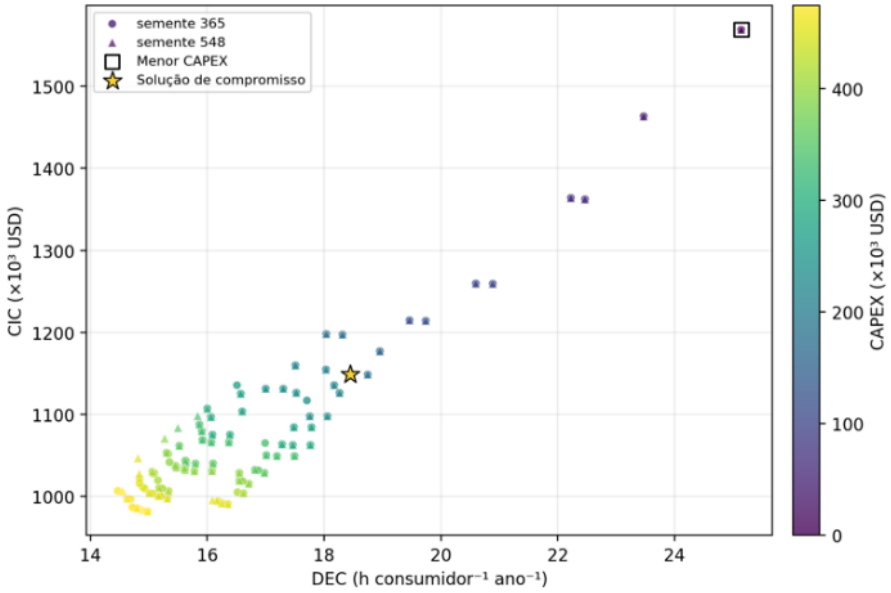



Figura 36 -Frente de Pareto combinada do sistema de 135 barras com 50% de RED.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Das 102 soluções da frente consolidada, 75 foram encontradas pelas duas sementes, 19 apenas pela semente 365 e oito apenas pela semente 548. As 13 configurações restantes da união, embora não dominadas dentro de sua execução de origem, são dominadas por alternativas encontradas pela outra semente. A combinação das execuções ampliou, assim, a cobertura do espaço de decisões e permitiu eliminar soluções que somente pareciam eficientes quando cada corrida era examinada isoladamente.

### 7.5.4 Soluções representativas

A Tabela 18 reúne os valores das funções objetivo da configuração-base, da solução de compromisso e dos extremos de menor DEC e menor CIC. Os resultados são comuns aos níveis de 30% e 50%. A configuração-base apresenta DEC de 25,141 h consumidor$^{-1}$ ano$^{-1}$ e CIC anual de 1.569,127 ×10³ USD. A solução de compromisso instala três novas chaves nas linhas L13, L88 e L102, com CAPEX de 177,978 ×10³ USD.

Tabela 18 - Valores das funções objetivo das soluções representativas do sistema de 135 barras.

| RED | Solução | DEC | CIC (×10³ USD) | CAPEX (×10³ USD) |
|---|---|---|---|---|
| Comum | Base | 25,141 | 1.569,127 | 0,000 |
| Comum | Compromisso | 18,446 | 1.148,833 | 177,978 |
| Comum | Menor DEC | 14,468 | 1.006,932 | 474,608 |
| Comum | Menor CIC | 14,978 | 982,047 | 474,608 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

As configurações físicas correspondentes são detalhadas na Tabela 19. As linhas L13, L88 e L102 formam o núcleo da solução de compromisso. Os extremos de menor DEC e menor CIC utilizam oito novas chaves automatizadas cada um; nas soluções representativas selecionadas não há substituição de chaves manuais.

Tabela 19 - Configurações das soluções representativas do sistema de 135 barras.

| RED | Solução | Linhas automatizadas | Novas | Substituições |
|---|---|---|---|---|
| Comum | Compromisso | L13, L88 e L102 | 3 | 0 |
| Comum | Menor DEC | L13, L70, L84, L88, L94, L102, L109 e L114 | 8 | 0 |
| Comum | Menor CIC | L13, L38, L50, L74, L88, L102, L109 e L114 | 8 | 0 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

A solução de compromisso utiliza 34,90% do orçamento e reduz simultaneamente todos os indicadores. A Tabela 20 mostra reduções de 44,50% no FEC, 26,63% no DEC, 26,87% na END e 26,79% no CIC. Os dois extremos consomem 93,06% do orçamento. A solução de menor DEC reduz esse indicador em 42,45%, enquanto a de menor CIC reduz o custo de interrupção em 37,41%.

Tabela 20 - Reduções percentuais das soluções representativas do sistema de 135 barras.

| RED | Solução | FEC | DEC | END | CIC |
|---|---|---|---|---|---|
| Comum | Compromisso | 44,50% | 26,63% | 26,87% | 26,79% |
| Comum | Menor DEC | 53,11% | 42,45% | 35,82% | 35,83% |
| Comum | Menor CIC | 51,97% | 40,43% | 37,46% | 37,41% |

Fonte: Elaborada pelo autor.

As linhas L13, L88 e L102 aparecem em todas as soluções representativas e definem a alternativa equilibrada de investimento. Nos dois extremos também se repetem L109 e L114. A

recorrência dessas posições em sementes e níveis de RED distintos indica sua relevância estrutural para reduzir os efeitos das interrupções, sem que as soluções representativas selecionadas exijam conversões de chaves manuais.

### 7.5.5 Influência da penetração de RED

Os cenários de 30% e 50% preservaram todas as configurações e os valores dos indicadores. As frentes consolidadas de 102 soluções são idênticas, com Jaccard igual a 1,000, assim como a configuração-base, a solução de compromisso e os extremos. Para o mapa fixo de RED e as condições analisadas, a maior penetração não alterou a decisão de automação.

## 7.6 DISCUSSÃO INTEGRADA DOS RESULTADOS

### 7.6.1 Escalabilidade da ISRM e viabilidade da integração evolutiva

Na rede de 1.946 barras, as 1.000 topologias simuladas com 30% de RED e alimentadores de reserva disponíveis apresentaram médias de FEC igual a 2,16, DEC de 4,49 h, END de 7,53 MWh e CIC de 54,67 $\times 10^3$ USD. Houve registro de pelo menos uma microrrede em 920 topologias. A resposta horária atingiu 7,53% dos consumidores às 13 h nas contingências com atuação de microrrede, reforçando a dependência temporal do recurso. A agregação em superblocos e os tempos de processamento reportados anteriormente demonstram que a avaliação pode ser aplicada também a redes de grande porte.

Na otimização, a ISRM foi executada repetidamente para avaliar configurações distintas de chaves. As execuções validadas do sistema de 69 barras duraram de 4,59 h a 7,26 h, enquanto as do sistema de 135 barras duraram de 11,24 h a 21,17 h. Esses tempos acumulam muitas avaliações de alternativas de automação e, por isso, não devem ser interpretados como duração de uma única restauração. O critério adaptativo encerrou as execuções quando as condições de estabilidade definidas foram satisfeitas.

### 7.6.2 Automação, redundância e microrredes

Nas simulações da rede de 69 barras, a disponibilidade de alimentadores de reserva reduziu as médias anuais em relação aos casos sem reserva. Para 30% de RED, as reduções foram 20,94% no FEC, 29,82% no DEC, 23,14% na END e 23,35% no CIC; para 50%, foram 22,02%, 29,43%, 23,29% e 23,46%. O aumento da penetração de 30% para 50% trouxe reduções adicionais mais discretas, entre 1,44% e 3,15%. Na rede de 1.946 barras, o conjunto

de 30% com reserva apresentou FEC 2,16, DEC 4,49 h, END 7,53 MWh e CIC 54,67 $\times 10^3$ USD; a comparação direta com um cenário sem reserva não está disponível para essa rede.

Os resultados do NSGA-II mostram que a posição das chaves é relevante para o equilíbrio entre desempenho e investimento. Nas redes de 69 e 135 barras, as soluções de compromisso empregam três novas chaves e CAPEX de 177.978 USD, embora representem parcelas distintas dos respectivos orçamentos. A solução equilibrada captura reduções simultâneas nos indicadores sem exigir o investimento dos extremos de menor DEC ou menor CIC.

As microrredes complementam a restauração por alimentadores de reserva. Na rede de 69 barras, houve registro de microrrede em 38% e 53% das topologias com reserva para 30% e 50% de RED, respectivamente; sem reserva, as proporções foram 73% e 85%. Na rede de 1.946 barras, 920 das 1.000 topologias registraram atuação. Os perfis horários mostram que a quantidade atendida depende do horário de início da interrupção e das condições de operação dos REDs.

### 7.6.3 Comparação das soluções de planejamento

A Tabela 21 sintetiza os resultados validados do NSGA-II para os sistemas de 69 e 135 barras, incluindo a dimensão das frentes após consolidação, a coincidência entre sementes, o investimento das soluções de compromisso e as reduções de DEC e CIC.

Tabela 21 - Comparação dos principais resultados da otimização nos sistemas de 69 e 135 barras.

| Indicador | 69 barras | 135 barras |
|---|---:|---:|
| Posições candidatas | 60 | 118 |
| Orçamento (USD) | 390.000 | 510.000 |
| Soluções na frente combinada | 39/39 | 115–102 |
| Jaccard entre sementes | 1,000 | 0,652 |
| Dispositivos na solução de compromisso | 3 novos | 3 novos |
| CAPEX da solução de compromisso (USD) | 177.978 | 177.978 |
| CAPEX da solução de compromisso (%) | 45,64% | 34,90% |
| Redução de DEC no compromisso | 24,34% | 26,63% |
| Redução de CIC no compromisso | 24,05% | 26,79% |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na rede de 69 barras, as sementes encontraram as mesmas 39 configurações não dominadas, com Jaccard igual a 1,000. Na rede de 135 barras, a união das execuções reuniu 115 configurações distintas; após reaplicar a dominância ao conjunto unido, permaneceram 102 soluções. As duas sementes tiveram 75 configurações em comum entre 97 e 93 soluções

individuais, resultando em Jaccard de 0,652. As frentes consolidadas de 30% e 50% foram idênticas em cada rede, embora a repetibilidade entre as sementes tenha sido maior no sistema de 69 barras.

Apesar da diferença de porte, as duas soluções de compromisso requerem três novas chaves e CAPEX de 177.978 USD. Esse investimento representa 45,64% do orçamento da rede de 69 barras e 34,90% do orçamento da rede de 135 barras. As reduções de DEC foram 24,34% e 26,63%, respectivamente; as de CIC foram 24,05% e 26,79%. A rede maior ofereceu uma frente final mais diversa sem elevar o investimento da alternativa equilibrada.

## 7.7 SÍNTESE DOS RESULTADOS

A validação operacional confirmou três propriedades centrais da ISRM. A agregação em superblocos reduziu a dimensão efetivamente processada em aproximadamente 91% na rede de 69 barras e 88% na rede de 1.946 barras. A metodologia representou redes de grande porte com tempo mediano de restauração inferior a 1 s e capturou os efeitos combinados da automação, dos alimentadores de reserva e dos REDs sobre FEC, DEC, END e CIC.

Os maiores benefícios operacionais ocorreram quando a automação foi coordenada com alternativas de suprimento. Na rede de 1.946 barras, essa combinação reduziu FEC e DEC em até aproximadamente 65% e 60%. As microrredes apresentaram contribuição sistêmica moderada quando os alimentadores de reserva estavam disponíveis, mas se tornaram relevantes em regiões radiais e situações de indisponibilidade dos caminhos convencionais, com forte dependência do horário da interrupção.

Na otimização, as oito execuções atenderam ao critério adaptativo de convergência. A execução encerrada na geração 150 cumpriu todas as condições da Tabela 11 e evitou 100 gerações sem melhoria relevante. As redes de 69 e 135 barras produziram soluções de compromisso com três novas chaves e CAPEX de 177.978 USD, acompanhadas de reduções simultâneas de continuidade, energia não distribuída e custo de interrupção.

Em conjunto, os resultados demonstram que a contribuição da pesquisa não se limita à execução do NSGA-II ou à obtenção de uma única configuração. A ISRM fornece uma avaliação operacional detalhada, escalável e temporalmente dependente para cada alternativa, enquanto a otimização organiza as configurações eficientes segundo os compromissos entre DEC, CIC e CAPEX. Essa integração oferece ao planejador um conjunto transparente de decisões e evidencia que a localização estratégica dos dispositivos é mais determinante que o simples aumento do número de chaves, do orçamento utilizado ou da penetração de RED.

# 8 CONCLUSÕES

Esta tese propõe uma metodologia integrada para modelar, avaliar e otimizar a restauração de redes de distribuição inteligentes, considerando a localização das contingências, a sequência das ações restauradoras e a variação temporal dos recursos disponíveis. Para isso, uma Metodologia Integrada de Restauração Inteligente (Integrated Smart Restoration Methodology - ISRM) é implementada. O ISRM estabelece uma ligação consistente entre a simulação operacional da restauração, a avaliação probabilística da confiabilidade e o planejamento multiobjetivo da automação.

A principal contribuição da pesquisa está na construção de um modelo capaz de avaliar cada configuração de automação pelo efeito que efetivamente produz sobre a restauração e os indicadores do sistema. A representação hierárquica baseada em blocos de carga, superblocos e hiperblocos preserva a localização da contingência e reorganiza dinamicamente a rede após cada falta. Dessa forma, as regiões restauráveis não são definidas previamente, mas determinadas conforme a topologia, o estado dos dispositivos e as fontes disponíveis em cada situação.

A incorporação da dimensão temporal também se mostrou essencial. A ISRM considera os perfis horários de demanda, a geração fotovoltaica, o estado de carga dos sistemas de armazenamento, a capacidade dos alimentadores de reserva e o tempo de reparo dependente do horário da ocorrência. Os resultados de cada contingência são registrados na MTIB e na MBIP, permitindo calcular FEC, DEC, END e CIC sem perder a relação entre a falha, os consumidores afetados e os respectivos tempos de interrupção.

A agregação em superblocos reduziu a dimensão efetivamente processada em aproximadamente 91% no sistema de 69 barras e 88% no sistema de 1.946 barras. Neste último, o tempo médio de processamento foi de 0,73 s por procedimento de restauração. Esses resultados demonstram que a ISRM pode representar redes de grande porte mantendo o detalhamento das etapas restauradoras, embora o tempo total das análises ainda cresça com a quantidade de contingências e configurações avaliadas.

Os estudos de validação mostraram que os benefícios da automação dependem principalmente da localização dos dispositivos e das alternativas de suprimento que eles tornam acessíveis. No sistema de 69 barras, a automação isolada produziu reduções inferiores a 1% nos indicadores, enquanto sua combinação com alimentadores de reserva ampliou os benefícios para até 18,4%. No sistema de 1.946 barras, a atuação coordenada da automação e da

redundância operacional reduziu FEC e DEC em aproximadamente 65% e 60%, respectivamente.

As microrredes apresentaram uma função complementar. Quando os alimentadores de reserva estavam disponíveis, sua contribuição incremental nos indicadores médios foi limitada, pois grande parte das cargas já havia sido restaurada pelas transferências convencionais. Na ausência desses caminhos, as microrredes tornaram-se relevantes para atender regiões isoladas, com resultados dependentes do horário da interrupção, da geração fotovoltaica, do estado de carga dos sistemas de armazenamento e da demanda. Portanto, seu valor está relacionado principalmente à resiliência diante da insuficiência ou indisponibilidade das alternativas convencionais.

A integração da ISRM ao NSGA-II permitiu avaliar configurações de instalação de novas chaves automatizadas e de substituição de chaves manuais. As oito execuções atenderam ao critério adaptativo de convergência. A execução encerrada na geração 150 cumpriu as condições de estabilidade do hipervolume e de ausência prolongada de melhorias relevantes, não representando uma interrupção anormal do algoritmo.

No sistema de 69 barras, as duas sementes recuperaram as mesmas 40 configurações não dominadas para 30% e 50% de RED. A solução de compromisso selecionou três novas chaves nas linhas L10, L12 e L21, com CAPEX de USD 177.978,00, e reduziu FEC, DEC, END e CIC entre 23,07% e 24,34%. Os extremos de menor DEC e menor CIC exigiram o dobro de dispositivos e investimento próximo ao limite orçamentário, evidenciando retornos marginais decrescentes.

No sistema de 135 barras, a combinação das sementes produziu 113 soluções não dominadas para 30% de RED e 115 para 50%. Embora as execuções tenham alcançado valores próximos de hipervolume, a coincidência das configurações foi menor que na rede de 69 barras. Esse resultado demonstra que diferentes conjuntos de chaves podem produzir desempenhos semelhantes e reforça a importância de reunir mais de uma execução para ampliar as alternativas disponíveis ao planejador.

A solução de compromisso da rede de 135 barras também foi composta por três novas chaves, instaladas nas linhas L13, L88 e L102, com CAPEX de USD 177.978,00. Essa solução reduziu FEC, DEC, END e CIC em 44,50%, 26,63%, 26,55% e 26,46%, respectivamente. Assim como na rede menor, a aproximação dos extremos exigiu quase todo o orçamento, enquanto a solução de compromisso obteve reduções simultâneas utilizando apenas 34,90% do valor disponível.

O aumento da penetração de RED de 30% para 50% modificou algumas soluções intermediárias e extremas, mas não alterou as soluções de compromisso nas duas redes. Nas condições estudadas, esse resultado indica que a localização das chaves exerceu maior influência sobre a decisão de automação do que o aumento da penetração de RED. Essa conclusão não deve ser generalizada para todas as redes, pois depende da topologia e da capacidade disponível nos alimentadores de reserva.

Em conjunto, os resultados evidenciam que o planejamento da automação não deve ser orientado apenas pela quantidade de dispositivos ou pelo consumo integral do orçamento. Um número reduzido de chaves estrategicamente localizado pode produzir benefícios superiores aos de intervenções mais numerosas em posições de menor relevância. A fronteira de Pareto oferece ao planejador alternativas transparentes para equilibrar continuidade, custo das interrupções e investimento, sem impor uma única configuração como universalmente ótima.

## LIMITAÇÕES DA PESQUISA

A ISRM foi desenvolvida para redes de distribuição com operação radial e representa a restauração em regime permanente, considerando a suficiência de potência e energia. A metodologia não substitui análises transitórias, estudos detalhados de estabilidade de microrredes ou avaliações completas de coordenação da proteção. Os resultados também dependem dos perfis de demanda, geração, estado de carga, taxas de falha, tempos de reparo e custos adotados.

Os estudos de caso não abrangem toda a diversidade das redes de distribuição, e as otimizações utilizaram duas sementes para cada combinação de rede e penetração de RED. Esse número permitiu analisar a repetibilidade, mas não constitui uma avaliação estatística ampla do NSGA-II. Além disso, algumas execuções foram realizadas em ambientes computacionais diferentes, razão pela qual seus tempos totais não devem ser comparados diretamente como medida exclusiva do desempenho do algoritmo.

## RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como continuidade, recomenda-se aplicar a ISRM a outros sistemas reais, especialmente redes rurais extensas e áreas com menor redundância. Também podem ser incorporadas incertezas da demanda, geração fotovoltaica, taxas de falha e tempos de reparo,

além de contingências múltiplas, eventos climáticos extremos, indisponibilidade de dispositivos e restrições de deslocamento das equipes.

Para as microrredes, estudos futuros podem incluir modelos mais detalhados de estabilidade, controle, transição para o modo ilhado e coordenação da proteção. Na otimização, recomenda-se aumentar o número de execuções independentes, padronizar o ambiente computacional e explorar paralelização, modelos substitutos e técnicas de aprendizado de máquina para reduzir o tempo de processamento.

Outras extensões incluem o planejamento plurianual dos investimentos e a inclusão de objetivos relacionados a perdas, tensão, qualidade da energia, resiliência e atendimento de consumidores prioritários. A integração da ISRM a dados e ferramentas de concessionárias também permitiria avaliar sua aplicabilidade prática e sua contribuição aos processos reais de decisão.

Conclui-se que a ISRM oferece uma estrutura integrada, escalável e rastreável para relacionar restauração, confiabilidade e planejamento da automação. Ao preservar a localização da contingência, a evolução temporal dos recursos e a sequência das ações restauradoras, a metodologia permite avaliar cada investimento pelo benefício operacional que efetivamente proporciona. Sua integração ao NSGA-II organiza as alternativas eficientes e fornece ao planejador uma base tecnicamente fundamentada para selecionar intervenções compatíveis com as prioridades e restrições da rede.

## PUBLICAÇÔES

CARNEIRO, Carlos Alberto *et al*. Automated Switch Placement in Power Distribution Systems: analysis of binary pso parameters. **2022 17Th International Conference On Probabilistic Methods Applied To Power Systems (Pmaps)**, [S.L.], p. 1-6, 12 jun. 2022. IEEE. http://dx.doi.org/10.1109/pmaps53380.2022.9810640.

CARNEIRO, Carlos Alberto *et al*. Impact of Distributed Energy Resources on Fault Location, Isolation, and Service Restoration. **2022 17Th International Conference On Probabilistic Methods Applied To Power Systems (Pmaps)**, [S.L.], p. 1-6, 12 jun. 2022. IEEE. http://dx.doi.org/10.1109/pmaps53380.2022.9810565.

CARNEIRO, Carlos Alberto et al. *A Novel Service Restoration Strategy for Large Distribution Networks Considering Photovoltaic Systems and BESS*. Manuscrito submetido ao periódico *IEEE Access*, em avaliação, 2026.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKHTARSHENAS, Seyed Mostafa; POURHOSSEIN, Javad; HOSSEINI, Seyed Ali. Optimal operation-planning of active distribution system for resiliency enhancement in the presence of renewable energy resources. **Electric Power Systems Research**, [s. l.], v. 233, art. 110440, ago. 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110440. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110440. Acesso em: 16 ago. 2026.

AMJADIAN, Ali; FEREIDUNIAN, Alireza; MANSHADI, Saeed D. A Unified Approach to Improve Reliability and Resiliency within Electricity Distribution System via Optimal Switch Placement. **Electric Power Systems Research**, [s. l.], v. 233, art. 110462, ago. 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110462. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110462. Acesso em: 16 ago. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Interrupções de energia elétrica nas redes de distribuição: interrupções-energia-elétrica-2025 [conjunto de dados]. Versão 1.0. Brasília, DF: ANEEL, 2026. Disponível em: https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/interrupcoes-de-energia-eletrica-nas-redes-de-distribuicao. Acesso em: 16 ago. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa nº 1.059, de 7 de fevereiro de 2023. ANEEL, Brasília, DF, Brasil, 2023. [Online]. Available: https://leis.org (Acesso em: 18 jun 2026).

ASSIS, Laura Silva de et al. Evolutionary algorithms for switch allocation in power distribution networks with distributed generation. **Electric Power Systems Research**, [s. l.], v. 249, art. 112013, dez. 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2025.112013. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2025.112013. Acesso em: 16 ago. 2026.

BABU, K. Victor Sam Moses et al. A comprehensive review on resilience definitions, frameworks, metrics, and enhancement strategies in electrical distribution systems. **Applied Energy**, [s. l.], v. 394, art. 126141, set. 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.126141. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.126141. Acesso em: 16 ago. 2026.

BIAN, Y. et al. Service restoration for resilient distribution systems coordinated with damage assessment. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2022. DOI: 10.1109/TPWRS.2021.3137257.

BILLINTON, R.; JONNAVITHULA, S. Optimal switching device placement in radial distribution systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 11, n. 3, p. 1646–1651, 1996. DOI: 10.1109/61.517529.

BISWAS, Parag et al. An Extensive and Methodical Review of Smart Grids for Sustainable Energy Management: Addressing Challenges with AI, Renewable Energy Integration, and Leading-Edge Technologies. **IEEE Access**, [s. l.], v. 14, p. 44798-44815, 2026. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3537651. Disponível em: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3537651. Acesso em: 16 ago. 2026.

CAETANO, Henrique O. et al. Distribution systems cost reduction based on switches upgrades: a stochastic approach. **Electric Power Systems Research**, [s. l.], v. 216, art. 108523, mar. 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108523. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108523. Acesso em: 16 ago. 2026.

COSTA, M. M.; BESSANI, M.; BATISTA, L. S. A multiobjective and multicriteria approach for optimal placement of protective devices and switches in distribution networks. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 37, n. 4, p. 2978–2985, 2022. DOI: 10.1109/TPWRD.2021.3120968.

CRUZ, Gederson Alvaro da; HAFFNER, Sérgio; RESENER, Mariana. MILP model for reliability assessment of active distribution networks with microgrids. **Electric Power Systems Research**, [s. l.], v. 255, art. 112811, jun. 2026. DOI: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2026.112811. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2026.112811. Acesso em: 16 ago. 2026.

DEB, K. et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: nsga-ii. **IEEE Transactions On Evolutionary Computation**, [S.L.], v. 6, n. 2, p. 182-197, abr. 2002. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). http://dx.doi.org/10.1109/4235.996017.

EISENKRAEMER, Pedro et al. A Systematic Review on Coordinated Restoration Strategies for Power Distribution Grids. **IEEE Access**, [s. l.], v. 14, p. 30702-30725, 2026. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2026.3667471. Disponível em: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2026.3667471. Acesso em: 16 ago. 2026.

ETTEHAD, Mohammad Taghi; MOHAMMADI CHABANLOO, Reza; AMELI, Mohammad Taghi. A MILP model for optimal switch placement to enhance power distribution system performance in normal and hurricane conditions. **Electric Power Systems Research**, [s. l.], v. 232, art. 110361, jul. 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110361. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110361. Acesso em: 16 ago. 2026.

GANGWAR, Priyanka et al. Multiobjective Multiscenario Framework for RCS Placement in Unbalanced Distribution Systems Considering Uncertainty. **IEEE Systems Journal**, [s. l.], v. 16, n. 2, p. 2811-2821, jun. 2022. DOI: https://doi.org/10.1109/JSYST.2021.3077594. Disponível em: https://doi.org/10.1109/JSYST.2021.3077594. Acesso em: 16 ago. 2026.

GOLDBARG, M. C. et al. (ed.). Otimização combinatória e meta-heurísticas: algoritmos e aplicações. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016. 392 p.

HU, Feng et al. Multi-objective dynamic reconfiguration of active distribution networks via spatio-temporal flexible interaction of SOPs and ESSs against critical DG disconnections. **Applied Energy**, [s. l.], v. 426, art. 128634, dez. 2026. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2026.128634. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2026.128634. Acesso em: 16 ago. 2026.

IZADI, Milad; SAFDARIAN, Amir. A MIP Model for Risk Constrained Switch Placement in Distribution Networks. **IEEE Transactions on Smart Grid**, [s. l.], v. 10, n. 4, p. 4543-4553, jul. 2019. DOI: https://doi.org/10.1109/TSG.2018.2863379. Disponível em: https://doi.org/10.1109/TSG.2018.2863379. Acesso em: 16 ago. 2026.

LEVITIN, G.; MAZAL-TOV, S.; ELMAKIS, D. Genetic algorithm for optimal sectionalizing in radial distribution systems with alternative supply. **Electric Power Systems Research**, v. 35, p. 149–155, 1995. DOI: 10.1016/0378-7796(95)01002-5.

LI, Jiangbei et al. A Multi-stage Resilience Enhancing Method for Distribution Systems Considering Multi-resource Collaborative Allocation. In: IEEE CHINA CONFERENCE ON SYSTEM SIMULATION TECHNOLOGY AND ITS APPLICATIONS (CCSSTA), 26., 2025, Shenzhen. **Proceedings [...]**. Piscataway, NJ: IEEE, 2025. p. 383-388. DOI: https://doi.org/10.1109/IEEECONF65522.2025.11136925. Disponível em: https://doi.org/10.1109/IEEECONF65522.2025.11136925. Acesso em: 16 ago. 2026.

LOTFI, Hossein; HAJIABADI, Mohammad Ebrahim; PARSADUST, Hossein. Power Distribution Network Reconfiguration Techniques: A Thorough Review. **Sustainability**, [s. l.], v. 16, n. 23, art. 10307, 25 nov. 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/su162310307. Disponível em: https://doi.org/10.3390/su162310307. Acesso em: 16 ago. 2026.

LU, Jiangang et al. Uniform design-based self-healing evaluation for active distribution network. **Electric Power Systems Research**, [s. l.], v. 235, art. 110863, out. 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110863. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110863. Acesso em: 16 ago. 2026.

OMRI, Mahsa et al. Modeling Microgrids for Analytical Distribution System Reliability Evaluation. **IEEE Transactions on Power Systems**, [s. l.], v. 39, n. 5, p. 6319-6331, set. 2024. DOI: https://doi.org/10.1109/TPWRS.2024.3354299. Disponível em: https://doi.org/10.1109/TPWRS.2024.3354299. Acesso em: 16 ago. 2026.

OROZCO HENAO, Cesar; MARÍN QUINTERO, Juan Guillermo; HERRERA OROZCO, Andres Ricardo. Optimal placement of intelligent electronic devices and fault indicators for enhancing FLISR performance in active distribution networks. **Electric Power Systems Research**, [s. l.], v. 254, art. 112595, maio 2026. DOI: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2025.112595. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2025.112595. Acesso em: 16 ago. 2026.

PINNEY, David. *Costs and benefits of smart feeder switching: quantifying the operating value of SFS*. Final Report. Arlington, VA: National Rural Electric Cooperative Association, 2014. Projeto DE-OE0000222. Disponível em: <URL>. Acesso em: 5 ago. 2026.

RAJIĆ, Tomislav; STOJANOVIĆ, Branko. Algorithm for distribution network reconfiguration and reactive power compensation with battery energy storage systems. **Electric Power Systems Research**, [s. l.], v. 244, art. 111547, jul. 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2025.111547. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2025.111547. Acesso em: 16 ago. 2026.

SHAHBAZIAN, Abbas; FEREIDUNIAN, Alireza; MANSHADI, Saeed D. Optimal Switch Placement in Distribution Systems: A High-Accuracy MILP Formulation. **IEEE Transactions on Smart Grid**, [s. l.], v. 11, n. 6, p. 5009-5018, nov. 2020. DOI: https://doi.org/10.1109/TSG.2020.3000315. Disponível em: https://doi.org/10.1109/TSG.2020.3000315. Acesso em: 16 ago. 2026.

SHIMILLAS, Marios et al. Anticipatory distribution network reconfiguration: a decision-support framework for networked microgrids formation and energy management. **Sustainable Energy, Grids and Networks**, [s. l.], v. 43, art. 101804, set. 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.segan.2025.101804. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.segan.2025.101804. Acesso em: 16 ago. 2026.

SINAPSIS - Inovação em Energia. **Avaliação dos custos relacionados às interrupções de energia elétrica e suas implicações na regulação: relatório 5**. Brasília, 2016. 61 p. Disponível em: https://antigo.mme.gov.br/documents/36144/472644/Produto+5.pdf. Acesso em: 20 out. 2024.

SPERR, Felix et al. Service Restoration in the Medium Voltage Grid Minimizing the SAIDI Contribution After Primary Substation Failures. **IEEE Transactions on Power Systems**, [s. l.], v. 39, n. 1, p. 66-82, jan. 2024. DOI: https://doi.org/10.1109/TPWRS.2023.3237976. Disponível em: https://doi.org/10.1109/TPWRS.2023.3237976. Acesso em: 16 ago. 2026.

STANKOVIĆ, A. M. et al. Methods for analysis and quantification of power system resilience. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2023. DOI: 10.1109/TPWRS.2022.3212688.

USBERTI, Fábio Luiz et al. A polynomial-time exact algorithm for the sectionalizing switch allocation problem. **Electric Power Systems Research**, [s. l.], v. 249, art. 112016, dez. 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2025.112016. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2025.112016. Acesso em: 16 ago. 2026.

WANG, Chongyu et al. Frequency-Constrained Optimal Restoration Scheduling in Active Distribution Networks With Dynamic Boundaries for Networked Microgrids. **IEEE Transactions on Power Systems**, [s. l.], v. 40, n. 3, p. 2061-2077, maio 2025. DOI: https://doi.org/10.1109/TPWRS.2024.3471331. Disponível em: https://doi.org/10.1109/TPWRS.2024.3471331. Acesso em: 16 ago. 2026.

YANG, Xiaodong et al. Resilience-Oriented Co-Deployment of Remote-Controlled Switches and Soft Open Points in Distribution Networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, [s. l.], v. 38, n. 2, p. 1350-1365, mar. 2023. DOI: https://doi.org/10.1109/TPWRS.2022.3176024. Disponível em: https://doi.org/10.1109/TPWRS.2022.3176024. Acesso em: 16 ago. 2026.

# APÊNDICE A REPRESENTAÇÃO HIERÁRQUICA DA REDE

Durante contingências, a topologia física da rede permanece fixa. Contudo, a representação operacional sofre alterações. Dessa forma, diferentes regiões eletricamente equivalentes passam a existir durante o processo de restauração, tornando inadequada a utilização de uma representação estática baseada exclusivamente em barras ou blocos de carga.

Para representar essa evolução estrutural, três níveis hierárquicos complementares podem ser utilizados: blocos de carga, superblocos de carga e hiperblocos. Cada nível corresponde a um estágio distinto da evolução da rede durante a restauração, conforme visto na Figura 37.

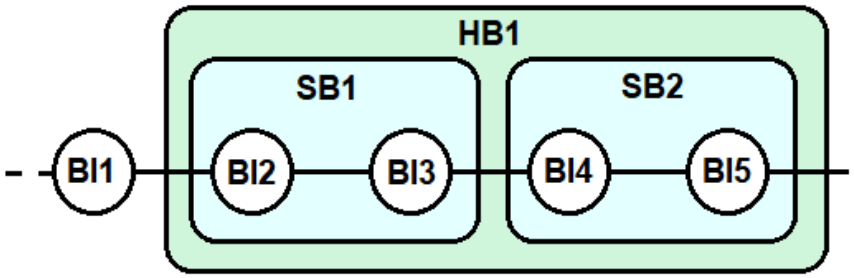



Figura 37 - Representação conceitual da hierarquia (Blocos → Superblocos → Hiperblocos).

Fonte: Elaborada pelo autor

## A.1 BLOCOS DE CARGA

Os blocos de carga constituem a menor unidade física utilizada. Cada bloco corresponde ao conjunto de barras, linhas e cargas delimitado por dispositivos de proteção e dispositivos de manobra.

Essa representação é construída apenas uma vez, durante a modelagem inicial da rede, para isso é necessário identificar todos os dispositivos de proteção (fusíveis, reles, religadores) e manobra (seccionadores, chaves faca etc). Se a quantidade de dispositivos e proteção e manobra não é alterada, o número de blocos de carga permanece inalterado, em todas as simulações, independentemente da posição do bloco da falta. Um exemplo de segmentação da rede em blocos pode ser visto na Figura 38.

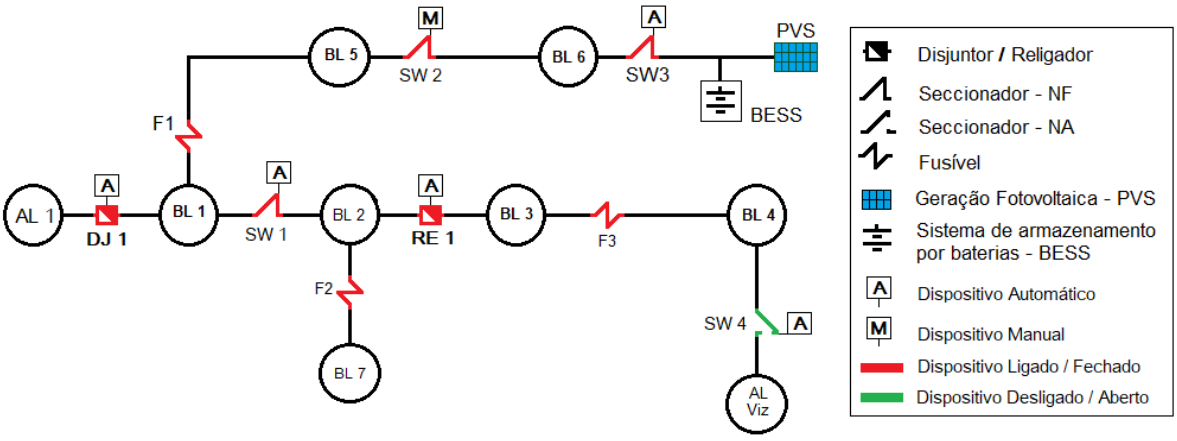



Figura 38 - Rede segmentada em blocos

Fonte: Elaborada pelo autor

## A.2 FORMAÇÃO DINÂMICA DOS SUPERBLOCOS

Após a ocorrência de uma contingência, a atuação do dispositivo de proteção modifica temporariamente a topologia operacional da rede. Os blocos eletricamente conectados após o isolamento da região sob falta são agrupados dinamicamente em superblocos. Diferentemente dos blocos de carga, cuja configuração depende apenas da estrutura física da rede, os superblocos dependem diretamente da localização da contingência e das possibilidades de restauração existentes naquele cenário. Os superblocos, portanto, são grupos de blocos que se formam após a contingência. Eles são passíveis de restauração, sendo assim, estão limitados por chaves exclusivamente manobráveis. Em outras palavras, caso dois blocos estejam ligados a um fusível, eles são propensos a serem agrupados para a formação de um superbloco.

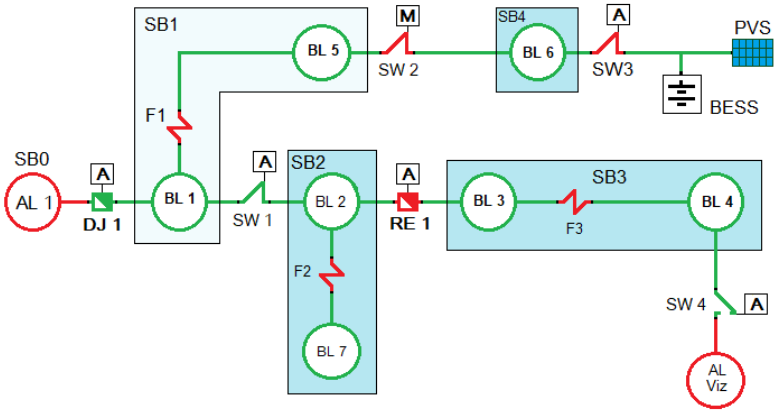



Figura 39 - Formação dos superblocos após a contingência.

Fonte: Elaborada pelo autor

Assim, uma mesma rede pode originar diferentes configurações de superblocos para diferentes posições de falta. Na Figura 39, uma falta ocorrida no bloco BL1 provoca a atuação da proteção a montante DJ1, que desliga toda a rede. Nesse momento são criados os superblocos

SB1 (blocos entre as chaves DJ1, SW1 e SW2), SB2 (blocos entre as chaves SW1 e RE1), SB3 (blocos entre as chaves RE1 e SW4) e SB4 (blocos entre as chaves SW2 e SW3).

## A.3 FORMAÇÃO DOS HIPERBLOCOS

Durante a etapa de restauração, superblocos que podem ser reenergizados por um mesmo recurso restaurador são agrupados em hiperblocos. Essa agregação não possui significado físico permanente, sendo utilizada exclusivamente durante a execução do algoritmo de restauração. Os hiperblocos representam regiões restauráveis associadas a um mesmo alimentador vizinho, à mesma microrrede ou a outra estratégia restaurativa disponível.

A utilização dessa representação reduz significativamente a complexidade computacional do problema, uma vez que as decisões deixam de ser realizadas individualmente sobre cada bloco e passam a ser executadas sobre regiões operacionalmente equivalentes. A Figura 40, mostra a formação de um hiperbloco HB1 (região na cor azul escuro), formado pelos superblocos restauráveis SB2 e SB3, restaurado por alimentador vizinho - Al_Viz. Ainda nessa mesma figura, é possível verificar a microrrede MR1 (região na cor verde) formada por SB4 e REDs (PVS e BESS).

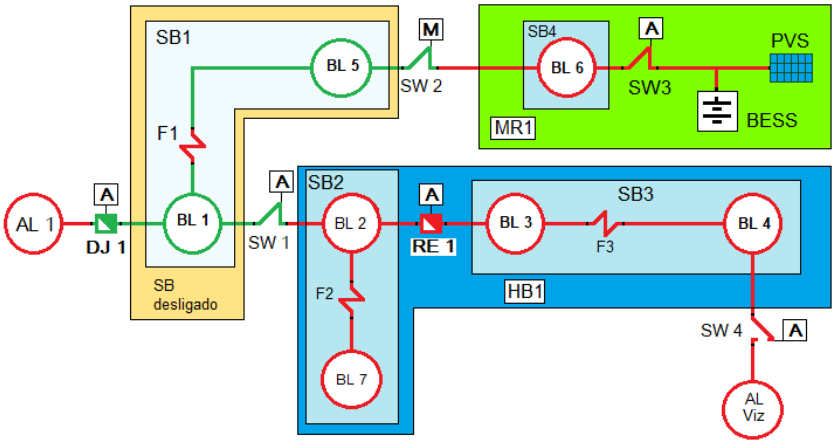



Figura 40 - Formação de hiperblocos e de microrredes.

Fonte: Elaborada pelo autor

Os blocos de carga que não podem ser restaurados são considerados desligados (região na cor amarelo). Nesse caso, mesmo podendo conter mais de um superbloco não são considerados hiperblocos.

# APÊNDICE B DADOS DAS CARGAS - NÚMERO DE CONSUMIDORES E POTÊNCIA ATIVA E REATIVA

## B.1 NÚMERO DE CONSUMIDORES, POTÊNCIA ATIVA (KW) E REATIVA (KVAR) – SISTEMA 69 BARRAS

Tabela 22 - Número de consumidores e potência ativa e reativa – Sistema 69 barras

| Barra | Nº consumidores | Pot. ativa (kW) | Pot. reativa (kvar) | Barra | Nº consumidores | Pot. ativa (kW) | Pot. reativa (kvar) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5BT | 1 | 0,88 | 0,72 | 66BT | 2 | 8,00 | 5,71 |
| 6BT | 6 | 13,46 | 9,98 | 67BT | 2 | 8,00 | 5,71 |
| 7BT | 10 | 24,89 | 17,81 | 68BT | 1 | 0,39 | 0,33 |
| 8BT | 4 | 10,00 | 7,21 | 70BT | 1 | 2,00 | 1,43 |
| 9BT | 4 | 9,33 | 6,67 | 89BT | 1 | 3,08 | 8,79 |
| 10BT | 20 | 48,50 | 34,61 | 90BT | 1 | 3,08 | 8,79 |
| 11BT | 20 | 48,50 | 34,61 | 36BT | 10 | 26,35 | 18,80 |
| 12BT | 1 | 2,71 | 1,82 | 37BT | 12 | 28,23 | 91,49 |
| 13BT | 1 | 2,71 | 1,82 | 38BT | 50 | 128,23 | 91,49 |
| 15BT | 6 | 15,18 | 10,20 | 40BT | 6 | 13,51 | 9,44 |
| 16BT | 6 | 16,50 | 11,78 | 41BT | 1 | 1,20 | 0,89 |
| 17BT | 6 | 16,50 | 11,78 | 42BT | 1 | 1,45 | 1,16 |
| 19BT | 1 | 0,32 | 0,21 | 43BT | 1 | 8,79 | 6,32 |
| 20BT | 15 | 37,98 | 27,10 | 43BT | 1 | 8,79 | 6,32 |
| 21BT | 1 | 1,76 | 1,18 | 44BT | 1 | 8,00 | 5,71 |
| 23BT | 4 | 9,39 | 6,67 | 48BT | 1 | 0,67 | 24,03 |
| 25BT | 2 | 4,67 | 3,33 | 50BT | 4 | 414,67 | 295,91 |
| 26BT | 2 | 4,67 | 3,33 | 51BT | 1 | 10,67 | 7,61 |
| 27BT | 3 | 8,67 | 6,19 | 53BT | 1 | 75,67 | 53,87 |
| 28BT | 3 | 8,67 | 6,19 | 54BT | 1 | 19,67 | 13,91 |
| 32BT | 2 | 4,58 | 3,26 | 55BT | 4 | 6,00 | 4,28 |
| 33BT | 2 | 6,50 | 4,55 | 56BT | 3 | 6,00 | 4,28 |
| 34BT | 1 | 1,92 | 1,29 | 57BT | 4 | 9,33 | 6,66 |
| 27eBT | 3 | 8,67 | 6,19 | 58BT | 4 | 9,33 | 6,66 |
| 28eBT | 3 | 8,67 | 6,19 | | | | |

## B.2 NÚMERO DE CONSUMIDORES, POTÊNCIA ATIVA (KW) E REATIVA (KVAR) – SISTEMA 135 BARRAS

Tabela 23 - Dados elétricos dos consumidores - Sistema 135 barras

| ID Consumidor | Barra | P (kW) | Q (kvar) | Número Consumidores | ID Consumidor | Barra | P (kW) | Q (kvar) | Número Consumidores |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| C1 | B3 | 41,4 | 17,64 | 13 | C51 | B68 | 104 | 44,09 | 7 |
| C2 | B5 | 69 | 29,39 | 21 | C52 | B69 | 6,44 | 2,74 | 3 |
| C3 | B6 | 69 | 29,39 | 21 | C53 | B70 | 104 | 44,09 | 7 |
| C4 | B7 | 104 | 44,09 | 7 | C54 | B71 | 69 | 29,39 | 21 |
| C5 | B8 | 69 | 29,39 | 21 | C55 | B72 | 7,82 | 3,33 | 3 |
| C6 | B9 | 69 | 29,39 | 21 | C56 | B73 | 1,75 | 0,74 | 1 |
| C7 | B12 | 7,91 | 3,37 | 3 | C57 | B74 | 104 | 44,09 | 7 |
| C8 | B13 | 69 | 29,39 | 21 | C58 | B75 | 104 | 44,09 | 7 |
| C9 | B14 | 69 | 29,39 | 21 | C59 | B76 | 104 | 44,09 | 7 |
| C10 | B15 | 104 | 44,09 | 7 | C60 | B77 | 5,43 | 2,31 | 2 |
| C11 | B16 | 41,4 | 17,64 | 13 | C61 | B79 | 69 | 29,39 | 21 |
| C12 | B17 | 104 | 44,09 | 7 | C62 | B80 | 104 | 44,09 | 7 |
| C13 | B19 | 69 | 29,39 | 21 | C63 | B81 | 104 | 44,09 | 7 |
| C14 | B20 | 104 | 44,09 | 7 | C64 | B83 | 69 | 29,39 | 21 |
| C15 | B21 | 104 | 44,09 | 7 | C65 | B84 | 69 | 29,39 | 21 |
| C16 | B22 | 104 | 44,09 | 5 | C66 | B85 | 104 | 44,09 | 7 |
| C17 | B24 | 2,76 | 1,18 | 1 | C67 | B86 | 104 | 44,09 | 7 |
| C18 | B25 | 41,4 | 17,64 | 13 | C68 | B87 | 69 | 29,39 | 21 |
| C19 | B27 | 104 | 44,09 | 7 | C69 | B88 | 69 | 29,39 | 21 |
| C20 | B29 | 69 | 29,39 | 21 | C70 | B89 | 41,4 | 17,64 | 13 |
| C21 | B30 | 104 | 44,09 | 7 | C71 | B91 | 104 | 44,09 | 7 |
| C22 | B31 | 104 | 44,09 | 7 | C72 | B93 | 21,6 | 9,21 | 10 |
| C23 | B32 | 104 | 44,09 | 5 | C73 | B94 | 69 | 29,39 | 21 |
| C24 | B33 | 104 | 44,09 | 7 | C74 | B96 | 5,52 | 2,35 | 2 |
| C25 | B34 | 104 | 44,09 | 7 | C75 | B97 | 21,6 | 9,21 | 10 |
| C26 | B36 | 11,4 | 4,86 | 5 | C76 | B99 | 69 | 29,39 | 21 |
| C27 | B37 | 104 | 44,09 | 7 | C77 | B100 | 104 | 44,09 | 7 |
| C28 | B39 | 2,76 | 1,18 | 1 | C78 | B101 | 104 | 44,09 | 7 |
| C29 | B41 | 69 | 29,39 | 21 | C79 | B102 | 69 | 29,39 | 21 |
| C30 | B42 | 69 | 29,39 | 21 | C80 | B104 | 69 | 29,39 | 21 |
| C31 | B43 | 69 | 29,39 | 21 | C81 | B105 | 69 | 29,39 | 21 |
| C32 | B44 | 104 | 44,09 | 7 | C82 | B106 | 99,8 | 42,52 | 31 |
| C33 | B45 | 41,4 | 17,64 | 13 | C83 | B109 | 104 | 44,09 | 7 |
| C34 | B46 | 0,92 | 0,39 | 1 | C84 | B110 | 104 | 44,09 | 7 |
| C35 | B47 | 104 | 44,09 | 7 | C85 | B111 | 69 | 29,39 | 21 |
| C36 | B49 | 104 | 44,09 | 7 | C86 | B112 | 27,6 | 11,76 | 13 |
| C37 | B50 | 69 | 29,39 | 21 | C87 | B115 | 27,6 | 11,76 | 13 |
| C38 | B51 | 104 | 44,09 | 7 | C88 | B116 | 27,6 | 11,76 | 13 |
| C39 | B53 | 1,1 | 0,47 | 1 | C89 | B117 | 27,6 | 11,76 | 13 |
| C40 | B54 | 104 | 44,09 | 7 | C90 | B118 | 27,6 | 11,76 | 13 |
| C41 | B55 | 69 | 29,39 | 21 | C91 | B120 | 50,6 | 21,56 | 16 |
| C42 | B56 | 69 | 29,39 | 21 | C92 | B121 | 27,6 | 11,76 | 13 |
| C43 | B58 | 9,2 | 3,92 | 4 | C93 | B124 | 14,3 | 6,07 | 7 |
| C44 | B59 | 104 | 44,09 | 7 | C94 | B125 | 41,4 | 17,64 | 13 |
| C45 | B60 | 3,5 | 1,49 | 1 | C95 | B126 | 14,3 | 6,07 | 7 |
| C46 | B61 | 2,76 | 1,18 | 1 | C96 | B127 | 14,3 | 6,07 | 7 |
| C47 | B62 | 5,06 | 2,16 | 2 | C97 | B129 | 41,4 | 17,64 | 13 |
| C48 | B64 | 69 | 29,39 | 21 | C98 | B131 | 104 | 44,09 | 7 |
| C49 | B65 | 69 | 29,39 | 21 | C99 | B133 | 104 | 44,09 | 7 |
| C50 | B66 | 3,22 | 1,37 | 1 | C100 | B134 | 104 | 44,09 | 7 |

# APÊNDICE C DADOS DAS LINHAS - SISTEMA 69 E SISTEMA 135 BARRAS

## C.1 EXTENSÃO E CONEXÕES DAS LINHAS DOS SISTEMA 69 BARRAS

Tabela 24 - Comprimento das linhas (km) - Sistema 69 barras

| Linha | Barra 1 | Barra 2 | Extensão (km) | Linha | Barra 1 | Barra 2 | Extensão (km) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| L1 | B0 | 1 | 0,01 | L40 | 66 | 67 | 0,01 |
| L2 | 1 | 2 | 0,01 | L41 | 67 | 68 | 0,9 |
| L3 | 2 | 2e | 0,01 | L42 | 68 | 69 | 0,4 |
| L4 | 2e | 3 | 0,01 | L43 | 69 | 70 | 0,05 |
| L5 | 3 | 4 | 0,03 | L44 | 70 | 88 | 0,01 |
| L6 | 4 | 5 | 0,5 | L45 | 88 | 89 | 0,2 |
| L7 | 5 | 6 | 0,5 | L46 | 89 | 90 | 0,01 |
| L8 | 6 | 7 | 0,10 | L47 | 3 | 35 | 0,01 |
| L9 | 7 | 8 | 0,05 | L48 | 35 | 36 | 0,10 |
| L10 | 8 | 9 | 1,20 | L49 | 36 | 37 | 0,40 |
| L11 | 9 | 10 | 0,30 | L50 | 37 | 38 | 0,10 |
| L12 | 10 | 11 | 0,90 | L51 | 7 | 40 | 0,10 |
| L13 | 11 | 12 | 1,20 | L52 | 40 | 41 | 0,40 |
| L14 | 12 | 13 | 1,20 | L53 | 8 | 42 | 0,20 |
| L15 | 13 | 14 | 1,20 | L54 | 42 | 43 | 0,30 |
| L16 | 14 | 15 | 0,30 | L55 | 43 | 44 | 0,40 |
| L17 | 15 | 16 | 0,50 | L56 | 44 | 45 | 0,40 |
| L18 | 16 | 17 | 0,01 | L57 | 45 | 46 | 1,90 |
| L19 | 17 | 18 | 0,40 | L58 | 46 | 47 | 0,90 |
| L20 | 18 | 19 | 0,30 | L59 | 47 | 48 | 0,40 |
| L21 | 19 | 20 | 0,40 | L60 | 48 | 49 | 0,50 |
| L22 | 20 | 21 | 0,03 | L61 | 49 | 50 | 0,90 |
| L23 | 21 | 22 | 0,20 | L62 | 50 | 51 | 0,10 |
| L24 | 22 | 23 | 0,40 | L63 | 51 | 52 | 0,20 |
| L25 | 23 | 24 | 0,90 | L64 | 52 | 53 | 0,90 |
| L26 | 24 | 25 | 0,40 | L65 | 53 | 54 | 1,20 |
| L27 | 25 | 26 | 0,20 | L66 | 10 | 55 | 0,30 |
| L28 | 2 | 27 | 0,01 | L67 | 55 | 56 | 0,01 |
| L29 | 27 | 28 | 0,08 | L68 | 11 | 57 | 0,90 |
| L30 | 28 | 29 | 0,50 | L69 | 57 | 58 | 0,01 |
| L31 | 29 | 30 | 0,08 | L70 | 26 | 26a | 0,01 |
| L32 | 30 | 31 | 0,40 | L71 | 34 | 34a | 0,01 |
| L33 | 31 | 32 | 1,20 | L72 | 54 | 54a | 0,01 |
| L34 | 32 | 33 | 1,90 | L73 | 90 | 90a | 0,01 |
| L35 | 33 | 34 | 1,90 | L74 | 26a | B0 | 0,01 |
| L36 | 2e | 27e | 0,01 | L75 | 34a | B0 | 0,01 |
| L37 | 27e | 28e | 0,08 | L76 | 54a | B0 | 0,01 |
| L38 | 28e | 65 | 0,20 | L77 | 90a | B0 | 0,01 |
| L39 | 65 | 66 | 0,05 | | | | |

## C.2 EXTENSÃO E CONEXÕES DAS LINHAS DOS SISTEMA 135 BARRAS

Tabela 25 - Dados elétricos das linhas – Sistema 135 barras

| Linha | Barra 1 | Barra 2 | Extensão (km) | Linha | Barra 1 | Barra 2 | Extensão (km) | Linha | Barra 1 | Barra 2 | Extensão (km) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| L1 | B1 | B2 | 0,90 | L46 | B46 | B47 | 0,02 | L91 | B91 | B92 | 0,02 |
| L2 | B2 | B3 | 0,05 | L47 | B47 | B48 | 0,12 | L92 | B92 | B93 | 0,03 |
| L3 | B2 | B4 | 0,10 | L48 | B48 | B49 | 0,05 | L93 | B92 | B94 | 0,07 |
| L4 | B4 | B5 | 0,04 | L49 | B49 | B50 | 0,02 | L94 | B92 | B95 | 0,10 |
| L5 | B5 | B6 | 0,02 | L50 | B50 | B51 | 0,17 | L95 | B95 | B96 | 0,04 |
| L6 | B6 | B7 | 0,02 | L51 | B48 | B52 | 0,10 | L96 | B95 | B97 | 0,05 |
| L7 | B7 | B8 | 0,02 | L52 | B52 | B53 | 0,06 | L97 | B97 | B98 | 0,06 |
| L8 | B8 | B9 | 0,01 | L53 | B53 | B54 | 0,03 | L98 | B98 | B99 | 0,11 |
| L9 | B9 | B10 | 0,05 | L54 | B54 | B55 | 0,13 | L99 | B98 | B100 | 0,04 |
| L10 | B10 | B11 | 0,10 | L55 | B52 | B56 | 0,02 | L100 | B100 | B101 | 0,11 |
| L11 | B11 | B12 | 0,06 | L56 | B56 | B57 | 0,08 | L101 | B95 | B102 | 0,06 |
| L12 | B12 | B13 | 0,03 | L57 | B57 | B58 | 0,05 | L102 | B102 | B103 | 0,04 |
| L13 | B13 | B14 | 0,16 | L58 | B57 | B59 | 0,06 | L103 | B103 | B104 | 0,03 |
| L14 | B11 | B15 | 0,03 | L59 | B59 | B60 | 0,02 | L104 | B103 | B105 | 0,15 |
| L15 | B15 | B16 | 0,01 | L60 | B48 | B61 | 0,04 | L105 | B105 | B106 | 0,21 |
| L16 | B16 | B17 | 0,02 | L61 | B61 | B62 | 0,01 | L106 | B106 | B107 | 0,03 |
| L17 | B17 | B18 | 0,04 | L62 | B62 | B63 | 0,05 | L107 | B107 | B108 | 0,10 |
| L18 | B18 | B19 | 0,04 | L63 | B63 | B64 | 0,03 | L108 | B108 | B109 | 0,10 |
| L19 | B19 | B20 | 0,05 | L64 | B64 | B65 | 0,02 | L109 | B109 | B110 | 0,03 |
| L20 | B18 | B21 | 0,15 | L65 | B65 | B66 | 0,03 | L110 | B110 | B111 | 0,02 |
| L21 | B10 | B22 | 0,03 | L66 | B66 | B67 | 0,02 | L111 | B107 | B112 | 0,17 |
| L22 | B22 | B23 | 0,07 | L67 | B67 | B68 | 0,03 | L112 | B112 | B113 | 0,11 |
| L23 | B23 | B24 | 0,05 | L68 | B67 | B69 | 0,02 | L113 | B113 | B114 | 0,11 |
| L24 | B24 | B25 | 0,02 | L69 | B69 | B70 | 0,02 | L114 | B113 | B115 | 0,30 |
| L25 | B25 | B26 | 0,03 | L70 | B67 | B71 | 0,05 | L115 | B115 | B116 | 0,20 |
| L26 | B26 | B27 | 0,12 | L71 | B71 | B72 | 0,04 | L116 | B116 | B117 | 0,20 |
| L27 | B27 | B28 | 0,02 | L72 | B72 | B73 | 0,04 | L117 | B117 | B118 | 0,20 |
| L28 | B28 | B29 | 0,02 | L73 | B73 | B74 | 0,02 | L118 | B90 | B119 | 0,11 |
| L29 | B29 | B30 | 0,005 | L74 | B74 | B75 | 0,11 | L119 | B119 | B120 | 0,07 |
| L30 | B28 | B31 | 0,025 | L75 | B63 | B76 | 0,02 | L120 | B120 | B121 | 0,07 |
| L31 | B26 | B32 | 0,06 | L76 | B76 | B77 | 0,03 | L121 | B119 | B122 | 0,07 |
| L32 | B32 | B33 | 0,04 | L77 | B77 | B78 | 0,05 | L122 | B122 | B123 | 0,13 |
| L33 | B33 | B34 | 0,02 | L78 | B78 | B79 | 0,07 | L123 | B123 | B124 | 0,02 |
| L34 | B23 | B35 | 0,01 | L79 | B79 | B80 | 0,07 | L124 | B123 | B125 | 0,02 |
| L35 | B35 | B36 | 0,07 | L80 | B80 | B81 | 0,03 | L125 | B125 | B126 | 0,04 |
| L36 | B36 | B37 | 0,01 | L81 | B81 | B82 | 0,03 | L126 | B126 | B127 | 0,04 |
| L37 | B37 | B38 | 0,01 | L82 | B82 | B83 | 0,05 | L127 | B85 | B128 | 0,02 |
| L38 | B38 | B39 | 0,07 | L83 | B82 | B84 | 0,05 | L128 | B128 | B129 | 0,06 |
| L39 | B38 | B40 | 0,10 | L84 | B84 | B85 | 0,03 | L129 | B104 | B130 | 0,07 |
| L40 | B40 | B41 | 0,06 | L85 | B128 | B86 | 0,03 | L130 | B130 | B131 | 0,02 |
| L41 | B40 | B42 | 0,05 | L86 | B86 | B87 | 0,02 | L131 | B130 | B132 | 0,10 |
| L42 | B42 | B43 | 0,01 | L87 | B78 | B88 | 0,05 | L132 | B132 | B133 | 0,04 |
| L43 | B40 | B44 | 0,03 | L88 | B78 | B89 | 0,13 | L133 | B133 | B134 | 0,04 |
| L44 | B44 | B45 | 0,04 | L89 | B89 | B90 | 0,05 | | | | |
| L45 | B38 | B46 | 0,06 | L90 | B90 | B91 | 0,18 | | | | |

# APÊNDICE D DADOS DOS REDS INSTALADOS NO SISTEMA 69 BARRAS E 135 BARRAS

Os valores utilizados nas simulações para PV e BESS são os valores de módulos comerciais. O valores para o BESS seguem a normativa nº 1.059, de 7 de fevereiro de 2023 de acordo com ANEEL (2023). A autonomia para os sistemas BESS considerada nesse trabalho é de 6 horas.

## D.1 DISTRIBUIÇÃO DOS REDS - SISTEMA 69 BARRAS, 30% DE PENETRAÇÃO

Tabela 26 - Distribuição dos REDs - Sistema 69 barras, 30% de penetração

| Barra | PV (kVA) | PV (kVA)+BESS (kWh) | | BESS (kWh) |
|---|---|---|---|---|
| B32 | - | 61,11 | 1.260,00 | - |
| B40 | 83,33 | - | - | - |
| B42 | 166,67 | - | - | - |
| B57 | 22,22 | - | - | - |
| B68 | - | - | - | 460,00 |
| B32 | - | 61,11 | 1.260,00 | - |

## D.2 DISTRIBUIÇÃO DOS REDS - SISTEMA 69 BARRAS, 50% DE PENETRAÇÃO

Tabela 27 - Distribuição dos REDs - Sistema 69 barras, 50% de penetração.

| Barra | PV (kVA) | PV (kVA)+BESS (kWh) | | BESS (kWh) |
|---|---|---|---|---|
| B1 | 83,33 | 83,33 | 1.720,00 | - |
| B32 | - | 22,22 | 460,00 | 500,00 |
| B40 | 111,11 | - | - | - |
| B42 | 83,33 | - | - | - |
| B57 | 177,78 | - | - | - |
| B68 | - | - | - | 260,00 |

## D.3 DISTRIBUIÇÃO DOS REDS - SISTEMA 135 BARRAS, 30% DE PENETRAÇÃO

Tabela 28 - Distribuição dos REDs - Sistema 135 barras, 30% de penetração.

| Barra | PV (kVA) | PV (kVA)+BESS (kWh) | | BESS (kWh) |
|---|---|---|---|---|
| B1 | 555,56 | - | - | - |
| B46 | 83,33 | - | - | - |
| B88 | 555,56 | - | - | - |
| B104 | 33,33 | - | - | - |
| B119 | 83,33 | - | - | - |
| B718 | 83,33 | - | - | - |
| B11 | - | 83,33 | 1.720,00 | - |
| B561 | - | 111,11 | 2.300,00 | - |
| B1118 | - | 83,33 | 1.720,00 | - |
| B1218 | - | 44,44 | 920,00 | - |
| B429 | - | - | - | 320,00 |
| B561 | - | - | - | 2.000,00 |

## D.4 DISTRIBUIÇÃO DOS REDS - SISTEMA 135 BARRAS, 50% DE PENETRAÇÃO

Tabela 29 - Distribuição dos REDs - Sistema 135 barras, 50% de penetração.

| Barra | PV (kVA) | PV (kVA)+BESS (kWh) | | BESS (kWh) |
|---|---|---|---|---|
| B1 | 83,33 | - | - | - |
| B2 | 111,11 | - | - | - |
| B11 | - | 83,33 | 1.720,00 | - |
| B32 | 166,67 | - | - | - |
| B40 | 83,33 | - | - | - |
| B46 | 83,33 | - | - | - |
| B76 | 277,78 | - | - | - |
| B88 | 83,33 | 83,33 | 1.720,00 | - |
| B97 | - | 88,89 | 1.840,00 | - |
| B104 | 555,56 | - | - | - |
| B119 | 83,33 | - | - | - |
| B429 | - | - | - | 860,00 |
| B561 | 83,33 | 83,33 | 1.720,00 | 3.000,00 |
| B718 | 555,56 | - | - | - |
| B1118 | - | 83,33 | 1.720,00 | - |
| B1218 | 155,56 | 111,11 | 2.300,00 | - |

# APÊNDICE E VALORES DAS CURVAS HORÁRIAS

## E.1 DEMANDA DOS CONSUMIDORES

Tabela 30 - Valores horários de demanda para consumidores residencial, comercial e industrial (p.u.)

| Hora | Residencial | Comercial | Industrial | Hora | Residencial | Comercial | Industrial |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0,3 | 0,29 | 0,51613 | 13 | 0,88 | 0,98 | 0,54839 |
| 2 | 0,3 | 0,3 | 0,31935 | 14 | 0,9 | 0,94 | 0,5 |
| 3 | 0,29 | 0,31 | 0,32 | 15 | 0,6 | 0,89 | 0,6 |
| 4 | 0,28 | 0,31 | 0,32 | 16 | 0,4 | 0,8 | 0,51 |
| 5 | 0,26 | 0,31 | 0,31935 | 17 | 0,7 | 0,5 | 0,6129 |
| 6 | 0,25 | 0,34 | 0,28387 | 18 | 0,8 | 0,45 | 0,57 |
| 7 | 0,23 | 0,35 | 0,28065 | 19 | 0,9 | 0,42 | 0,9 |
| 8 | 0,22 | 0,8 | 0,46 | 20 | 0,95 | 0,4 | 0,96774 |
| 9 | 0,21 | 0,92 | 0,45 | 21 | 1 | 0,4 | 0,99 |
| 10 | 0,2 | 0,96 | 0,6 | 22 | 0,85 | 0,41 | 1 |
| 11 | 0,8 | 0,95 | 0,59 | 23 | 0,5 | 0,42 | 0,85 |
| 12 | 0,85 | 1 | 0,55 | 24 | 0,4 | 0,35 | 0,6129 |

## E.2 POTÊNCIA DE SAÍDA DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

Tabela 31 - Valores horários de potência de saída dos sistemas fotovoltáico (p.u.)

| Hora | Irradiancia | Hora | Irradiancia | Hora | Irradiancia |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 9 | 0.3 | 17 | 0.7 |
| 2 | 0 | 10 | 0.5 | 18 | 0.4 |
| 3 | 0 | 11 | 0.8 | 19 | 0.1 |
| 4 | 0 | 12 | 0.9 | 20 | 0 |
| 5 | 0 | 13 | 1 | 21 | 0 |
| 6 | 0 | 14 | 1 | 22 | 0 |
| 7 | 0.1 | 15 | 0.99 | 23 | 0 |
| 8 | 0.2 | 16 | 0.9 | 24 | 0 |

## E.3 ESTADO DE CARGA DE BATERIAS (SOC)

Tabela 32- Valores horários de Estado de Carga das Baterias – SoC (p.u.)

| Hora | SoC_pu | Hora | SoC_pu | Hora | SoC_pu |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0,35 | 9 | 0,65 | 17 | 0,9 |
| 2 | 0,5 | 10 | 0,6 | 18 | 0,8 |
| 3 | 0,65 | 11 | 0,65 | 19 | 0,65 |
| 4 | 0,75 | 12 | 0,75 | 20 | 0,5 |
| 5 | 0,85 | 13 | 0,85 | 21 | 0,4 |
| 6 | 0,9 | 14 | 0,95 | 22 | 0,35 |
| 7 | 0,85 | 15 | 1 | 23 | 0,3 |
| 8 | 0,75 | 16 | 1 | 24 | 0,3 |

## E.4 RESERVA DE CARGA DOS ALIMENTADORES (SISTEMAS 69 E 135 BARRAS)

Tabela 33 - Valores horários de reserva de carga dos alimentadores reserva (p.u.) - Sistemas 69 barras e 135 barras

| Hora | Valor (p.u.) | Hora | Valor (p.u.) | Hora | Valor (p.u.) | Hora | Valor (p.u.) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0,500000 | 7 | 0,713117 | 13 | 0,197203 | 19 | 0,260000 |
| 2 | 0,693550 | 8 | 0,506667 | 14 | 0,220000 | 20 | 0,227420 |
| 3 | 0,693333 | 9 | 0,473333 | 15 | 0,303333 | 21 | 0,203333 |
| 4 | 0,696667 | 10 | 0,413333 | 16 | 0,430000 | 22 | 0,246667 |
| 5 | 0,703550 | 11 | 0,220000 | 17 | 0,395700 | 23 | 0,410000 |
| 6 | 0,708710 | 12 | 0,200000 | 18 | 0,393333 | 24 | 0,545700 |

## APÊNDICE F VALORES DE TEMPOS DE REPARO (VALORES MÉDIOS POR HORA)

Tabela 34 - Tempos de reparo médios por hora - Sistema 69 barras e 135 barras

| Hora | Tempo de reparo | Hora | Tempo de reparo |
|---|---|---|---|
| 1 | 5,21 | 13 | 3,89 |
| 2 | 5,11 | 14 | 3,7 |
| 3 | 4,94 | 15 | 4,03 |
| 4 | 4,74 | 16 | 4,37 |
| 5 | 4,67 | 17 | 5,4 |
| 6 | 4,62 | 18 | 6,25 |
| 7 | 4,65 | 19 | 6,7 |
| 8 | 4,57 | 20 | 6,92 |
| 9 | 4,48 | 21 | 6,71 |
| 10 | 4,3 | 22 | 6,53 |
| 11 | 4,16 | 23 | 5,96 |
| 12 | 4,06 | 24 | 5,58 |

# APÊNDICE G TAXAS DE FALHAS (FALHAS/KM/HORA)

## G.1 TAXAS DE FALHAS DA LINHAS DO SISTEMA 69 BARRAS

Tabela 35 - Taxas de falhas da linhas do Sistema 69 barras (falhas/km/hora)

| Linha | Taxa ($\times 10^{-4}$ /km/$h$) | Linha | Taxa ($\times 10^{-4}$ /km/$h$) | Linha | Taxa ($\times 10^{-4}$ /km/$h$) | Linha | Taxa ($\times 10^{-4}$ /km/$h$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| l1 | 0,00397 | l21 | 0,16700 | l41 | 0,40900 | l61 | 0,49700 |
| l2 | 0,00000 | l22 | 0,01170 | l42 | 0,10800 | l62 | 0,04900 |
| l3 | 0,00234 | l23 | 0,06480 | l43 | 0,01790 | l63 | 0,08690 |
| l4 | 0,01020 | l24 | 0,13700 | l44 | 0,00464 | l64 | 0,36400 |
| l5 | 0,01620 | l25 | 0,25000 | l45 | 0,04010 | l65 | 0,41700 |
| l6 | 0,30900 | l26 | 0,09980 | l46 | 0,00301 | l66 | 0,29000 |
| l7 | 0,26200 | l27 | 0,04760 | l47 | 0,00287 | l67 | 0,00522 |
| l8 | 0,07290 | l28 | 0,00340 | l48 | 0,03510 | l68 | 0,80900 |
| l9 | 0,04730 | l29 | 0,07200 | l49 | 0,29700 | l69 | 0,00000 |
| l10 | 1,27000 | l30 | 0,32400 | l50 | 0,05800 | l70 | 0,00000 |
| l11 | 0,29300 | l31 | 0,06780 | l51 | 0,04580 | l71 | 0,00009 |
| l12 | 0,85300 | l32 | 0,19800 | l52 | 0,13200 | l72 | 0,00004 |
| l13 | 1,13000 | l33 | 0,36500 | l53 | 0,20100 | l73 | 0,00006 |
| l14 | 0,80200 | l34 | 0,24500 | l54 | 0,24800 | l74 | 0,00006 |
| l15 | 0,70300 | l35 | 0,07230 | l55 | 0,47000 | l75 | 0,00006 |
| l16 | 0,18300 | l36 | 0,00656 | l56 | 0,45100 | l76 | 0,00016 |
| l17 | 0,27600 | l37 | 0,05920 | l57 | 1,84000 | l77 | 0,00000 |
| l18 | 0,00226 | l38 | 0,13200 | l58 | 0,76100 | | |
| l19 | 0,17500 | l39 | 0,01750 | l59 | 0,30100 | | |
| l20 | 0,10700 | l40 | 0,00000 | l60 | 0,29700 | | |

## G.2 TAXAS DE FALHAS DA LINHAS DO SISTEMA 135 BARRAS

Tabela 36 - Taxas de falhas da linhas do Sistema 135 barras (falhas/km/hora)

| Linha | Taxa ($\times 10^{-4}$ /km/$h$) | Linha | Taxa ($\times 10^{-4}$ /km/$h$) | Linha | Taxa ($\times 10^{-4}$ /km/$h$) | Linha | Taxa ($\times 10^{-4}$ /km/$h$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| l1 | 0,08400 | l39 | 0,25300 | l77 | 0,05130 | l115 | 0,52100 |
| l2 | 0,08440 | l40 | 0,17000 | l78 | 0,10700 | l116 | 0,57700 |
| l3 | 0,10600 | l41 | 0,08600 | l79 | 0,16200 | l117 | 0,44100 |
| l4 | 0,02770 | l42 | 0,00000 | l80 | 0,00000 | l118 | 0,48700 |
| l5 | 0,04510 | l43 | 0,26500 | l81 | 0,00000 | l119 | 0,09570 |
| l6 | 0,03130 | l44 | 0,00000 | l82 | 0,10900 | l120 | 0,09180 |
| l7 | 0,02870 | l45 | 0,07590 | l83 | 0,13500 | l121 | 0,08810 |
| l8 | 0,00000 | l46 | 0,06580 | l84 | 0,04420 | l122 | 0,25900 |
| l9 | 0,06310 | l47 | 0,49300 | l85 | 0,02110 | l123 | 0,00000 |
| l10 | 0,30500 | l48 | 0,17700 | l86 | 0,10400 | l124 | 0,03650 |
| l11 | 0,52600 | l49 | 0,49200 | l87 | 0,19800 | l125 | 0,07110 |
| l12 | 0,00000 | l50 | 0,24200 | l88 | 0,02180 | l126 | 0,08520 |
| l13 | 0,34300 | l51 | 0,16500 | l89 | 0,26900 | l127 | 0,06820 |
| l14 | 0,00000 | l52 | 0,08310 | l90 | 0,43400 | l128 | 0,09640 |
| l15 | 0,00000 | l53 | 0,07130 | l91 | 0,07600 | l129 | 0,26200 |
| l16 | 0,16000 | l54 | 0,20000 | l92 | 0,21500 | l130 | 0,06530 |
| l17 | 0,16600 | l55 | 0,04500 | l93 | 0,26200 | l131 | 0,24200 |
| l18 | 0,30100 | l56 | 0,21800 | l94 | 0,19500 | l132 | 0,04310 |
| l19 | 0,18200 | l57 | 0,08650 | l95 | 0,17300 | l133 | 0,10600 |
| l20 | 1,03000 | l58 | 0,04050 | l96 | 0,07110 | l134 | 7,96000 |
| l21 | 0,12700 | l59 | 0,06800 | l97 | 0,17400 | l135 | 1,70000 |
| l22 | 0,05750 | l60 | 0,12200 | l98 | 0,28400 | l136 | 0,88200 |
| l23 | 0,02640 | l61 | 0,00000 | l99 | 0,16200 | l137 | 2,76000 |
| l24 | 0,00146 | l62 | 0,14300 | l100 | 0,34800 | l138 | 1,71000 |
| l25 | 0,05920 | l63 | 0,00000 | l101 | 0,24100 | l139 | 1,52000 |
| l26 | 0,54400 | l64 | 0,05600 | l102 | 0,00000 | l140 | 1,12000 |
| l27 | 0,42200 | l65 | 0,14800 | l103 | 0,07760 | l141 | 0,81900 |
| l28 | 0,05800 | l66 | 0,00000 | l104 | 0,37400 | l142 | 0,00000 |
| l29 | 0,00000 | l67 | 0,02560 | l105 | 0,42800 | l143 | 0,00000 |
| l30 | 0,21400 | l68 | 0,04000 | l106 | 0,03120 | l144 | 0,00000 |
| l31 | 0,48500 | l69 | 0,00000 | l107 | 0,28000 | l145 | 0,00000 |
| l32 | 0,03790 | l70 | 0,13100 | l108 | 0,48000 | l146 | 0,00000 |
| l33 | 0,13000 | l71 | 0,05050 | l109 | 0,09120 | l147 | 0,00000 |
| l34 | 0,00000 | l72 | 0,15800 | l110 | 0,04140 | l148 | 0,00000 |
| l35 | 0,88100 | l73 | 0,05270 | l111 | 0,29800 | l149 | 0,00000 |
| l36 | 0,00000 | l74 | 0,37700 | l112 | 0,32100 | | |
| l37 | 0,00000 | l75 | 0,09970 | l113 | 0,30400 | | |
| l38 | 0,17200 | l76 | 0,38500 | l114 | 0,06850 | | |

# APÊNDICE H DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO SISTEMA 69 BARRAS

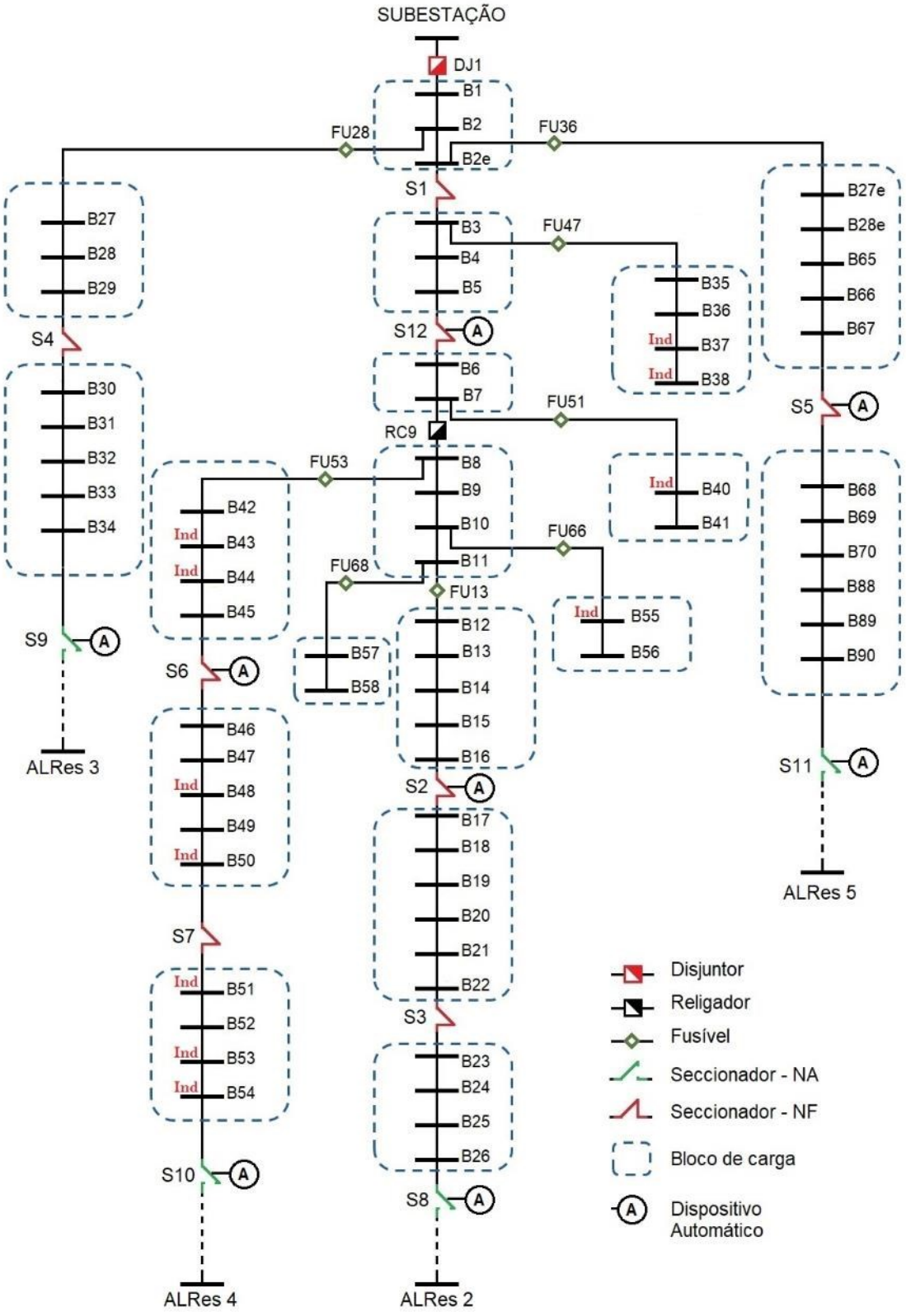



Figura 41 - Sistema IEEE de 69 barras modificado, mostrando a configuração de blocos de carga e os dispositivos de proteção e manobra.

# APÊNDICE IDIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO SISTEMA 135 BARRAS

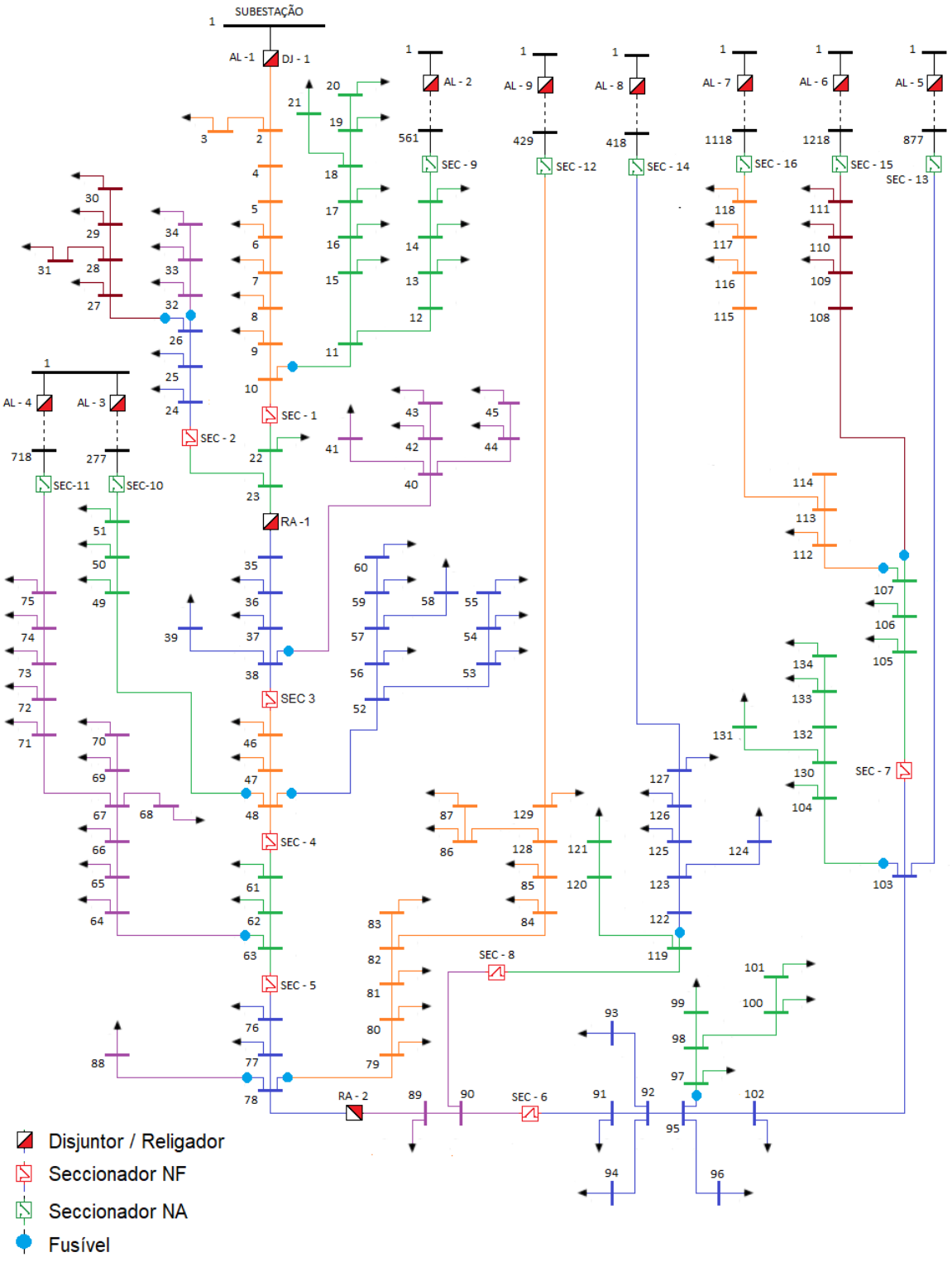



Figura 42 - Sistema 135 barras modificado, mostrando a configuração de blocos de carga (cores) e os dispositivos de proteção e manobra.