UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA

AMILCAR ALONSO VARGAS PERALTA

HEURÍSTICA ESPECIALIZADA APLICADA AO PROBLEMA DE SEQUENCIAMENTO ÓTIMO DE CHAVES EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

Ilha Solteira
2024

AMILCAR ALONSO VARGAS PERALTA

HEURÍSTICA ESPECIALIZADA APLICADA AO PROBLEMA DE SEQUENCIAMENTO ÓTIMO DE CHAVES EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

Trabalho de Graduação apresentado à Faculdade de Engenharia do Câmpus de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Prof. Dr. Leonardo Henrique Faria Macedo Possagnolo
Orientador

Ilha Solteira

2024

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Peralta, Amilcar Alonso Vargas.
P427h Heurística especializada aplicada ao problema de sequenciamento ótimo de chaves em redes de distribuição / Amilcar Alonso Vargas Peralta. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024
62 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2024

Orientador: Leonardo Henrique Faria Macedo Possagnolo

Inclui bibliografia

1. Energia não suprida. 2. Heurística. 3. Otimização de redes de distribuição. 4. Sequenciamento de chaves.

Erika Renata Bocchi Lomba
Bibliotecária - CRB/8 -10792
Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Ilha Solteira

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos onze dias do mês de janeiro do ano de dois mil e vinte e quatro, o discente ***Amilcar Alonso Vargas Peralta***, matriculado sob o nº 161052321, tendo como banca examinadora o seu orientador, *o Prof. Dr. Leonardo Henrique Faria Macedo Possagnolo, Dr. Lucas do Carmo Yamaguti e o Doutorando Rafael Yuki de Souza Yamamoto*, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado **"Heurística especializada aplicada ao problema de sequenciamento ótimo de chaves em redes de distribuição"**, obtendo a nota 10,0 (DEZ VIRGULA ZERO.) e conceito APROVADO.

Leonardo H. F. M. Possagnolo

Prof. Dr. Leonardo Henrique Faria Macedo Possagnolo
- Orientador-

Amilcar Alonso Vargas Peralta

Amilcar Alonso Vargas Peralta
- Discente -

Lucas do Carmo Yamaguti

Dr. Lucas do Carmo Yamaguti
- Membro da Banca -

Rafael Y. S. Yamamoto

Doutorando Rafael Yuki de Souza Yamamoto
- Membro da Banca -

RESUMO

O presente trabalho pretende conceitualizar e implementar computacionalmente um algoritmo heurístico especializado aplicado ao problema de sequenciamento ótimo de chaves de alimentadores primários em redes de distribuição de energia elétrica radiais. Desta forma, pretende-se estabelecer uma ordem ótima na qual as chaves de um sistema devem ser manobradas para levar a rede desde uma configuração inicial até uma configuração final. A proposta é conceitualmente simples, mas que pode auxiliar de forma significativa os operadores de redes de distribuição na difícil tarefa de alterar a topologia das redes elétricas, evitando estruturas intermediárias infactíveis, utilizando nenhuma ou quase nenhuma análise de fluxo de potência. O desempenho do algoritmo proposto é avaliado em vários cenários de falta permanente no sistema teste de 53 barras. Os resultados obtidos qualificam sua robustez e eficácia em tempos de processamento médio de 0,0005 segundos para o sistema selecionado.

Palavras-chave: Energia não suprida. Heurística. Otimização de redes de distribuição. Sequenciamento de chaves.

ABSTRACT

The present work aims to conceptualize and computationally implement a specialized heuristic algorithm applied to the problem of optimal switching sequencing of primary feeder switches in radial electricity distribution networks. In this way, the objective is to establish the optimal order in which the switches in a system should be maneuvered to take the network from an initial configuration to a final configuration. The proposal is conceptually simple, but can significantly assist distribution network operators in the difficult task of changing the topology of power grids, avoiding infeasible intermediate structures using no or almost no power flow evaluation. The performance of the proposed algorithm is evaluated in various permanent fault scenarios in the 53-bus test system. The results obtained qualify its robustness and effectiveness in average processing times of 0.0005 seconds for the selected system.

Keywords: Energy not supplied. Heuristics. Optimization of distribution networks. Switching sequence.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Sistema de 53 nós 19
Figura 2 – Falta no nó 11 20
Figura 3 – Falta no nó 3 21
Figura 4 – RNP dos nós conectados à SE 101 24
Figura 5 – Ordenamento em camadas 25
Figura 6 – Falta no nó 11 29
Figura 7 – RNP da configuração final após falta no nó 11 29
Figura 8 – Aplicação dos Conjuntos-R de forma independente no Cenário 1 33
Figura 9 – Falta no nó 3 35
Figura 10 – RNP da configuração final após falta no nó 3 35
Figura 11 – Energia não suprida 37
Figura 12 – Possíveis combinações de reconexão 39
Figura 13 – Sistema de 53 nós 49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Lista de chaves que devem ser operadas após uma falta no nó 11 20
Tabela 2 – Lista de chaves que devem ser operadas após uma falta no nó 3 21
Tabela 3 – Lista de chaves que devem ser operadas após uma falta no nó 11 30
Tabela 4 – Conjunto-R #1 do Cenário 1 30
Tabela 5 – Conjuntos de chaveamento para o Cenário 1 31
Tabela 6 – Lista de chaves que devem ser operadas após uma falta no nó 3 34
Tabela 7 – Conjunto-RF #1 do Cenário 2 36
Tabela 8 – Conjuntos de chaveamento para o Cenário 2 36
Tabela 9 – Opções para sequência de chaveamento 38
Tabela 10 – Coeficiente de restauração: Fase 1 41
Tabela 11 – Coeficiente de restauração: Fase 2 41
Tabela 12 – Coeficiente de restauração: Fase 3 41
Tabela 13 – Sequência de chaveamento para o Cenário 1 42
Tabela 14 – Conjuntos de chaveamento para o Cenário 2 45
Tabela 15 – Grupos-conjunto do Cenário 2 no início do Passo 2 da Fase 1 45
Tabela 16 – Grupos-conjunto do Cenário 2 após o Passo 2 da Fase 1 46
Tabela 17 – Grupos-conjunto do Cenário 2 após o Passo 3 da Fase 1 46
Tabela 18 – Grupos-conjunto do Cenário 2 após o Passo 8 da Fase 1 47
Tabela 19 – Grupos-conjunto do Cenário 2 após o Passo 3 da Fase 2 47
Tabela 20 – Grupos-conjunto do Cenário 2 após o Passo 3 da Fase 3 47
Tabela 21 – Sequência de chaveamento para o Cenário 2 48
Tabela 22 – Resultados para cenário de falta em 1, 3 e 11 50
Tabela 23 – Resultados para cenário de falta em 14, 21 e 30 50
Tabela 24 – Dados das barras do Sistema de 53 barras 57
Tabela 25 – Dados das chaves do Sistema de 53 barras 58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AV	Alimentador Vinculado
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
DFS	*Depth-First Search*
ENS	Energia Não Suprida
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
RNP	Representação Nó-Profundidade
SE	Subestação
SOC	Sequenciamento Ótimo de Chaves

LISTA DE SÍMBOLOS

ϵ	Valor real positivo próximo a zero
C_R	Coeficiente de restauração
i	Índice de nó
I_i^k	Corrente nodal no nó i durante a iteração k
J_L^k	Corrente no ramo L durante a iteração k
k	Índice de iteração
P_{SE}^k	Potência ativa fornecida pela subestação
S_i	Potência complexa no nó i
t_{TR}	Tempo total de reparo da falha
V_i^k	Fasor tensão no nó i durante a iteração k
Y_i	Soma de todos os elementos shunt existentes no nó i
Z_L	Impedância do ramo L

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 17
1.1 Justificativa 18
1.2 Objetivos 18
1.3 Sistema teste selecionado 19
1.3.1 Cenário 1 - Falta no nó de carga 11 19
1.3.2 Cenário 2 - Falta no nó de carga 3 20
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO 21

2 SISTEMAS RADIAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA 23
2.1 Representação nó-profundidade 23
2.2 Fluxo de potência em sistemas de distribuição 24
2.2.1 A organização em camadas da rede 24
2.2.2 O processo *backward* 25
2.2.3 O processo *forward* 25
2.2.4 Critério de parada 25

3 HEURÍSTICA ESPECIALIZADA APLICADA AO PROBLEMA DE SEQUENCIAMENTO ÓTIMO DE CHAVES 27
3.1 Etapa I: os conjuntos de chaveamento 28
3.1.1 Conjunto de restauração 28
3.1.2 Conjunto de reconfiguração 34
3.2 Etapa II: como ordenar os conjuntos de chaveamento 36
3.2.1 Energia não suprida 37
3.2.2 Relação entre a ENS e os conjuntos de chaveamento 38
3.2.3 Coeficiente de restauração 39
3.2.4 Grupo-conjunto de chaveamento 42
3.2.5 Conjuntos-R em cascata 44

4 TESTES E RESULTADOS 49
4.1 Teste usando o sistema de 53 barras 49

5 CONCLUSÕES 53

REFERÊNCIAS 55

ANEXO A – DADOS DO SISTEMA TESTE DE 53 BARRAS 57

1 INTRODUÇÃO

A sociedade atual cada vez mais conta com a eletricidade para seu normal desenvolvimento, o que aumenta a expectativa dos usuários em relação à manutenção contínua do fornecimento desse serviço. Porém, faltas permanentes devido a condições de sobrecarga, condições climáticas adversas, mau funcionamento de equipamentos, ou falhas humanas, ocasionam a interrupção indesejada do fornecimento de energia elétrica aos usuários. Após a ocorrência e isolamento de uma falta permanente, dois problemas devem ser resolvidos:

- ***O problema de restauração*** – consiste em identificar as chaves que devem ser operadas para restabelecer o fornecimento de energia elétrica à máxima quantidade de demanda que foi desenergizada após o isolamento de uma falta permanente. O resultado do problema de restauração é o grupo de chaves que deve ser operado para restaurar a maior quantidade de carga.
- ***O problema de sequenciamento ótimo de chaves*** – este problema utiliza como dado de entrada o grupo de chaves obtido após a resolução do problema de restauração. Desta forma, o problema de sequenciamento identifica a ordem na qual as chaves devem ser operadas. O objetivo do problema é minimizar a energia não suprida durante o processo de operação das chaves para levar o sistema desde a configuração pós-falta (configuração obtida após o isolamento da falta permanente) até a configuração final (sistema restaurado).

Neste trabalho, é abordado o problema de sequenciamento ótimo de chaves (SOC) por meio de uma heurística especializada. Na literatura existem poucos trabalhos que abordam o problema de SOC apesar do seu grande potencial para auxiliar os operadores das redes de distribuição. No estado de operação emergencial, após um evento de falta permanente, os operadores do sistema enfrentam uma pressão muito alta para agir de forma rápida e eficiente. Nesse sentido, os operadores devem ser corretamente assistidos por ferramentas computacionais que auxiliem o processo de tomada de decisão. Além disso, sistemas modernos e automatizados podem, também, se beneficiar de algoritmos eficientes de sequenciamento de chaves, pois o tomador de decisões deve implementar ações adequadas em um curto intervalo de tempo, respeitando as restrições físicas e operacionais da rede.

Em (WATANABE; NODU, 2004) é proposta uma técnica baseada na metaheurística algoritmo genético para resolver o problema de SOC minimizado o valor da energia não fornecida.

Em (SOUZA, 2018), apresenta-se um modelo de programação cônica de segunda ordem inteira mista para o problema de SOC que minimiza a energia não suprida durante o processo de restauração.

Em (RAMOS; FRANCO; TELES, 2019), técnicas de linearização são aplicadas para formular um modelo de programação linear inteira mista com reduzido custo computacional para o problema de sequenciamento de chaves.

1.1 JUSTIFICATIVA

O problema de SOC tem sido resolvido por poucos pesquisadores na literatura especializada. No entanto, a solução deste problema pode beneficiar as empresas distribuidoras e os consumidores conectados à rede elétrica. Por se tratar de um problema de alta complexidade que deve ser resolvido em tempo real, a técnica de otimização escolhida precisa ser bem estruturada e executada. Ao observar o estado de arte do problema, algoritmos baseados em heurística não são geralmente aplicados para resolver o problema de SOC. Contudo, algoritmos heurísticos se apresentam como formas simples de resolver um problema de otimização, com fácil implementação e reduzido esforço computacional.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é fornecer uma heurística especializada, rápida e eficiente, como ferramenta de solução do problema de SOC em redes de distribuição. Para isso, os seguintes objetivos específicos são considerados:

a) Propor um algoritmo que utilize nenhuma ou quase nenhuma análise de fluxo de potência. Reduzir o número de vezes que o cálculo de fluxo de potência é efetuado permite diminuir o tempo total necessário de execução do algoritmo para aplicações em tempo real.

b) Representar um sistema de distribuição por meio de uma codificação baseada na teoria de grafos.

c) Identificar quais são os tipos de chaveamento que reestabelecem o fornecimento de energia aos consumidores conectados à rede.

d) Identificar quais são os tipos de chaveamento que permitem a execução de manobras que reconectem cargas à rede principal de distribuição.

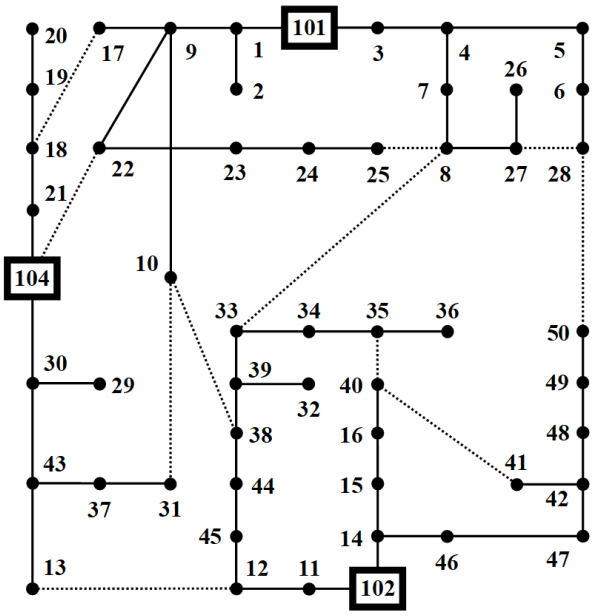
e) Definir a melhor ordem em que a operação de chaves deve ser realizada sem violar os limites de tensão e corrente em todos os estágios do algoritmo.

f) Minimizar o valor de energia não suprida do sistema de distribuição após a ocorrência de uma falta permanente.

1.3 SISTEMA TESTE SELECIONADO

O sistema teste considerado neste trabalho é o sistema radial de distribuição apresentado na Figura 1. Este sistema tem tensão nominal de 13,8 kV e possui 53 barras, 3 subestações e 61 circuitos. Os detalhes deste sistema se encontram em (ROMERO *et al.*, 2016) e no Anexo A.

Figura 1 – Sistema de 53 nós



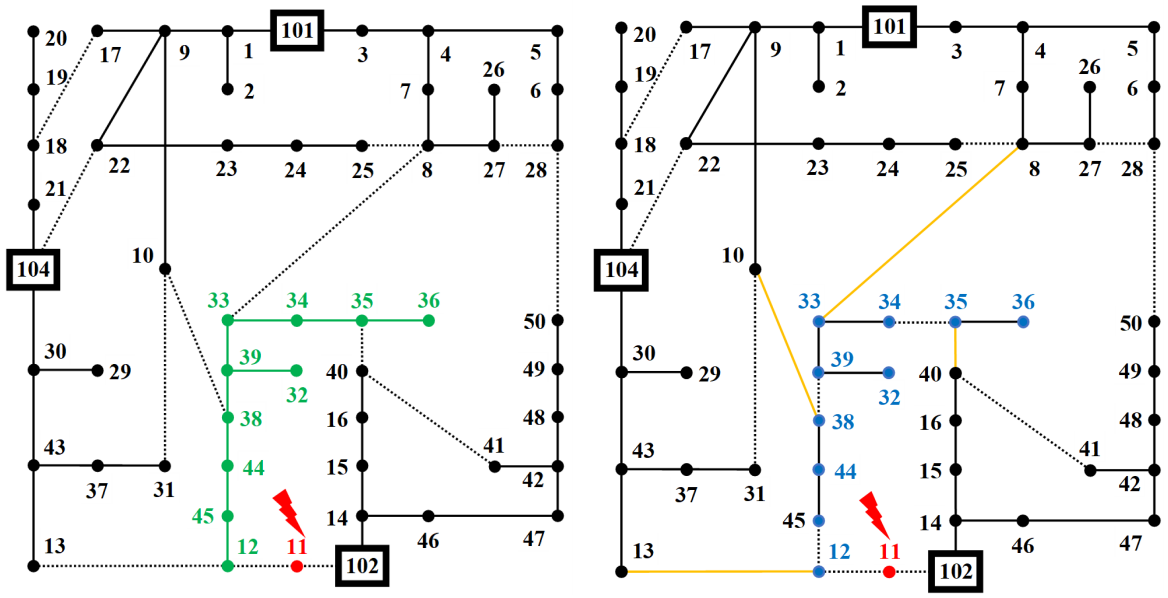
Fonte: Elaborado pelo autor

Dois cenários de falta são analisados ao longo do documento. O primeiro cenário é uma falta permanente no nó de carga 11. O segundo cenário é uma falta permanente no nó de carga 3. O grupo de chaves que devem ser manobradas se encontram disponíveis na literatura (ROMERO *et al.*, 2016). É importante observar que a referência (ROMERO *et al.*, 2016) não fornece a ordem na qual as chaves devem ser operadas. Neste trabalho pretende-se definir a ordem ótima de chaveamento no menor tempo possível.

1.3.1 Cenário 1 - Falta no nó de carga 11

O primeiro cenário é apresentado na Figura 2 e considera uma falta permanente no nó de carga 11. A configuração pós-falta é obtida após o isolamento do nó em falta e é mostrada na Figura 2a. O nó com falta aparece na cor vermelha e os nós desenergizados aparecem na cor verde. A configuração final é detalhada na Figura 2b, em que os nós reconectados aparecem na cor azul. A lista de chaves que devem ser operadas para levar o sistema desde a configuração pós-falta até a configuração final é apresentada na Tabela 1.

Figura 2 – Falta no nó 11



(a) Configuração Pós-falta (b) Configuração Final

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 1 – Lista de chaves que devem ser operadas após uma falta no nó 11

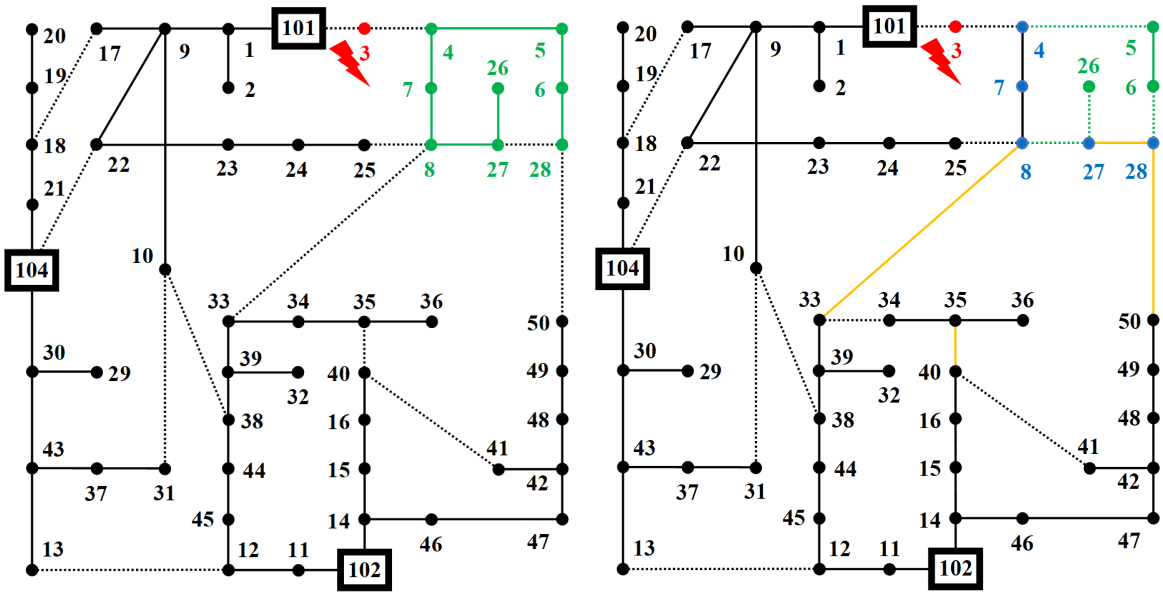
Estado na configuração final	Chave
Abrir	35-34
Abrir	39-38
Abrir	45-12
Fechar	8-33
Fechar	10-38
Fechar	13-12
Fechar	35-40

Fonte: Elaborado pelo autor

1.3.2 Cenário 2 - Falta no nó de carga 3

No segundo cenário (Figura 3), a ocorrência de uma falta permanente no nó 3 é considerada. Na Figura 3a, o nó 3, na cor vermelha, é isolado obtendo a configuração pós-falta. Os nós desenergizados aparecem na cor verde. A configuração final é apresentada na Figura 3b, em que os nós reenergizados aparecem na cor azul. As chaves que devem ser abertas e fechadas para obter a configuração final do sistema são apresentadas na Tabela 2. É importante observar que neste cenário não é possível reconectar todas as cargas e os nós 5, 6, e 26 permanecem sem fornecimento.

Figura 3 – Falta no nó 3



(a) Configuração Pós-falta (b) Configuração Final

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 2 – Lista de chaves que devem ser operadas após uma falta no nó 3

Estado na configuração final	Chave
Abrir	27-8
Abrir	5-4
Abrir	28-6
Abrir	27-26
Abrir	34-33
Fechar	8-33
Fechar	28-50
Fechar	28-27
Fechar	35-40

Fonte: Elaborado pelo autor

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos. No Capítulo 1, faz-se uma introdução onde se define o problema de sequenciamento ótimo de chaves, chamando de problema de SOC, além de explicar a relação do problema de SOC com o problema de restauração de redes de distribuição. No Capítulo 2, é apresentada a representação nó-profundidade e o algoritmo de cálculo de fluxo de potência para redes de distribuição.

No Capítulo 3, é detalhada e analisada a heurística especializada para resolver o problema de SOC. Para facilitar o entendimento do algoritmo e melhorar a didática do trabalho, exemplos são utilizados para esclarecer o uso dos passos que constituem a heurística proposta. No Capítulo 4, são apresentados os testes para o problema de SOC e, finalmente, no Capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões do trabalho. No Anexo A, são mostrados os dados do sistema teste utilizado.

2 SISTEMAS RADIAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

As redes de distribuição de energia elétrica geralmente seguem um planejamento malhado e uma operação radial. A configuração radial simplifica a coordenação de proteção e minimiza as correntes de curto-circuito (LAVORATO *et al.*, 2012). Por outro lado, a estrutura malhada viabiliza a implementação de práticas operacionais, como a reconfiguração para diminuir perdas, a restauração de consumidores durante contingências, e a execução de manutenções programadas e não programadas nos circuitos e equipamentos (LAVORATO *et al.*, 2012).

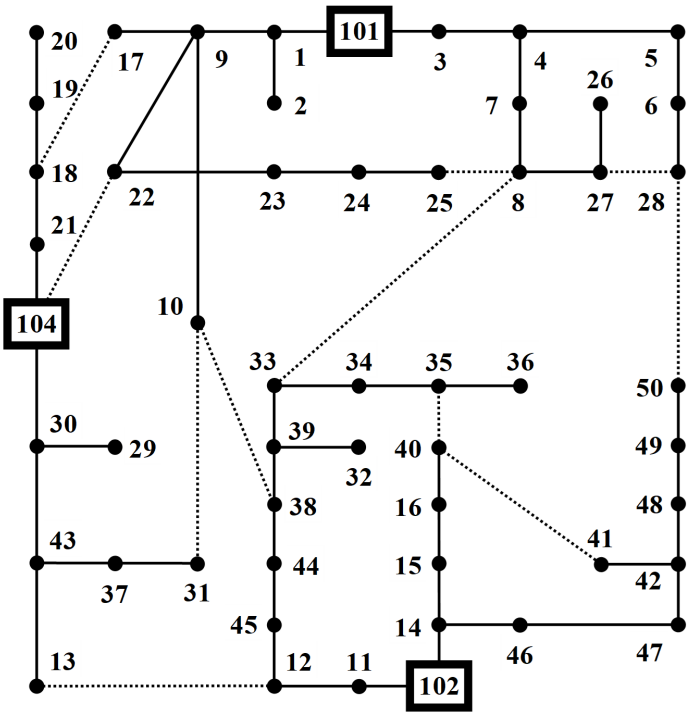
2.1 REPRESENTAÇÃO NÓ-PROFUNDIDADE

A estrutura radial das redes de distribuição pode ser comparada a grafos acíclicos, onde cada barra é equivalente a um nó, e cada trecho ou ramo conectando duas barras é representado por uma aresta (DELBEM *et al.*, 2004). Uma maneira eficaz de organizar grafos acíclicos em matrizes é por meio da técnica conhecida como representação nó-profundidade (RNP) (DELBEM *et al.*, 2004).

A RNP emprega matrizes para organizar grafos acíclicos, conhecidos como árvores. A representação de uma árvore envolve a disposição dos nós e suas profundidades em relação a um nó raiz. Neste contexto, a RNP utiliza o número total de nós, N, para criar uma matriz de dimensão $2 \times N$. Nessa matriz, uma linha é dedicada aos nós, enquanto a outra indica a profundidade de cada nó em relação ao nó raiz. Os dados da matriz são compostos por pares ordenados (n, p), gerados à medida que cada nó é visitado durante uma busca em profundidade (do inglês, *depth-first search*). A Figura 4 ilustra a aplicação da RNP nos alimentadores que iniciam na SE 101 do sistema teste de 53 nós (ver seção 1.3).

Na Figura 4, a SE 101 é apresentada conforme a RNP, destacando os nós e suas profundidades. A SE 101 conecta os nós 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 17, 22, 23, 24, 25, 26, 27, e 28. A representação tem início no nó raiz 101, ao qual é atribuída a profundidade zero (0), resultando no par ordenado (101, 0). Ao visitar o nó 3, sua distância em relação ao nó raiz leva à atribuição de profundidade 1, gerando o par ordenado (3, 1). Da mesma maneira, os nós subsequentes 4, 5, 6, e 28 recebem profundidade segundo a sua distância ao nó raiz, formando os pares ordenados (4, 2), (5, 3), (6, 4), e (28, 5). Prosseguindo com a busca em profundidade, os nós 7, 8, 27, e 26 são visitados, originando os pares ordenado (7, 3), (8, 4), (27, 5), e (26, 6). Continuando com a busca em profundidade, os nós 1, 2, 9, 17, 22, 23, 24, 25, e 10 são visitados, gerando os pares ordenados (1,1), (2,2), (9,2), (17,3), (22,3), (23,4), (24,5), (25,6), e (10,3). O mesmo procedimento pode ser repetido para a SE

Figura 4 – RNP dos nós conectados à SE 101



SE 101 =

																			← profundidade
0	1	2	3	4	5	3	4	5	6	1	2	2	3	3	4	5	6	3	
101	3	4	5	6	28	7	8	27	26	1	2	9	17	22	23	24	25	10	← nó

Fonte: Elaborado pelo autor

102 e a SE 104.

2.2 FLUXO DE POTÊNCIA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

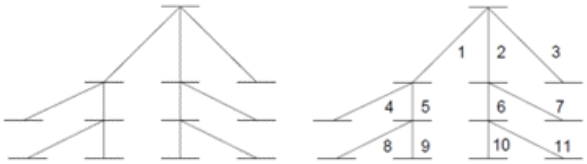
O método de fluxo por varredura, proposto por (SHIRMOHAMMADI *et al.*, 1988), representa um algoritmo iterativo para fluxo de potência amplamente empregado na resolução de problemas em redes de distribuição. Este método é aplicável em redes radiais sendo reconhecido por sua eficiência computacional e robustez. O fluxo por varredura consiste em quatro etapas principais: i) a organização em camadas da rede, ii) o processo *backward*, iii) o processo *forward*, e iv) a verificação do critério de parada.

2.2.1 A organização em camadas da rede

O fluxo de potência por varredura adota uma abordagem orientada a ramos. Para otimizar o desempenho numérico desse método, foi proposto um esquema eficiente de numeração dos ramos. No processo de ordenamento, os ramos do sistema são agrupados em camadas com base em sua proximidade ao nó raiz. Um exemplo dessa numeração é ilustrado na Figura 5, onde a numeração dos ramos de uma camada em uma rede de distribuição (Figura 5a) só se inicia após a conclusão da numeração de todos os ramos

da camada anterior (Figura 5b). Após o ordenamento em camadas, é atribuída a cada nó da árvore uma tensão inicial equivalente à tensão do nó raiz (geralmente 1,0 p.u.), e o processo iterativo, composto pelas etapas *backward* e *forward*, é iniciado.

Figura 5 – Ordenamento em camadas



(a) rede (b) rede com camadas

Fonte: Elaborado pelo autor

2.2.2 O processo *backward*

O processo *backward* envolve percorrer o sistema pelos ramos, começando das camadas mais externas até as mais internas. Esse procedimento tem início com o cálculo das correntes nodais, seguido pela determinação das correntes nos ramos. Este cálculo é realizado a partir das camadas finais em direção ao nó raiz.

A fórmula para o cálculo da corrente nodal no nó i durante a iteração k é dada por $I_i^k = (S_i/V_i^{k-1})^* - Y_i V_i^{k-1}$, onde S_i representa a injeção de potência e Y_i é a soma de todos os elementos shunt existentes no nó i. O cálculo da corrente J_L no ramo L, conectando os nós $i - j$ em um sistema com n ramos conectados à jusante da barra j, é expresso como $J_L^k = -I_j^k + \sum_{a=1}^{n} J_{j-a}^k$.

2.2.3 O processo *forward*

No processo *forward* se percorre o sistema através dos trechos desde a primeira camada até a última, recalculando as tensões nodais da rede. O procedimento tem início no nó raiz, calculando a tensão nos nós finais dos trechos pertencentes à primeira camada. Em seguida, calcula-se a tensão nos nós finais dos trechos da segunda camada e assim por diante. Para dois nós, i e j, em que i está mais próximo ao nó raiz, a relação de tensão entre esses dois nós é expressa por, $V_j^k = V_i^k - Z_L J_L^k$.

2.2.4 Critério de parada

O critério de parada considerado no presente trabalho é um teste de convergência onde a diferença na potência ativa fornecida pela subestação (P_{SE}) entre duas iterações consecutivas k e $k-1$ deve ser menor que um valor real positivo próximo a zero (ϵ), $|P_{SE}^k - P_{SE}^{k-1}| < \epsilon$.

3 HEURÍSTICA ESPECIALIZADA APLICADA AO PROBLEMA DE SEQUENCIAMENTO ÓTIMO DE CHAVES

Nesta seção, apresenta-se um algoritmo heurístico para obter a sequência de chaveamentos. Após a ocorrência de uma falta permanente e isolamento da região afetada, um algoritmo de restauração identifica as chaves que devem mudar de estado para reconectar a maior quantidade de carga na rede elétrica (ROMERO *et al.*, 2016). É importante notar que, usualmente, os algoritmos de restauração não fornecem a sequência em que as chaves devem ser manobradas. O objetivo do problema de SOC é minimizar o valor de energia não suprida do sistema. O algoritmo proposto visa identificar a ordem em que as chaves do sistema devem ser manobradas, levando a rede da configuração pós-falta à configuração final. Esta ordem deve atender aos seguintes requisitos:

Requisito 1: Evitar a geração de configurações intermediárias infactíveis.

Requisito 2: Nos casos que exigem o remanejamento de cargas energizadas (cargas não afetadas pela falta permanente), o algoritmo deve considerar a reconexão dessas cargas com prioridade.

Requisito 3: A sequência de chaveamento deve ser gerada no menor tempo possível para aplicações em tempo real.

O primeiro requisito garante que as restrições técnicas e operacionais sejam respeitadas durante o processo de sequenciamento. Em relação ao segundo requisito, as empresas distribuidoras conduzem a transferência de carga energizada de maneira imediata, ou seja, os chaveamentos de abertura e fechamento são realizados sequencialmente. A execução consecutiva dessas manobras evita o risco de deteriorar os indicadores de continuidade associados à frequência de desligamento dos usuários, como o FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora). O FEC é um indicador de frequência de desligamento que se relaciona com a quantidade de vezes que um usuário enfrenta a interrupção no fornecimento de energia por um período mínimo contínuo em uma janela de tempo específica. No contexto brasileiro, o FEC aumenta quando os usuários enfrentam uma interrupção no fornecimento de energia elétrica por um intervalo mínimo contínuo superior a 3 minutos. O terceiro requisito está vinculado com a natureza emergencial do problema de SOC que deve fornecer resultados em tempos reduzidos.

Durante um incidente de falta permanente, a redução da energia não suprida é um dos indicadores de continuidade otimizados pelo tomador de decisões para a geração da sequência de chaveamentos. Para atender a essa exigência, sugere-se, neste trabalho, a aplicação do conceito de conjuntos de chaveamentos. Esses conjuntos são caracterizados como grupos de chaves operadas de maneira sequencial e independente, visando restaurar

ou reconfigurar uma região específica do sistema.

3.1 ETAPA I: OS CONJUNTOS DE CHAVEAMENTO

Os conjuntos de chaveamento são caracterizados como agrupamentos de chaves que realizam a restauração ou reconfiguração de uma região na rede, mantendo a conformidade com a restrição de radialidade do sistema de distribuição.

Duas categorias de conjuntos de chaveamento são reconhecidas: os conjuntos de restauração (Conjunto-R), que restabelecem o fornecimento de energia em seções de carga desenergizadas, e os conjuntos de reconfiguração (Conjunto-RF), que realocam seções de cargas energizadas entre alimentadores adjacentes. Esta seção introduz uma técnica heurística para a identificação de cada conjunto de chaveamento, juntamente com as chaves que o compõem.

3.1.1 Conjunto de restauração

A única maneira de reenergizar as cargas é por meio do fechamento de chaves. Entretanto, simplesmente fechar uma chave não assegura a conformidade com as restrições operacionais, como a necessidade de manter a radialidade da rede. Geralmente, para garantir que as restrições operacionais sejam atendidas, o fechamento de uma chave deve ser precedido pela abertura de uma ou várias outras chaves. O conjunto composto por uma chave que restaura a carga e as chaves que precisam ser abertas para manter a radialidade no sistema é denominado conjunto de restauração.

Antes de apresentar os passos para identificar os Conjuntos-R, é necessário lembrar a definição de configuração pós-falta. A configuração pós-falta é a topologia da rede obtida após abrir as chaves que isolam a falta permanente para preservar a integridade física do sistema. O algoritmo para construir os Conjuntos-R possui os seguintes passos:

Passo 1. Identificar as chaves que mudam de estado entre a configuração pós-falta e a configuração final. Prosseguir para o Passo 2.

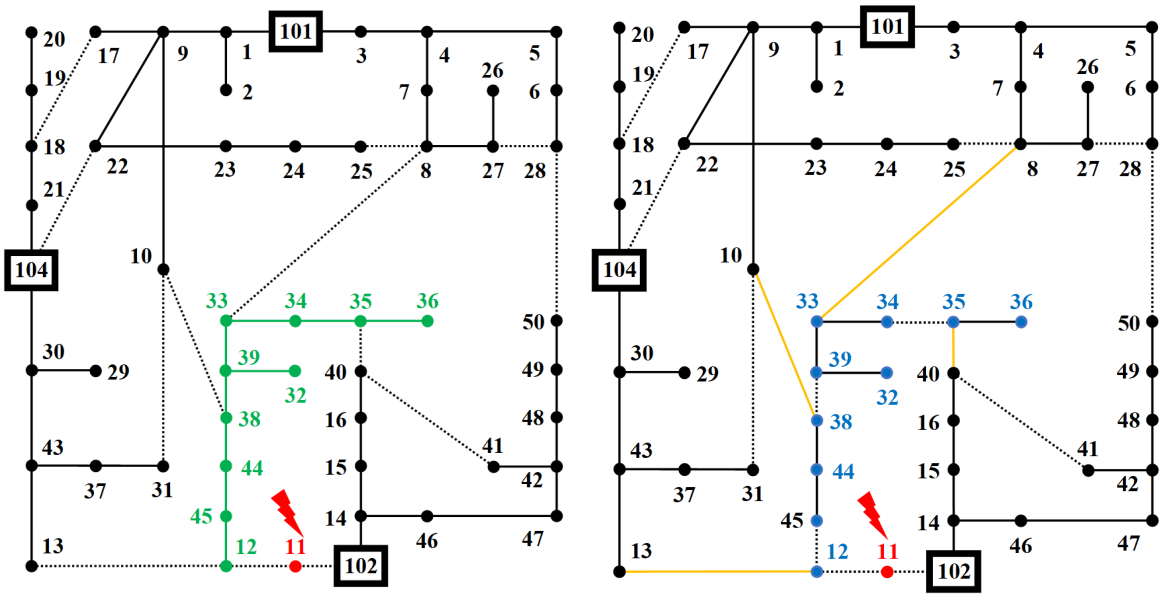
Passo 2. Escolher uma chave com estado fechado na configuração final, tendo, no mínimo, um extremo desenergizado na configuração pós-falta. Criar um novo Conjunto-R com a chave selecionada e avançar para o Passo 3. Caso contrário, seguir para o Passo 4.

Passo 3. Com o sistema na configuração final, construir uma subárvore com nó raiz no extremo de maior profundidade (ver seção 2.1) da chave escolhida no Passo 2. As chaves que delimitam a subárvore são aquelas identificadas no Passo 1; no entanto, apenas as chaves no estado aberto na configuração final são adicionadas ao Conjunto-R. Cada chave adicionada ao Conjunto-R é colocada no início do conjunto. Retornar ao Passo 2 e escolher uma chave diferente.

Passo 4. Conclusão do algoritmo.

Como exemplo didático, apresenta-se a implementação dos passos acima descritos no Cenário 1 do sistema teste selecionado (ver seção 1.3.1). Na Figura 6 são apresentadas as configurações pós-falta e final. A Figura 7 apresenta a RNP do sistema na configuração final, em que as três matrizes representam as árvores com início na SE 101, 102, e 104. A Tabela 3 mostra as chaves que devem ser operadas.

Figura 6 – Falta no nó 11



(a) Configuração pós-falta (b) Configuração final

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 7 – RNP da configuração final após falta no nó 11

0	1	2	3	4	5	3	4	5	6	5	6	6	7	1	2	2	3	4	5	6	7	3	4	5	6
101	3	4	5	6	28	7	8	27	26	33	34	39	32	1	2	9	17	22	23	24	25	10	38	44	45

0	1	2	3	4	5	5	6	7	2	3	4	5	6
102	14	46	47	42	41	48	49	50	15	16	40	35	36

0	1	2	3	4	1	2	2	3	4	3	4
104	21	18	19	20	30	29	43	37	31	13	12

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 3 – Lista de chaves que devem ser operadas após uma falta no nó 11

Estado na configuração final	Chave
Abrir	35-34
Abrir	39-38
Abrir	45-12
Fechar	8-33
Fechar	10-38
Fechar	13-12
Fechar	35-40

Fonte: Elaborado pelo autor

Iniciando com o Passo 1, as chaves que mudam de estado aparecem na Tabela 3. No Passo 2, a chave fechada 8-33 é selecionada. Segundo os critérios apresentados, essa chave é selecionada porque o nó 33 está desenergizado na configuração pós-falta. Com a chave 8-33 se cria o Conjunto-R #1. Para o Passo 3, o nó 33 é selecionado como nó raiz da subárvore que vai ser construída porque o nó 33 tem maior profundidade que o nó 8 na configuração final. Na Figura 7 se observa que os nós 8 e 33 possuem profundidades com valores de 4 e 5, respectivamente. A subárvore com início no nó 33 é composta pelos nós 33, 34, 39, e 32. As chaves que limitam essa subárvore são as chaves 35-34 e 39-38. Como essas chaves se encontram no estado aberto na configuração final, essas chaves são adicionadas uma a uma no início do Conjunto-R #1. Com isto finaliza-se a formação do Conjunto-R #1.

Tabela 4 – Conjunto-R #1 do Cenário 1

Estado	Chave
Aberta	39-38
Aberta	35-34
Fechada	8-33

Fonte: Elaborado pelo autor

Para construir o seguinte conjunto de restauração, retorna-se ao Passo 2 e a chave 10-38 é selecionada. Essa chave é escolhida porque o nó 38 está desenergizado na configuração pós-falta. Com a chave 10-38 se cria o Conjunto-R #2. Para o Passo 3, o nó 38 tem maior profundidade que o nó 10 (ver Figura 7) e, portanto, é selecionado como nó raiz da subárvore. As chaves que limitam a subárvore com início no nó 38 são as

chaves 45-12 e 39-38. Essas chaves se encontram no estado aberto na configuração final e, portanto, são adicionadas no início do Conjunto-R #2. A formação do Conjunto-R #2 é finalizada.

Para elaborar o terceiro conjunto de restauração, retorna-se ao Passo 2 e a chave 13-12 é selecionada. Essa chave é escolhida porque o nó 12 está desenergizado na configuração pós-falta. Com a chave 13-12 se cria o Conjunto-R #3. Para o Passo 3, o nó 12 tem maior profundidade que o nó 13 (ver Figura 7) e, portanto, é selecionado como nó raiz da subárvore. A chave que limita a subárvore com início no nó 12 é a chave 45-12. A chave 45-12 se encontram no estado aberto na configuração final e, como consequência, é adicionada no início do Conjunto-R #3. A formação do Conjunto-R #3 é finalizada.

É importante lembrar que o problema de SOC inicia após a localização e isolamento da região com falta. Em outras palavras, as chaves abertas para isolar a falta não fazem parte da sequência de chaveamento. Portanto, é assumido que as chaves 12-11 e 102-11 devem permanecer abertas e não são consideradas como parte do algoritmo que elabora a sequência de manobras.

Para construir o próximo conjunto de restauração, retorna-se ao Passo 2 e a chave 35-40 é selecionada. Essa chave é escolhida porque o nó 35 está desenergizado na configuração pós-falta. Com a chave 35-40 se cria o Conjunto-R #4. Para o Passo 3, o nó 35 tem mais profundidade que o nó 40 (ver Figura 7) e, portanto, é selecionado como nó raiz da subárvore. A chave que limita a subárvore com início no nó 35 é a chave 35-34. Essa chave se encontra no estado aberto na configuração final e, como resultado, é adicionada no início do Conjunto-R #4. A formação do Conjunto-R #4 é finalizada.

Não havendo mais chaves com estado fechado na Tabela 3 para ser analisada, o algoritmo finaliza. Na Tabela 5 apresenta-se os conjuntos de chaveamento obtidos.

Tabela 5 – Conjuntos de chaveamento para o Cenário 1

Conjunto-R #1		Conjunto-R #2		Conjunto-R #3		Conjunto-R #4	
Estado	Chave	Estado	Chave	Estado	Chave	Estado	Chave
Aberta	39-38	Aberta	39-38	Aberta	45-12	Aberta	35-34
Aberta	35-34	Aberta	45-12	Fechada	13-12	Fechada	35-40
Fechada	8-33	Fechada	10-38				

Fonte: Elaborado pelo autor

É importante observar que os Conjuntos-R são independentes entre si e podem ser executados em qualquer ordem. Na Tabela 5, é possível observar que cada Conjunto-R possui apenas uma chave fechada e uma ou várias chaves abertas. Também é possível

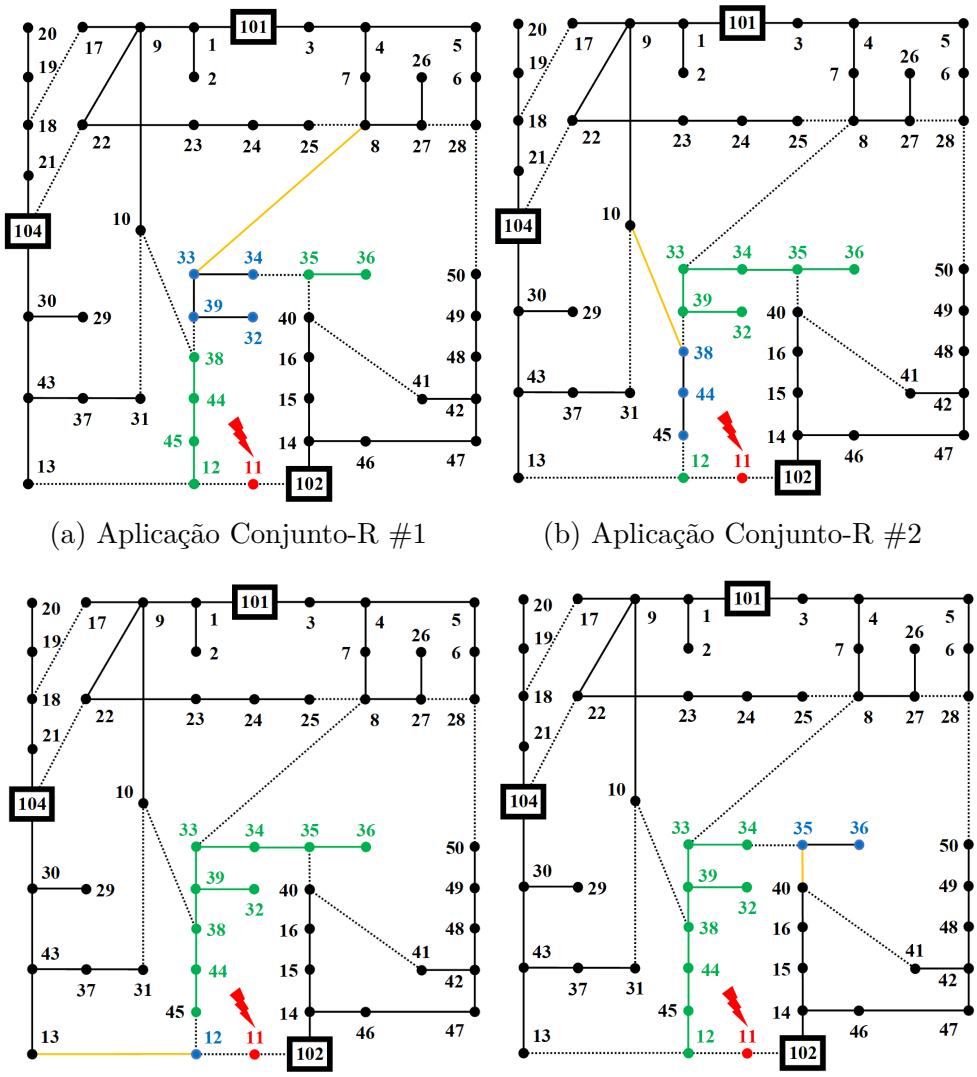
notar que todas as chaves fechadas de todos os conjuntos são diferentes, porém, as chaves abertas podem fazer parte de um ou vários conjuntos. Esta característica é explicada pelo fato que chaveamentos iguais podem estar compondo conjuntos de chaveamento diferentes. Além disto, a implementação de um conjunto de chaveamento pode reduzir o número de chaveamentos do próximo conjunto. No exemplo apresentado, a implementação do Conjunto-R #1 reduz o número de chaveamentos do Conjunto-R#2 em um chaveamento (chave 39–38), e da mesma forma para o Conjunto-R #4 (chave 35–34).

Os Conjuntos-R dividem o processo de sequenciamento de chaves em pequenas parcelas, simplificando assim a complexidade do problema original para uma análise mais direta na tomada de decisões.

Em cenários nos quais apenas conjuntos de restauração são identificados, a principal vantagem da formação dos Conjuntos-R é a seguinte: não é necessário avaliar nenhum fluxo de potência e a aplicação de cada Conjunto-R não gera nenhuma configuração infactível. Para o exemplo em análise, o tomador de decisões pode escolher a aplicação de qualquer um dos quatro Conjunto-R da Tabela 5 sem risco de gerar soluções intermediárias infactíveis. A Figura 8 apresenta a aplicação independente de cada um dos quatro Conjuntos-R (Tabela 5) sobre a configuração pós-falta (Figura 6a) do Cenário 1.

A topologia da Figura (8a) é obtida aplicando o Conjunto-R #1 na configuração pós-falta, em que os nós reconectados aparecem na cor azul e os nós sem energia permanecem na cor verde. Para implementar o Conjunto-R #1 na configuração pós-falta, a sequência de manobras começa com a abertura da chave 39-38. A abertura da chave 39-38 não compromete a correta operação do sistema porque os nós 39 e 38 já estavam desenergizados na configuração pós-falta. O passo seguinte é a abertura da chave 35-34. A abertura da chave 35-34 também não compromete a operação normal do sistema porque os nós 34 e 35 estavam desenergizados na configuração pós-falta. A implementação do Conjunto-R finaliza com o fechamento da chave 8-33, reconectando os nós de carga 32, 33, 34, e 39. O fechamento da chave 8-33 não compromete a correta operação do sistema. Isto pode ser verificado fazendo a seguinte observação. Entre a configuração pós-falta (Figura 6a) e a configuração final (Figura 6b), a árvore com início na SE 101 recebe duas parcelas de carga. A primeira parcela de carga é formada pelos nós 32, 33, 34, e 39. A segunda parcela de carga é constituída pelos nós 38, 44, e 45. Considere uma rede de distribuição operando em condições normais, se a carga conectada a essa rede aumenta, as variáveis de operação, como tensão e corrente, têm uma tendência a operar com valores mais próximos dos seus limites. Se o sistema com início na SE 101 tem a capacidade de receber as duas parcelas de carga sem violar nenhuma restrição operacional na configuração final (ROMERO *et al.*, 2016), é possível inferir que se apenas uma das parcelas de carga se conecta ao sistema SE 101, também, nenhuma restrição de operação deve ser violada. Portanto, é possível afirmar que o fechamento da chave 8-33 não coloca em risco a normal operação do sistema.

Figura 8 – Aplicação dos Conjuntos-R de forma independente no Cenário 1



(a) Aplicação Conjunto-R #1 (b) Aplicação Conjunto-R #2

(c) Aplicação Conjunto-R #3 (d) Aplicação Conjunto-R #4

Fonte: Elaborado pelo autor

Nas Figuras 8b, 8c, 8d, os Conjuntos-R #2, #3, e #4 são implementados seguindo a mesma lógica. Os Conjuntos-R são independentes entre si e podem ser executados em qualquer ordem. No entanto, identificar a ordem na qual os Conjutos-R devem ser aplicados na configuração pós-falta para minimizar o valor de energia não suprida, não é uma tarefa trivial. Para definir a ordem de aplicação dos Conjuntos-R, um coeficiente de restauração é definido na seção 3.2.3.

No contexto do processo de sequenciamento de chaves, também há conjuntos cuja função não é reconectar carga, mas sim realocar carga energizada. Esse processo de realocação amplia as oportunidades de reconexão de cargas desligadas, resultando na redução do valor de energia não suprida. Os grupos responsáveis pela realocação de carga são discutidos em detalhes na seção 3.1.2.

3.1.2 Conjunto de reconfiguração

Os Conjuntos-RF são compostos por pares de chaves que movem cargas energizadas entre alimentadores adjacentes. Na prática, essa transferência de carga é executada para liberar capacidade nos alimentadores não afetados pela contingência, permitindo assim um aumento na quantidade de carga reenergizada após uma falta permanente. Cada Conjunto-RF é composto por duas chaves: a primeira chave altera seu estado inicial de fechado para aberto, enquanto a segunda chave realiza o procedimento inverso. Os passos para construir os Conjuntos-RF são os seguintes:

Passo 1. Identificar as chaves que alteram de estado entre a configuração pós-falta e a configuração final. Ir para o Passo 2.

Passo 2. Escolher uma chave com estado fechado na configuração final com ambos os extremos energizados na configuração pós-falta. Criar um novo Conjunto-RF com a chave selecionada e prosseguir para o Passo 3. Caso contrário, seguir para o Passo 4.

Passo 3. Com o sistema na configuração final, formar uma subárvore considerando como nó raiz (nó R) o extremo de maior profundidade da chave escolhida. A chave que delimita a subárvore possui estado aberto na configuração final e foi identificada no Passo 1. Adicionar a chave no início do Conjunto-RF. Se houver mais de uma chave no estado aberto na configuração final, adicionar apenas a chave que conecta o nó R com o início do alimentador na configuração pós-falta. Retornar ao Passo 2 e escolher uma chave diferente.

Passo 4. Concluir o algoritmo.

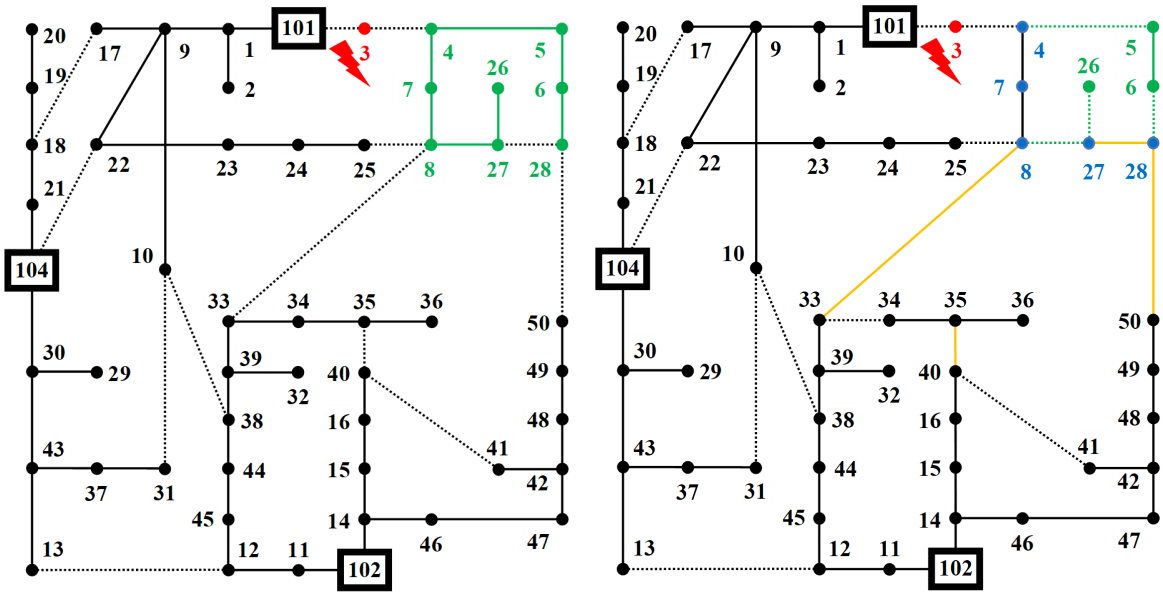
Como exemplo didático, a seguir se apresenta a aplicação dos passos descritos no Cenário 2 do sistema teste selecionado (ver seção 1.3.2). Na Figura 9 são apresentadas as configurações pós-falta e final. A Figura 10 detalha a RNP do sistema na sua configuração final. A Tabela 6 mostra as chaves que devem ser operadas.

Tabela 6 – Lista de chaves que devem ser operadas após uma falta no nó 3

Estado na configuração final	Chave
Abrir	27-8
Abrir	5-4
Abrir	28-6
Abrir	27-26
Abrir	34-33
Fechar	8-33
Fechar	28-50
Fechar	28-27
Fechar	35-40

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 9 – Falta no nó 3



(a) Configuração pós-falta (b) Configuração final

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 10 – RNP da configuração final após falta no nó 3

0	1	2	2	3	4	5	6	7	3
101	1	2	9	17	22	23	24	25	10

0	1	2	3	4	5	5	6	7	8	9	2	3	4	5	6	6	1	2	3	4	5	6	7	7	8	9	10
102	14	46	47	42	41	48	49	50	28	27	15	16	40	35	36	34	11	12	45	44	38	39	32	33	8	7	4

0	1	2	3	4	1	2	2	3	4	3
104	21	18	19	20	30	29	43	37	31	13

Fonte: Elaborado pelo autor

Iniciando com o Passo 1, as chaves que mudam de estado aparecem na Tabela 6. No Passo 2, a chave selecionada é a chave 35-40 porque essa chave está fechada na configuração final e os nós 35 e 40 estão energizados na configuração pós-falta. Com a chave 35-40 se cria o Conjunto-RF #1. Para o Passo 3, o nó 35 é selecionado como nó raiz da subárvore que vai ser construída porque o nó 35 tem maior profundidade que o nó 40 na configuração final. Na Figura 10 se observa que os nós 40 e 35 possuem profundidades com valores de 4 e 5, respectivamente. A subárvore com início no nó 35 é composta pelos nós 35, 34, e 36. A chave que limita essa subárvore é a chave 34-33. Como essa chave se encontra no estado aberto na configuração final, essa chave é adicionada no início do Conjunto-RF #1. A Tabela 7 apresenta o Conjunto-RF #1.

Tabela 7 – Conjunto-RF #1 do Cenário 2

Estado	Chave
Aberta	34-33
Fechada	35-40

Fonte: Elaborado pelo autor

Não havendo mais chaves com as características detalhadas no Passo 2, o algoritmo finaliza. Utilizando os passos da seção 3.1.1 para obter os conjuntos de restauração, a Tabela 8 apresenta todos os conjuntos de chaveamento para o Cenário 2.

Tabela 8 – Conjuntos de chaveamento para o Cenário 2

Conjunto-R #1		Conjunto-R #2		Conjunto-R #3		Conjunto-RF #1	
Estado	Chave	Estado	Chave	Estado	Chave	Estado	Chave
Aberta	5-4	Aberta	28-6	Aberta	27-8	Aberta	34-33
Aberta	27-8	Fechada	28-50	Aberta	27-26	Fechada	35-40
Fechada	8-33			Fechada	28-27		

Fonte: Elaborado pelo autor

Começando na configuração pós-falta, executar os chaveamentos do Conjunto-R #1 permite reconectar uma parcela grande de carga desenergizada (2772 kW). No entanto, a aplicação do Conjunto-R #1 tem como consequência a violação do limite de corrente máxima da chave 33–39. O limite dessa chave é 250 A, porém a corrente aumenta para 312,20 A, tornando a configuração infactível.

Para permitir que o Conjunto-R #1 seja implementado, o Conjunto-RF #1 deve ser operado primeiro. Se os chaveamentos do Conjunto-RF #1 e Conjunto-R #1 são operados de forma sequencial, a corrente pela chave 33–39 atinge o valor de 230,01 A que é menor que a corrente máxima da chave, evitando um estágio intermediário infactível. Em resumo, os Conjuntos-RF tornam factível a possibilidade de reenergizar grandes conjuntos de cargas e, em consequência, minimizar o valor de energia não suprida.

3.2 ETAPA II: COMO ORDENAR OS CONJUNTOS DE CHAVEAMENTO

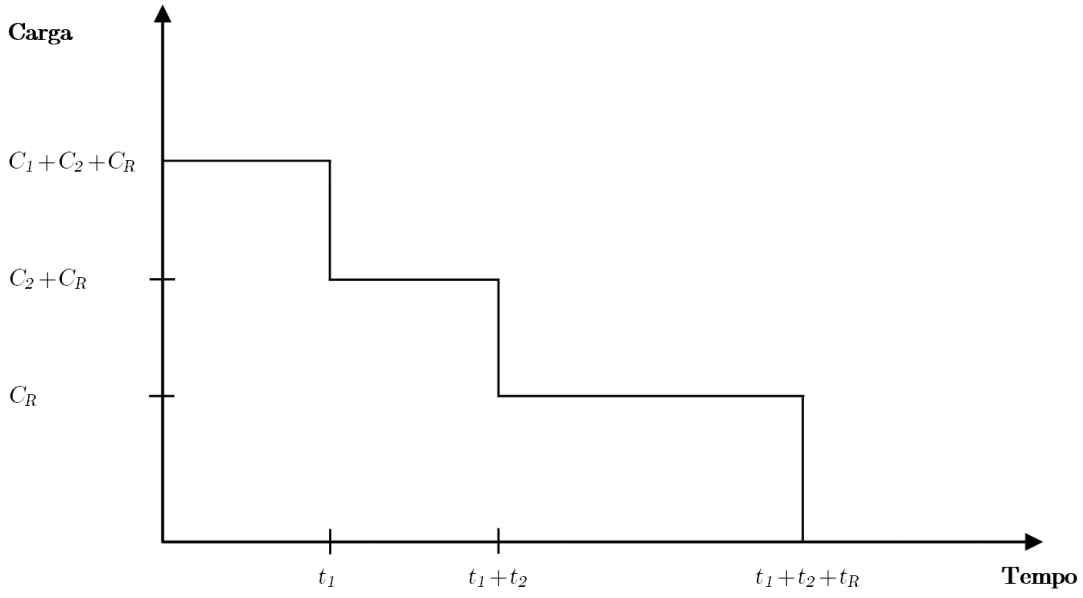
Neste trabalho de graduação, a definição de uma sequência de chaveamento é reformulada como a ordem ótima em que os conjuntos de chaveamento são executados com o objetivo de minimizar o valor de energia não suprida. Nas seções a seguir, apresentam-se

os conceitos necessários para determinar a ordem ótima em que os conjuntos de chaveamento devem ser operados.

3.2.1 Energia não suprida

A ENS refere-se à energia que deixou de ser fornecida devido a uma interrupção. Sua quantificação envolve calcular a área sob a curva que descreve a carga não atendida ao longo do tempo, desde o início da restauração até o reparo da falha. A Figura 11 apresenta o comportamento da energia não fornecida ao longo do tempo. Nesse contexto, seja os blocos de carga C_1 e C_2 que são reconectados por meio dos Conjunto-R#1 e Conjunto-R#2, em que as suas implementações exigem tempos t_1 e t_2, respectivamente.

Figura 11 – Energia não suprida



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 11, a área sob a curva pode ser calculada da seguinte forma:

$$ENS = C_1(t_1) + C_2(t_1 + t_2) + C_R(t_1 + t_2 + t_R) \tag{1a}$$

$$ENS = C_1 \sum_{j=1}^{1} t_j + C_2 \sum_{j=1}^{2} t_j + C_R \sum_{j=1}^{R} t_j \tag{1b}$$

$$ENS = \sum_{i=1}^{R} (C_i \sum_{j=1}^{i} t_j) \tag{1c}$$

A fórmula 1c descreve o cálculo da ENS, em que C_R é a carga que não é possível restaurar após realizado o último chaveamento, e t_R é a diferença entre o tempo total de reparo da falha (t_{TR}) e o instante em que o último chaveamento é realizado ($t_{TR} = t_R + t_1 + t_2$).

3.2.2 Relação entre a ENS e os conjuntos de chaveamento

A ordem de execução dos conjuntos de chaveamentos tem impacto no cálculo da ENS. Para visualizar esse impacto, a Tabela 9 apresenta as diversas ordens candidatas para o Cenário 1 (ver seção 1.3.1) dependendo da sequência em que os conjuntos de chaveamentos são apresentados na Tabela 5 são operados. Para esta análise é considerada a presença de chaves telecomandadas com tempo de operação de 1 minuto e tempo de reparo de três horas.

Tabela 9 – Opções para sequência de chaveamento

Opção	Ordem de execução dos conjuntos de chaveamento				ENS (kWh)
1	1	2	3	4	1407,95
2	1	2	4	3	1383,69
3	1	3	2	4	1458,77
4	1	3	4	2	1499,19
5	1	4	2	3	1386,00
6	1	4	3	2	1450,68
7	2	1	3	4	1313,24
8	2	1	4	3	1288,98
9	2	3	1	4	1306,31
10	2	3	4	1	1288,98
11	2	4	1	3	1271,66
12	2	4	3	1	1278,59
13	3	1	2	4	1472,63
14	3	1	4	2	1513,05
15	3	2	1	4	1357,13
16	3	2	4	1	1339,80
17	3	4	1	2	1516,52
18	3	4	2	1	1458,77
19	4	1	2	3	1389,47
20	4	1	3	2	1454,15
21	4	2	1	3	1352,51
22	4	2	3	1	1359,44
23	4	3	1	2	1481,87
24	4	3	2	1	1424,12

Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 9 mostra que o valor de ENS varia conforme a ordem de execução dos

conjuntos de chaveamento. Além disso, nota-se que começar a execução com conjuntos que exigem menos chaveamentos não garante necessariamente um menor valor de ENS. Contraintuitivamente, a opção 11, que possui o menor valor de ENS, inicia a execução pelo conjunto de chaveamento com o maior número de operações (Conjunto-R #2).

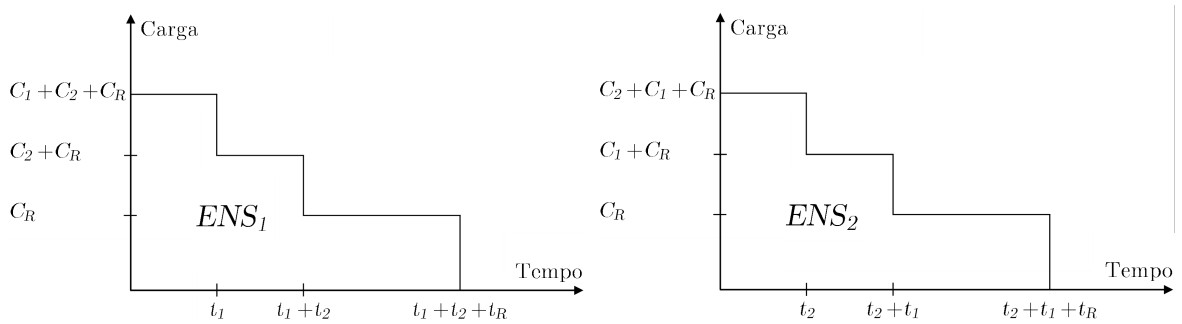
De modo geral, quando há n conjuntos de chaveamento, existem $n!$ sequências possíveis para o problema. Cada uma dessas sequências, considerada como um candidato a solução, requer avaliação de sua factibilidade e cálculo do valor da ENS. Do ponto de vista computacional, analisar cada candidato pode ser demorado, especialmente se Conjuntos-RF estiverem presentes na sequência de chaveamento. Se houver Conjuntos-RF, a viabilidade do sistema precisa ser verificada a cada execução de um Conjunto-R, pois a presença desses grupos implica na necessidade de redistribuir carga energizada entre os alimentadores para tornar possível a aplicação posterior de um Conjunto-R. Assim, destaca-se a necessidade de uma técnica de decisão para determinar a ordem mais eficiente para a implementação dos conjuntos de chaveamento, visando minimizar o valor da ENS. Para otimizar o algoritmo proposto e evitar cálculos desnecessários, a seção 3.2.3 apresenta uma heurística para definir a ordem ideal de implementação dos conjuntos de chaveamento.

3.2.3 Coeficiente de restauração

Nesta seção é introduzida uma heurística para determinar a ordem de implementação dos conjuntos de chaveamento.

Considere um sistema de distribuição sujeito a uma falta permanente, onde a carga total desconectada do sistema é C_T. Um algoritmo é acionado com o objetivo de minimizar a energia não suprida, reconectando cargas. O resultado do algoritmo indica que dois grupos de carga, C_1 e C_2, requerem tempos t_1 e t_2, respectivamente, para serem reconectados ao sistema. A carga não reconectada é denominada como C_R, e o tempo total de reparo é t_{TR}. Supondo que t_{TR} seja consideravelmente maior que t_1 e t_2, as possíveis combinações de reconexão da carga são ilustradas nas Figuras 12a e 12b.

Figura 12 – Possíveis combinações de reconexão



(a) Combinação 1 (b) Combinação 2

Fonte: Elaborado pelo autor

A ENS da primeira combinação é representada por ENS_1 e é calculada como a área sob a curva da Figura 12a, conforme a Equação 2.

$$ENS_1 = C_1(t_1) + C_2(t_1 + t_2) + C_R(t_1 + t_2 + t_R) \tag{2}$$

De forma análoga, a energia não suprida no segundo caso é representada por ENS_2 e é calculada como a área sob a curva da Figura 12b, utilizando a Equação 3.

$$ENS_2 = C_2(t_2) + C_1(t_2 + t_1) + C_R(t_2 + t_1 + t_R) \tag{3}$$

A condição para que ENS_1 seja menor que ENS_2 é estabelecida por:

$$ENS_1 < ENS_2 \tag{4a}$$

$$C_1(t_1) + C_2(t_1 + t_2) + C_R(t_1 + t_2 + t_R) < C_2(t_2) + C_1(t_2 + t_1) + C_R(t_2 + t_1 + t_R) \tag{4b}$$

$$\left(\frac{C_2}{t_2}\right) < \left(\frac{C_1}{t_1}\right) \tag{4c}$$

$$\left(\frac{C_1}{t_1}\right) > \left(\frac{C_2}{t_2}\right) \tag{4d}$$

Em resumo, o valor de ENS_1 é menor que ENS_2 quando a relação entre a carga reenergizada e o tempo de execução necessário do primeiro conjunto reconectado (C_1/t_1) é maior do que a relação entre carga e tempo do segundo conjunto (C_2/t_2).

Neste trabalho de graduação, a relação entre a quantidade de carga reconectada e o tempo necessário para a reconexão (implementação do conjunto de chaveamento) é definida como coeficiente de restauração (C_R).

Em termos gerais, para minimizar o valor da ENS, os conjuntos de chaveamento devem ser executados em ordem decrescente de acordo com seus C_R. Cada vez que um conjunto de chaveamento é selecionado para integrar a sequência, os índices de restauração são atualizados.

Como exemplo didático, a sequência de chaveamento do Cenário 1 do sistema teste selecionado (ver seção 1.3.1) é obtida utilizando o critério do C_R.

Utilizando os conjuntos de chaveamentos da Tabela 5, na Tabela 10 apresenta-se o C_R de cada conjunto de chaveamento, considerando um cenário de falta permanente com tempo de reparo de três horas e chaves telecomandadas com tempo de operação de 1 minuto.

Tabela 10 – Coeficiente de restauração: Fase 1

Conjunto-R #1		Conjunto-R #2		Conjunto-R #3		Conjunto-R #4	
C_R	0,94248	C_R	0,45737	C_R	0,37421	C_R	0,24948
Estado	Chave	Estado	Chave	Estado	Chave	Estado	Chave
Aberta	39-38	Aberta	39-38	Aberta	45-12	Aberta	35-34
Aberta	35-34	Aberta	45-12	Fechada	13-12	Fechada	35-40
Fechada	8-33	Fechada	10-38				

Fonte: Elaborado pelo autor

Na Fase 1, o Conjunto-R #1 é selecionado para formar parte da sequência de chaveamento final porque o seu valor de C_R é maior que dos outros conjuntos. Na segunda fase (Tabela 11), os C_R são recalculados desconsiderando as chaves (na cor vermelha) que fazem parte da sequência final.

Tabela 11 – Coeficiente de restauração: Fase 2

Conjunto-R #1		Conjunto-R #2		Conjunto-R #3		Conjunto-R #4	
C_R	-	C_R	0,68607	C_R	0,37422	C_R	0,49896
Estado	Chave	Estado	Chave	Estado	Chave	Estado	Chave
Aberta	39-38	Aberta	39-38	Aberta	45-12	Aberta	35-34
Aberta	35-34	Aberta	45-12	Fechada	13-12	Fechada	35-40
Fechada	8-33	Fechada	10-38				

Fonte: Elaborado pelo autor

Na Fase 2, o Conjunto-R #2 é selecionado para formar parte da sequência de chaveamento final. Na terceira fase (Tabela 12), os C_R são calculados novamente.

Tabela 12 – Coeficiente de restauração: Fase 3

Conjunto-R #1		Conjunto-R #2		Conjunto-R #3		Conjunto-R #4	
C_R	-	C_R	-	C_R	0,74844	C_R	0,49896
Estado	Chave	Estado	Chave	Estado	Chave	Estado	Chave
Aberta	39-38	Aberta	39-38	Aberta	45-12	Aberta	35-34
Aberta	35-34	Aberta	45-12	Fechada	13-12	Fechada	35-40
Fechada	8-33	Fechada	10-38				

Fonte: Elaborado pelo autor

Na Fase 3, o Conjunto-R #3 é selecionado segundo o critério do C_R. Finalmente, não havendo mais conjuntos de chaveamento para ser analisado, o Conjunto-R #4 é selecionado. A sequência de chaveamento para o Cenário 1 é apresentado na Tabela 13.

Tabela 13 – Sequência de chaveamento para o Cenário 1

Operação	Chave
Abrir	39-38
Abrir	35-34
Fechar	8-33
Abrir	45-12
Fechar	10-38
Fechar	13-12
Fechar	35-40

Fonte: Elaborado pelo autor

É importante observar que para obter a sequência de chaveamento da Tabela 13, nenhum fluxo de potência foi realizado. Adicionalmente, a solução obtida coincide com o resultado apresentado em (SOUZA, 2018). Na referência (SOUZA, 2018), a autora resolve o problema de SOC com um *software* comercial garantindo otimalidade.

Finalmente, é possível concluir que a ordem em que as chaves devem ser operadas pode ser abordado como um problema de sequenciamento de tarefas, onde a função a ser minimizada é a quantidade de ENS. Contudo, subdividir a sequência em conjuntos de chaveamentos e estabelecer uma heurística para sua ordenação surge como uma ferramenta útil. Isso evita a avaliação exaustiva de todas as possíveis ordens, ao mesmo tempo que previne um aumento no tempo computacional para resolver o problema em tempo real. Apesar da definição de uma heurística para a ordenação dos conjuntos de chaveamentos, é importante observar que dependendo da carga restaurada e do tempo de implementação, existem conjuntos de chaveamento denominados Conjuntos-RF que não restauram carga, mas possibilitam a reconexão de grandes blocos de demanda. A presença desses Conjuntos-RF também deve ser considerada na sequência de chaveamento para evitar configurações intermediárias inviáveis. A fim de incorporar os Conjuntos-RF na sequência de chaveamento, propõe-se, na Seção 3.2.4, a criação de Grupo-conjunto de chaveamento.

3.2.4 Grupo-conjunto de chaveamento

Um Grupo-conjunto de chaveamento consiste em grupos de conjuntos de chaves que, quando manobrados em sequência, restauram seções de carga em sistemas de distribuição assegurando estágios intermediários factíveis. Cada Grupo-conjunto começa com um

Conjunto-R, ao qual, conforme necessário, Conjuntos-RF são acrescentados para viabilizar a implementação dos chaveamentos do Conjunto-R inicial. Como discutido nas seções anteriores, um Conjunto-R reconecta um grupo de cargas no sistema, enquanto um Conjunto-RF realoca um grupo de cargas para um alimentador adjacente.

Cada conjunto recebe a atribuição de um Alimentador Vinculado (AV). O AV de um Conjunto-RF é o alimentador no qual o grupo de cargas realocadas fazem parte na configuração pós-falta. O AV de um Conjunto-R é o alimentador que o grupo de cargas reconectadas fazem parte na configuração final. O AV de um Grupo-conjunto é igual ao AV do seu Conjunto-R. Os passos para criar os Grupo-conjunto são apresentados a continuação. Quando um Grupo-conjunto é selecionado para integrar a sequência final de chaveamentos, os componentes que o constituem não podem mais ser empregados. A análise tem início com o sistema na configuração pós-falta e é atualizada quando um Grupo-conjunto é escolhido para fazer parte da sequência final.

Passo 1. Identificar os Conjuntos-R e os Conjuntos-RF. O AV para cada conjunto de chaveamento é identificado. O sistema inicial encontra-se na configuração pós-falta. Proceder para o Passo 2.

Passo 2. Identificar os Conjuntos-R. Definir um Grupo-conjunto com cada Conjunto-R. O AV de cada Grupo-conjunto é identificado. Avançar para o Passo 3.

Passo 3. Calcular o C_R para cada Grupo-conjunto não utilizado e seguir para o Passo 4. Se não houver Grupo-conjunto não utilizado, prosseguir para o Passo 9.

Passo 4. Escolher o Grupo-conjunto com o melhor C_R. Avançar para o Passo 5.

Passo 5. Verificar a presença de Conjuntos-RF não utilizados e com o mesmo AV do Grupo-conjunto sob análise (AV{Conjunto-RF} = AV{Grupo-conjunto}), e ir para o Passo 6. Caso não exista Conjunto-RF não utilizado, incluir o Grupo-conjunto na sequência final de chaveamentos, atualizar a topologia do sistema com as manobras deste Grupo-conjunto, e retornar ao Passo 3.

Passo 6. Verificar a existência de outros Grupo-conjunto com o mesmo AV do Grupo-conjunto em análise, e prosseguir para o Passo 7. Caso contrário, adicionar os Conjuntos-RF identificados no Passo 5 ao Grupo-conjunto em análise e retornar ao Passo 3.

Passo 7. Testar a execução dos chaveamentos do Grupo-conjunto em análise no sistema na configuração corrente. Se as restrições operacionais forem viáveis, incluir o Grupo-conjunto na sequência final de chaveamentos, atualizar a topologia do sistema com os chaveamentos deste Grupo-conjunto, e retornar ao Passo 3. Caso contrário, seguir para o Passo 8.

Passo 8. Adicionar o Conjunto-RF ao Grupo-conjunto em análise. Se houver

dois ou mais Conjunto-RF identificados no Passo 5, criar novos Grupo-conjunto com cada Conjunto-RF e o Grupo-conjunto em análise. Voltar ao Passo 3.

Passo 9. Concluir o algoritmo.

3.2.5 Conjuntos-R em cascata

Um Conjunto-R se encontra em cascata quando só pode ser implementado após a execução de um outro Conjunto-R. A existência de Conjuntos-R em cascata se caracteriza pela presença de uma chave com as seguintes condições: i) estado fechado na configuração final, e ii) na configuração pós-falta possui ambos os extremos desenergizados. Caso uma chave com essas características seja identificada, no Grupo-conjunto correspondente a essa chave são adicionados os Conjuntos-R que conectam essa chave com o nó raiz da árvore na configuração final, utilizando a RNP.

A presença de Conjuntos-R em cascata é incluída nos seguintes passos para elaborar a sequência de chaveamento.

Passo 1. Identificar os Conjuntos-R e os Conjuntos-RF. O AV para cada conjunto de chaveamento é identificado. O sistema inicial encontra-se na configuração pós-falta. A sequência de chaveamentos final inicia como um conjunto vazio. Proceder para o Passo 2.

Passo 2. Identificar os Conjuntos-R. Definir um Grupo-conjunto com cada Conjunto-R. O AV para cada conjunto de chaveamento é identificado. Avaliar a existência de Conjuntos-R em cascata e adicionar os Grupos-R em cascata nos Grupo-conjunto para que seja possível implementar os chaveamentos. Avançar para o Passo 3.

Passo 3. Calcular o C_R para cada Grupo-conjunto não utilizado e seguir para o Passo 4. Se não houver Grupo-conjunto não utilizado, prosseguir para o Passo 9.

Passo 4. Escolher o Grupo-conjunto com o melhor C_R. Se o Grupo-conjunto tem mais de um Conjunto-R que não foi utilizado, identificar o Conjunto-R não utilizado com um dos extremos energizado e procurar o Super-grupo em que este Grupo-R seja único. Atualizar o Super-grupo selecionado. Avançar para o Passo 5.

Passo 5. Verificar a presença de Conjuntos-RF não utilizados e com o mesmo AV do Grupo-conjunto sob análise (AV{Conjunto-RF} = AV{Grupo-conjunto}), e ir para o Passo 6. Caso não exista Conjunto-RF não utilizado, incluir o Grupo-conjunto na sequência final de chaveamentos, atualizar a topologia do sistema com as manobras deste Grupo-conjunto, e retornar ao Passo 3.

Passo 6. Verificar a existência de outros Grupo-conjunto com o mesmo AV do Grupo-conjunto em análise, e prosseguir para o Passo 7. Caso contrário, adicionar os Conjuntos-RF identificados no Passo 5 ao Grupo-conjunto em análise e retornar ao Passo 3.

Passo 7. Testar a execução dos chaveamentos do Grupo-conjunto em análise no sistema na configuração corrente. Se as restrições operacionais forem viáveis, incluir o Grupo-conjunto na sequência final de chaveamentos, atualizar a topologia do sistema com os chaveamentos deste Grupo-conjunto, e retornar ao Passo 3. Caso contrário, seguir para o Passo 8.

Passo 8. Adicionar o Conjunto-RF ao Grupo-conjunto em análise. Se houver dois ou mais Conjunto-RF identificados no Passo 5, criar novos Grupo-conjunto com cada Conjunto-RF e o Grupo-conjunto em análise. Voltar ao Passo 3.

Passo 9. Concluir o algoritmo.

Como exemplo de aplicação dos passos acima descritos, a sequência de chaveamento do Cenário 2 do sistema teste selecionado é obtida considerando os conjuntos de chaveamento obtidos na seção 3.1.2 e apresentados na Tabela 14. Para fins didáticos, é considerado que o algoritmo inicia em uma Fase 1, e cada vez que o algoritmo retorna ao Passo 3, o número de fase é incrementado em uma unidade.

Tabela 14 – Conjuntos de chaveamento para o Cenário 2

Conjunto-R #1		Conjunto-R #2		Conjunto-R #3		Conjunto-RF #1	
AV	2	AV	2	AV	2	AV	2
Estado	Chave	Estado	Chave	Estado	Chave	Estado	Chave
Aberta	5-4	Aberta	28-6	Aberta	27-8	Aberta	34-33
Aberta	27-8	Fechada	28-50	Aberta	27-26	Fechada	35-40
Fechada	8-33			Fechada	28-27		

Fonte: Elaborado pelo autor

Começa a Fase 1 dos passos acima apresentados. Iniciando com o Passo 1, os Conjuntos-R e os Conjuntos-RF são mostrados na Tabela 14 com os seus AV.

No Passo 2, os Conjuntos-R são identificados. Com cada Conjunto-R é definido um Grupo-conjunto. O AV de cada Grupo-conjunto é AV do seu Conjunto-R. A Tabela 15 mostra os Grupo-conjunto no início do Passo 2.

Tabela 15 – Grupos-conjunto do Cenário 2 no início do Passo 2 da Fase 1

Grupo-conjunto #1		Grupo-conjunto #2		Grupo-conjunto #3	
AV	2	AV	2	AV	2
Conjunto-R	#1	Conjunto-R	#2	Conjunto-R	#3

Fonte: Elaborado pelo autor

A seguir se verifica a presença de Conjuntos-R em cascata. A chave 28-27 está fechada na configuração final e possui ambos os extremos desenergizados na configuração pós-falta, portanto existe Conjunto-R em cascata. No Grupo-conjunto #3 é adicionado o Conjunto-R #2. Isto porque, utilizando a RNP, é possível observar que a chave 28-50 conecta a chave 28-27 com o nó raiz da árvore. Finaliza-se o Passo 2 e a Tabela 16 é obtida.

Tabela 16 – Grupos-conjunto do Cenário 2 após o Passo 2 da Fase 1

Grupo-conjunto #1		Grupo-conjunto #2		Grupo-conjunto #3	
AV	2	AV	2	AV	2
Conjunto-R	#1	Conjunto-R	#2	Conjunto-R	#2
				Conjunto-R	#3

Fonte: Elaborado pelo autor

No Passo 3, o C_R de cada Grupo-conjunto é calculado. A Tabela 17 apresenta os valores de C_R.

Tabela 17 – Grupos-conjunto do Cenário 2 após o Passo 3 da Fase 1

Grupo-conjunto #1		Grupo-conjunto #2		Grupo-conjunto #3	
AV	2	AV	2	AV	2
CR	0,55	CR	0,15	CR	0,18
Conjunto-R	#1	Conjunto-R	#2	Conjunto-R	#2
				Conjunto-R	#3

Fonte: Elaborado pelo autor

No Passo 4, o Grupo-conjunto #1 é selecionado por possuir o melhor valor de C_R.

No Passo 5, o Conjunto-RF #1 é identificado (AV{Conjunto-RF #1} = AV{Grupo-conjunto #1} = 2).

No Passo 6, verifica-se que o Grupo-conjunto #2 e Grupo-conjunto #3 também possuem AV = 2.

No Passo 7, uma tentativa é realizada em que são implementados os chaveamentos do Grupo-conjunto #1 no sistema na configuração corrente. As restrições operacionais são avaliadas após a execução de um fluxo de potência. É verificado que o limite de corrente é violado na árvore com raiz no nó 102.

No Passo 8, como a restrição de corrente foi violada no passo anterior, o Conjunto-RF #1 é adicionado ao Grupo-conjunto #1. A Tabela 18 mostra os Grupo-conjunto após o Passo 8. Finaliza-se a Fase 1.

Tabela 18 – Grupos-conjunto do Cenário 2 após o Passo 8 da Fase 1

Grupo-conjunto #1		Grupo-conjunto #2		Grupo-conjunto #3	
Conjunto-RF	#1	Conjunto-R	#2	Conjunto-R	#2
Conjunto-R	#1			Conjunto-R	#3

Fonte: Elaborado pelo autor

Começa a Fase 2. Inicia no Passo 3. O C_R de cada Grupo-conjunto é calculado e apresentado na Tabela 19.

Tabela 19 – Grupos-conjunto do Cenário 2 após o Passo 3 da Fase 2

Grupo-conjunto #1		Grupo-conjunto #2		Grupo-conjunto #3	
AV	2	AV	2	AV	2
CR	0,33	CR	0,15	CR	0,18
Conjunto-RF	#1	Conjunto-R	#2	Conjunto-R	#2
Conjunto-R	#1			Conjunto-R	#3

Fonte: Elaborado pelo autor

No Passo 4, o Grupo-conjunto #1 é selecionado.

No Passo 5, o Grupo-conjunto #1 é incluído na sequência final de chaveamento. Finaliza a Fase 2.

Começa a Fase 3. Inicia no Passo 3. O C_R de cada Grupo-conjunto ainda não utilizado é calculado e apresentado na Tabela 20.

Tabela 20 – Grupos-conjunto do Cenário 2 após o Passo 3 da Fase 3

Grupo-conjunto #1		Grupo-conjunto #2		Grupo-conjunto #3	
AV	-	AV	2	AV	2
CR	-	CR	0,15	CR	0,23
Conjunto-RF	#1	Conjunto-R	#2	Conjunto-R	#2
Conjunto-R	#1			Conjunto-R	#3

Fonte: Elaborado pelo autor

No Passo 4, o Grupo-conjunto #3 possui melhor C_R, porém o Grupo-conjunto #2 é selecionado por possuir uma chave fechada com um extremo energizado na configuração final.

No Passo 5, o Grupo-conjunto #2 é incluído na sequência final de chaveamento, finaliza-se a Fase 3. Finalmente, na Fase 4, só resta o Grupo-conjunto #3. O Grupo-conjunto #3 é incluído na sequência de chaveamento. A Tabela 21 apresenta a ordem final de chaveamentos para o Cenário 2.

Tabela 21 – Sequência de chaveamento para o Cenário 2

Operação	Chave
Abrir	34-33
Fechar	35-40
Abrir	5-4
Abrir	27-8
Fechar	8-33
Abrir	28-6
Fechar	28-50
Abrir	27-26
Fechar	28-27

Fonte: Elaborado pelo autor

É importante observar que para obter a sequência de chaveamento da Tabela 21, apenas um fluxo de potência foi executado.

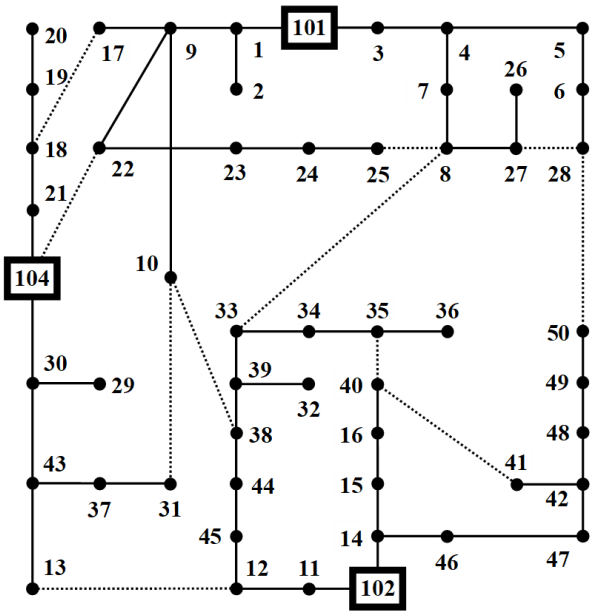
4 TESTES E RESULTADOS

4.1 TESTE USANDO O SISTEMA DE 53 BARRAS

Para realizar os testes deste trabalho, o sistema de distribuição de 53 barras é selecionado. Este sistema possui 53 barras, 3 subestações, 61 chaves, demanda ativa de 45.668,70 kW e demanda reativa de 22.118,24 kVAr. A tensão nominal é 13,8 kV com limites de tensão mínima e máxima de 0,95 p.u. e 1,05 p.u., respectivamente. O algoritmo proposto foi implementado em linguagem C++ e as simulações foram realizadas em um computador com processador Intel® Core™ i7 e 8 GB de RAM.

O diagrama unifilar do sistema é apresentado na Figura 13. As linhas contínuas representam chaves normalmente fechadas. As linhas tracejadas representam chaves normalmente abertas. As barras 101, 102, e 104 representam as barras de subestações.

Figura 13 – Sistema de 53 nós



Fonte: Elaborado pelo autor

Uma falta permanente é considerada nos seguintes nós: 1, 3, 11, 14, 21, e 30. O sistema considera que as chaves são telecomandadas com tempo de operação de 1 minuto. Considera-se que a falha no sistema é reparada após três horas.

Os grupos de chaves que devem ser operados para levar a configuração pós-falta para a configuração final são obtidos de (ROMERO *et al.*, 2016) e (SOUZA, 2018). A Tabela 22 apresenta as sequências de chaveamento, o número de vezes que o algoritmo de fluxo de potência é executado, e o tempo de processamento em segundos do algoritmo

desenvolvido para os cenários de falta nos nós 1, 3, e 11. De forma análoga, a Tabela 23 apresenta os resultados para os cenários de falta nos nós 14, 21, e 30.

Tabela 22 – Resultados para cenário de falta em 1, 3 e 11

Falta em 1		Falta em 3		Falta em 11	
tempo (s)=0,00047		tempo (s) = 0,00052		tempo (s) = 0,00049	
ENS (kWh)=12050,12		ENS (kWh)=11282,04		ENS (kWh)=1271,66	
Fluxos de potência: 0		Fluxos de potência: 1		Fluxos de potência: 0	
Estado	Chave	Estado	Chave	Estado	Chave
Abrir	17-9	Abrir	34-33	Abrir	35-34
Fechar	104-22	Fechar	35-40	Abrir	39-38
Fechar	18-17	Abrir	5-4	Fechar	8-33
		Abrir	27-8	Abrir	45-12
		Fechar	8-33	Fechar	10-38
		Abrir	28-6	Fechar	13-12
		Fechar	28-50	Fechar	35-40
		Abrir	27-26		
		Fechar	28-27		

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 23 – Resultados para cenário de falta em 14, 21 e 30

Falta em 14		Falta em 21		Falta em 30	
tempo (s)=0,00048		tempo (s)=0,00046		tempo (s)=0,00048	
ENS (kWh)=16827,20		ENS (kWh)=3781,47		ENS (kWh)=8444,21	
Fluxos de potência: 0		Fluxos de potência: 0		Fluxos de potência: 0	
Estado	Chave	Estado	Chave	Estado	Chave
Abrir	47-42	Fechar	18-17	Abrir	31-37
Abrir	42-41			Fechar	13-12
Fechar	28-50			Fechar	10-31
Abrir	16-40				
Fechar	35-40				

Fonte: Elaborado pelo autor

Das Tabelas 22 e 23 é possível observar que apenas o cenário com falta permanente na barra 3 precisa de um fluxo de potência para determinar a sequência em que as chaves devem ser operadas. Nesse cenário, é possível identificar um Conjunto-RF e três Conjuntos-R, como apresentado na Seção 3.2.5. Segundo os passos apresentados na Seção 3.2.5, a possibilidade de executar um algoritmo de fluxo de potência só se torna necessária quando Conjuntos-RF são identificados. Os cenários com falta permanente nas barras 1, 11, 14, 21, e 30, só possuem Conjuntos-R e, portanto, nenhum algoritmo de fluxo de potência é necessário ser executado.

O tempo apresentado para cada um dos cenários de falta é um tempo médio após executar o algoritmo 1000 vezes. Isto quer dizer que, por exemplo, para o cenário com falta na barra 1, o tempo total para rodar 1000 vezes o algoritmo é 0,47 segundos. Fazendo uma divisão simples, o tempo médio para executar uma vez o algoritmo é 0,00047 segundos. Em si, o algoritmo se torna lento quando é necessária a execução de um número maior de algoritmos de fluxos de potência. Para sistemas de grande porte com milhares de barras, se espera que o tempo de execução do algoritmo seja, também, proporcional ao tempo que demora em ser executado um fluxo de potência.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi abordado o problema de sequenciamento ótimo de chaves (SOC) para sistemas de distribuição de energia elétrica para otimizar o valor de energia não suprida (ENS). Assim, pode-se minimizar o valor de ENS durante o processo de operação das chaves para levar o sistema desde a configuração pós-falta até a configuração final. Esse tipo de problema é de difícil solução porque deve evitar a geração de estágios intermediários infactíveis.

Para o resolver o problema SOC, uma heurística especializada é proposta. Essa heurística é baseada na teoria de grafos por meio da representação nó-profundidade. A heurística proposta é dividida em duas etapas.

A primeira etapa da heurística consiste em agrupar as chaves que devem ser operadas em conjuntos de chaveamentos. Esses conjuntos podem ser de restauração ou de reconfiguração. Os conjuntos são independentes entre si e podem ser executados em qualquer ordem.

A segunda etapa da heurística consiste em determinar a melhor ordem em que os conjuntos de chaveamentos devem ser operados para minimizar o valor de ENS. Para determinar essa ordem, o coeficiente de restauração é definido e calculado. Adicionalmente, uma série de passos são detalhados considerando os Grupo-conjunto de chaveamento e os conjuntos de restauração em cascata.

As principais conclusões que podem ser mencionadas são as seguintes:

- Foi mostrado que a heurística especializada para o problema de SOC é uma proposta robusta e eficaz, com tempos de processamento médio aproximado de 0,0005 segundos.
- Na maioria dos cenários, nenhum algoritmo de fluxo de potência é necessário ser executado. A ausência de avaliações de fluxo de potência permite que o algoritmo utilize um reduzido esforço computacional.
- Em cenários em que são identificados conjuntos de reconfiguração, é possível que seja necessário executar algoritmos de fluxo de potência. No entanto, o número de vezes em que esses algoritmos são utilizados é pequeno. Nos testes apresentados, apenas um fluxo de potência foi executado.
- Os tempos de processamento obtidos para a heurística proposta sugerem que pode ser adequada para aplicações em tempo real. Contudo, é necessário a realização de testes com sistemas de grande porte, com milhares de nós de carga.

REFERÊNCIAS

DELBEM, A. C. B. *et al.* Node-depth encoding for evolutionary algorithms applied to network design. In: DEB, K. (Ed.). **Genetic and Evolutionary Computation – GECCO 2004**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2004. p. 678–687. ISBN 978-3-540-24854-5. Citado na página 23.

LAVORATO, M. *et al.* Imposing radiality constraints in distribution system optimization problems. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 27, n. 1, p. 172–180, 2012. Citado na página 23.

RAMOS, M.; FRANCO, J. F.; TELES, L. Mathematical models for the optimal switching sequence restoration in distribution systems. In: **Proceedings of the 13th Latin-American Congress on electricity generation and transmission - CLAGTEE 2019**. [S.l.: s.n.], 2019. v. 13. Citado na página 18.

ROMERO, R. *et al.* A new mathematical model for the restoration problem in balanced radial distribution systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 31, n. 2, p. 1259–1268, 2016. Citado 6 vezes nas páginas 19, 27, 32, 49, 58 e 60.

SHIRMOHAMMADI, D. *et al.* A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 3, n. 2, p. 753–762, 1988. Citado na página 24.

SOUZA, E. S. **Novas modelagens matemáticas para otimização do problema de restauração em sistemas de distribuição de energia elétrica radiais**. 2018. 174 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, 2018. Citado 3 vezes nas páginas 18, 42 e 49.

WATANABE, I.; NODU, M. A genetic algorithm for optimizing switching sequence of service restoration in distribution systems. In: **Proceedings of the 2004 Congress on Evolutionary Computation (IEEE Cat. No.04TH8753)**. [S.l.: s.n.], 2004. v. 2, p. 1683–1690 Vol.2. Citado na página 17.

ANEXO A – DADOS DO SISTEMA TESTE DE 53 BARRAS

Neste anexo são apresentados os dados do Sistema de 53 barras.

Tabela 24 – Dados das barras do Sistema de 53 barras

Barra	$P(kW)$	$Q(kVAr)$
101	0,00	0,00
102	0,00	0,00
104	0,00	0,00
1	2910,60	1409,64
2	1039,50	503,43
3	485,10	234,93
4	762,30	369,22
5	1801,80	872,64
6	485,10	234,93
7	693,00	335,64
8	1316,70	637,71
9	831,60	402,79
10	2009,70	973,36
11	207,90	100,72
12	1247,40	604,14
13	762,30	369,22
14	693,00	335,64
15	970,20	469,85
16	1316,70	637,71
17	485,10	234,93
18	831,60	402,79
19	970,20	469,85
20	554,40	268,50
21	1247,40	604,14
22	762,30	369,22
23	693,00	335,64
24	346,50	167,78
25	623,70	302,07
26	831,60	402,78
27	1039,50	503,42

28	485,10	234,93
29	970,20	469,85
30	1801,80	872,64
31	485,10	234,93
32	1178,10	570,57
33	2009,70	973,36
34	831,60	402,79
35	623,70	302,07
36	207,90	100,72
37	1455,30	704,86
38	762,30	369,21
39	693,00	335,64
40	970,20	469,85
41	623,70	302,07
42	831,60	402,79
43	900,90	436,36
44	970,20	469,85
45	554,40	268,50
46	1247,40	604,14
47	693,00	335,64
48	554,40	268,50
49	346,50	167,78
50	554,40	268,50

Fonte: (ROMERO *et al.*, 2016)

Tabela 25 – Dados das chaves do Sistema de 53 barras

Barra Inicial	Barra Final	Resistência (Ω)	Reatância (Ω)	Limite de Corrente (A)
101	1	0,054289	0,067496	600
101	3	0,042118	0,052364	600
4	3	0,060278	0,074942	600
7	4	0,048300	0,060050	600
5	4	0,147202	0,149885	250
8	7	0,060278	0,074942	600
6	5	0,117950	0,120100	250
9	1	0,066268	0,082389	600
104	30	0,054289	0,067496	600
29	30	0,228072	0,157248	150

43	30	0,191551	0,195042	250
37	43	0,182750	0,126000	150
31	37	0,136697	0,094248	150
43	13	0,109500	0,092475	400
45	12	0,048300	0,060050	600
2	1	0,147202	0,149885	250
10	9	0,338752	0,344927	250
102	14	0,072450	0,090075	600
15	14	0,176925	0,180150	250
16	15	0,132576	0,134992	250
102	11	0,054289	0,067496	600
12	11	0,060278	0,074942	600
20	19	0,228072	0,157248	150
19	18	0,182750	0,126000	150
17	9	0,125560	0,106038	400
21	18	0,147202	0,149885	250
104	21	0,073000	0,061650	400
22	9	0,220802	0,224827	250
23	22	0,250733	0,172872	150
24	23	0,205411	0,141624	150
25	24	0,159358	0,109872	150
27	8	0,176925	0,180150	250
26	27	0,250733	0,172872	150
28	6	0,365500	0,252000	150
44	45	0,042118	0,052364	600
38	44	0,060278	0,074942	600
39	38	0,080948	0,082389	500
32	39	0,296786	0,204624	150
33	39	0,132576	0,134992	250
34	33	0,136697	0,094248	150
35	34	0,159358	0,109872	150
36	35	0,159358	0,109872	150
16	40	0,182750	0,126000	150
42	41	0,274125	0,189000	150
48	42	0,182750	0,126000	150
49	48	0,274125	0,189000	150
50	49	0,159358	0,109872	150
47	42	0,091104	0,076939	400
46	47	0,147202	0,149885	250

14	46	0,100156	0,084584	400
10	31	0,228072	0,157248	150
13	12	0,319447	0,220248	150
18	17	0,296786	0,204624	150
104	22	0,176925	0,180150	250
8	25	0,205411	0,141624	150
28	27	0,228072	0,157248	150
8	33	0,220802	0,224827	250
40	41	0,274125	0,189000	150
35	40	0,130118	0,089712	150
10	38	0,182750	0,126000	150
28	50	0,112574	0,077616	150

Fonte: (ROMERO *et al.*, 2016)