

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

RENZO AMILCAR VARGAS PERALTA

**RESTAURAÇÃO AUTOMÁTICA DE
SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Ilha Solteira
2019

RENZO AMILCAR VARGAS PERALTA

**Restauração Automática de
Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**

**José Roberto Sanches Mantovani
Orientador**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da UNESP, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.
Área de Conhecimento: Automação.

Ilha Solteira
2019

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

V297r Vargas Peralta, Renzo Amilcar.
Restauração automática de sistemas de distribuição de energia elétrica /
Renzo Amilcar Vargas Peralta. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2019
204 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia.
Área de conhecimento: Automação, 2019

Orientador: José Roberto Sanches Mantovani
Inclui bibliografia

1. Restauração de redes. 2. Cargas de aquecimento. 3. Geração distribuída.
4. Controle de tensão. 5. Meta-Heurística. 6. Sequência de chaveamento.

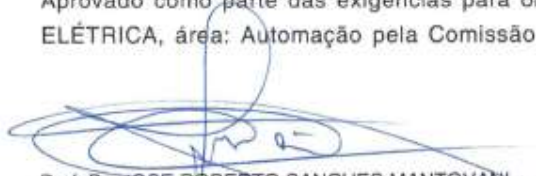
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: Restauração Automática de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica

AUTOR: RENZO AMILCAR VARGAS PERALTA

ORIENTADOR: JOSE ROBERTO SANCHES MANTOVANI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em ENGENHARIA ELÉTRICA, área: Automação pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. JOSE ROBERTO SANCHES MANTOVANI
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. FABIO BERTEQUINI LEÃO
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Dr. JONATAS BOAS LEITE
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. LUIS GUSTAVO WESZ DA SILVA
Departamento de Áreas Acadêmicas / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás


Prof. Dr. DELBERIS ARAUJO LIMA
Departamento de Engenharia Elétrica / Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Ilha Solteira, 25 de janeiro de 2019

“Ser más para servir mejor”

San Ignacio de Loyola

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, aos meus pais Amílcar e Gloria, pelo exemplo, força e carinho. A meus irmãos pelos gratos momentos ainda à distância.

Agradecimentos especiais, ao professor José Roberto Sanches Mantovani pela orientação e dedicação, mas principalmente, pela amizade, confiança e apoio no período que este trabalho foi desenvolvido, e ao professor Rubén Romero Lazaro e sua família por sua ajuda e amizade desde minha chegada ao Brasil.

Agradeço aos professores Antônio Padilha, Jônatas Boás Leite, Fabio Bertequini, John Fredy Franco, Marcos Rider, Marina Lavorato, Antônio César Baleeiro Alves, Marcelo Escobar de Oliveira, Luis Gustavo Wesz da Silva, amigos e colegas do LaPSEE que contribuíram de alguma forma para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a todos os professores e funcionários do departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira pelo trabalho notável que realizam, a UNESP pela estrutura oferecida para o desenvolvimento do trabalho.

Agradeço às instituições envolvidas pelo apoio financeiro que permitiram a realização deste trabalho. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), projeto 2015/21972-6.

RESUMO

Neste trabalho, propõe-se uma nova metodologia para abordar de forma integrada os problemas de restauração automática e sequenciamento de operação de abertura e fechamento de chaves em redes de distribuição de grande porte. Na literatura os problemas de restauração e sequência de chaveamentos são normalmente considerados de forma separada e sequencial, em que o resultado do algoritmo de restauração é o dado de entrada para o algoritmo que gera a sequência de chaveamento. A inconsistência com esta abordagem é que não necessariamente o resultado convencional do algoritmo de restauração (conjunto de chaves que devem ser manobradas), é o melhor dado de entrada para o algoritmo que elabora o sequenciamento ótimo de abertura/fechamento das chaves. Isso porque quando ambos os problemas são resolvidos separadamente, eles possuem funções objetivos diferentes. O problema de restauração tem por objetivo minimizar a quantidade de carga desconectada com o menor número de chaveamentos possíveis, enquanto que o problema de sequenciamento de chaves tem o objetivo de reduzir a energia não suprida no sistema durante um evento de falta permanente. Uma nova abordagem baseada na meta-heurística de Busca Tabu com Vizinhança Variável Reativa é proposta para explorar o espaço de busca do problema em análise, simultaneamente com uma nova heurística para gerar a sequência de chaveamento em sistemas de grande porte com milhares de nós de carga. A existência em operação na rede de controle de equipamentos de controle de tensão, como capacitores chaveados e reguladores de tensão, é considerada para auxiliar o processo restaurativo e obter soluções de melhor qualidade. Também é considerada a presença de geração distribuída com capacidade de *black start* que permite a operação ilhada com grupos de cargas locais formando microrredes. A condição *cold load pick up* é considerada no processo de restabelecimento, resultando em cargas iniciais excessivas para a energização da rede no estado restaurativo. O modelo polinomial da carga, ou também chamado modelo ZIP, é utilizado neste trabalho para representar a dependência das cargas com relação à magnitude de tensão. A injeção de potência reativa pelos capacitores é considerada dependente da tensão. Um sistema teste de 53 nós encontrado na literatura e um sistema real de 7052 nós de uma cidade do litoral brasileiro são utilizados para avaliar a metodologia proposta.

Palavras-chave: Restauração de redes. Cargas de aquecimento. Geração distribuída. Controle de tensão. Meta-heurística. Busca tabu. Sequência de chaveamento.

ABSTRACT

In this work, a new methodology is proposed to address, in an integrated approach, the automatic restoration problem and the switching sequence problem for large scale distribution networks. In the literature, the restoration and switching sequence problems are usually addressed separately and sequentially. Thus, the result of the distribution restoration algorithm is the initial data for the switching sequence algorithm. The inconsistency with this approach is that, not necessarily the conventional result of the restoration algorithm (a set of switches to be maneuvered) is the best initial data for the switching sequence algorithm. It is explained by the fact that both problems have different objective functions. The distribution restoration problem aims to minimize the amount of disconnected load with the fewest number of possible switching, whereas the switching sequence problem aims to minimize the energy not supplied in the network after a permanent fault. A new approach based on the Tabu Search with Reactive Variable Neighborhood meta-heuristic is proposed to explore the search space of the problem, along with a new heuristic to generate the switching sequence in large size distribution systems with thousands of load buses. The presence of voltage control devices, as switched capacitors and voltage regulators, are considered to improve the quality of solutions. The presence of distributed generation with black start capability is also considered. The cold load pick up condition is also considered, resulting in excessive initial loads to be energized through restoration process. The polynomial model of loads, or ZIP model, is used in this work to represent the load dependency with voltage magnitude. The reactive power injection by switched capacitors is also considered as voltage dependent. A 53-node test system found in the literature and a 7052-node real system of a Brazilian city, are used to evaluate the proposed methodology.

Keywords: Network restoration. Heating Loads. Distributed generation. Voltage Control. Metaheuristic. Tabu Search. Switching Sequence.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Representação nó profundidade para uma árvore A.	40
Figura 2	– Variações da representação nó profundidade para uma árvore A.	41
Figura 3	– Floresta F formada pelas árvores A e B.	41
Figura 4	– Exemplo da aplicação do operador PAO.	43
Figura 5	– Exemplo da aplicação do operador CAO.	44
Figura 6	– Exemplo da aplicação do operador CUT.	46
Figura 7	– Ordenação por camadas.	47
Figura 8	– Comportamento de uma carga termicamente controlada	59
Figura 9	– Curva de cargas termicamente controladas após uma falta permanente	60
Figura 10	– Modelo de função exponencial retardada para sistemas em condição CLPU.	60
Figura 11	– Processo da restauração step-by-step.	62
Figura 12	– Topologia de um sistema radial com transformador com OLTC, RT e GD fotovoltaica	64
Figura 13	– Circuito equivalente de um sistema radial com transformador com OLTC, RT e GD fotovoltaica	64
Figura 14	– Configuração inicial do sistema real de 7052 nós	70
Figura 15	– Configuração final após falta no alimentador 2 utilizando a Estratégia-1	73
Figura 16	– Configuração final após falta no alimentador 2 utilizando a Estratégia-2	74
Figura 17	– Configuração final após falta no alimentador 9 utilizando a Estratégia-1	77
Figura 18	– Configuração final após falta no alimentador 9 utilizando a Estratégia-2	78
Figura 19	– Algoritmo de BT simples.	85
Figura 20	– Algoritmo da BTVVR	87
Figura 21	– Algoritmo da BTVVR generalizado.	89
Figura 22	– Exemplo de formação de seções	91
Figura 23	– Processo de exploração da BT	94
Figura 24	– Processo de exploração da BTVVR	94
Figura 25	– Algoritmo de BTVVR para o problema de restauração	97
Figura 26	– Configuração inicial do sistema de 53 nós	103
Figura 27	– Configuração pós-falta do sistema com falta na seção 11	103
Figura 28	– Configuração final do sistema com falta na seção 11	104
Figura 29	– Configuração pós-falta do sistema com falta na seção 3	107
Figura 30	– Configuração final do sistema com falta na seção 3	107
Figura 31	– Configuração inicial do sistema de 10 nós	109
Figura 32	– Configuração pós-falta do sistema com falta na seção 5	110
Figura 33	– Configuração final do sistema com falta na seção 5	110
Figura 34	– Cálculo da energia não suprida	113
Figura 35	– Cálculo da energia não suprida	114
Figura 36	– Configuração pós-falta do sistema com falta na seção 14	115
Figura 37	– Configuração final do sistema com falta na seção 14	115
Figura 38	– Representação do cálculo da ENS considerando o tempo de reparo	116
Figura 39	– Configuração final do sistema com falta na seção 14 considerando tempo de reparo da falha	117
Figura 40	– Configuração pós-falta do sistema com falta na seção 11	119
Figura 41	– Configuração final do sistema com falta na seção 11	119
Figura 42	– Opção de reconexão 1	122
Figura 43	– Opção de reconexão 2	123

Figura 44	– Configuração pós-falta do sistema com falta na seção 11	124
Figura 45	– Configuração final do sistema com falta na seção 11	125
Figura 46	– Configuração inicial do sistema real de 7052 nós	131
Figura 47	– Configuração pós-falta do sistema de 7052 nós com falta no alimentador 9	132
Figura 48	– Configuração final do sistema de 7052 nós com falta no alimentador 9	133
Figura 49	– Curva que descreve a potência não fornecida durante o processo restaurativo	139
Figura 50	– Configuração pós-falta do sistema com falta na seção 14	141
Figura 51	– Configuração final do sistema com falta na seção 14	142
Figura 52	– Configuração pós-falta do sistema com falta na seção 3	144
Figura 53	– Configuração final do sistema com falta na seção 3	145
Figura 54	– Configuração pós-falta do sistema com falta na seção 14	148
Figura 55	– Configuração final do sistema com falta na seção 14	148
Figura 56	– Sistema teste de 53 nós	153
Figura 57	– Sistema real de 7052 nós	155
Figura 58	– Topologia final do step 1 no cenário de falta no alimentador 9	189
Figura 59	– Topologia final do step 2 no cenário de falta no alimentador 9	190
Figura 60	– Topologia final do step 3 no cenário de falta no alimentador 9	191

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Magnitudes de tensões para o sistema de 7052 nós através das iterações de um fluxo de potência por varredura em estado normal	50
Tabela 2	–	Magnitudes de tensões para o sistema de 7052 nós através das iterações de um fluxo de potência por varredura com falha em TR-2	51
Tabela 3	–	Valores de demanda para intervalos de tempo na condição CLPU	62
Tabela 4	–	Estratégias de solução	70
Tabela 5	–	Resultados para o sistema com chaves manuais	71
Tabela 6	–	Resultados para o sistema com chaves manuais e telecomandadas	71
Tabela 7	–	Sequência de chaveamento após falta no alimentador 2 utilizando a Estratégia-1	73
Tabela 8	–	Sequência de chaveamento após falta no alimentador 2 utilizando a Estratégia-2	74
Tabela 9	–	Resultados para o sistema com chaves telecomandadas	75
Tabela 10	–	Sequência de chaveamento após falta no alimentador 9 utilizando a Estratégia-1	77
Tabela 11	–	Sequência de chaveamento após falta no alimentador 9 utilizando a Estratégia-2	78
Tabela 12	–	Análise de sensibilidade da integração dos problemas de restauração e sequenciamento de chaves. TCH - tempo de operação de chave, N - número de chaveamentos, CR - carga restaurada, ENS - energia não suprida, t - tempo de processamento	79
Tabela 13	–	Listas de chaveamentos para obter a configuração final no sistema de 53 nós	102
Tabela 14	–	Grupos de chaveamento no sistema de 53 nós após uma falta na seção 11	104
Tabela 15	–	Listas de chaveamentos para obter a configuração final no sistema de 53 nós	108
Tabela 16	–	Grupos de chaveamento no sistema de 53 nós com falta na seção 3	108
Tabela 17	–	Grupos de chaveamento no sistema de 10 nós	111
Tabela 18	–	Grupos de chaveamento no sistema de 10 nós com falta na seção 5	111
Tabela 19	–	Sequência de chaveamento não considerando o tempo de reparo	116
Tabela 20	–	Sequência de chaveamento considerando o tempo de reparo da falha	118
Tabela 21	–	Sequência de chaveamento considerando tempo de reparo	118
Tabela 22	–	Chaveamentos na configuração final do sistema após uma falta na seção 11	120
Tabela 23	–	Grupos de chaveamento no sistema de 53 nós após uma falta na seção 11	120
Tabela 24	–	Candidatos a sequência de chaveamento	121
Tabela 25	–	Chaveamentos necessários para o processo restaurativo após falta na seção 11	125
Tabela 26	–	Grupos de chaveamento: Estágio-1. E: estado, F: fechar, A: abrir	125
Tabela 27	–	Grupos de chaveamento: Estágio-2. E: estado, F: fechar, A: abrir	126
Tabela 28	–	Grupos de chaveamento: Estágio-3. E: estado, F: fechar, A: abrir	127
Tabela 29	–	Grupos de chaveamento: Estágio-4. E: estado, F: fechar, A: abrir	127
Tabela 30	–	Sequência de chaveamento no sistema de 53 nós, após falta na seção 11	128
Tabela 31	–	Chaveamentos após falta no alimentador 9 no sistema de 7052 nós	134

Tabela 32	– Grupos de chaveamento no sistema de 7052 nós após uma falta no alimentador 9	134
Tabela 33	– Características dos grupos de chaveamento	135
Tabela 34	– Super-grupos de chaveamentos: Estágio-1	135
Tabela 35	– Características dos Super-grupos de chaveamentos: Estágio-1	135
Tabela 36	– Super-grupos de chaveamento: Estágio-2	136
Tabela 37	– Características dos Super-grupos de chaveamento: Estágio-2	136
Tabela 38	– Super-grupos de chaveamento: Estágio-3	136
Tabela 39	– Características dos Super-grupos de chaveamento: Estágio-3	136
Tabela 40	– Super-grupos de chaveamentos: Estágio-4	137
Tabela 41	– Características dos Super-grupos de chaveamento: Estágio-4	137
Tabela 42	– Super-grupos de chaveamento: Estágio-5	137
Tabela 43	– Características dos Super-grupos de chaveamentos: Estágio-5	137
Tabela 44	– Super-grupos de chaveamento: Estágio-6	138
Tabela 45	– Características dos Super-grupos de chaveamentos: Estágio-6	138
Tabela 46	– Sequência de chaveamento	138
Tabela 47	– Chaveamentos após falta	141
Tabela 48	– Grupos de chaveamentos no sistema de 53 nós	142
Tabela 49	– Sequência de chaveamento final	143
Tabela 50	– Grupos de chaveamento no sistema de 53 nós após uma falta na seção 3	145
Tabela 51	– Características dos grupos de chaveamento	145
Tabela 52	– Super-grupos de chaveamento: Estágio-1	146
Tabela 53	– Características dos Super-grupos de chaveamento: Estágio-1	146
Tabela 54	– Sequência de chaveamento	146
Tabela 55	– Listas de chaveamentos	149
Tabela 56	– Sequência de chaveamento	149
Tabela 57	– Parâmetros da meta-heurística de Busca Tabu com Vizinhança Variável Reativa	151
Tabela 58	– Parâmetros do modelo de função exponencial retardada para a condição CLPU	152
Tabela 59	– Parâmetros para o modelo polinomial (ZIP) da carga	152
Tabela 60	– Descrição dos testes realizados para o sistema teste de 53 nós	156
Tabela 61	– Estratégias de solução	158
Tabela 62	– Resultados do Teste 1 utilizando a Estratégia-1.	158
Tabela 63	– Resultados do Teste 1 utilizando a Estratégia-2.	158
Tabela 64	– Resultados do Teste 2 utilizando a meta-heurística Busca Tabu.	159
Tabela 65	– Resultados do Teste 2 com a meta-heurística Busca Tabu com Vizinhança Variável Reativa.	159
Tabela 66	– Resultados do Teste 3.	161
Tabela 67	– Resultados do Teste 4.	162
Tabela 68	– Resultados do Teste 5.	162
Tabela 69	– Resultados do Teste 6.	163
Tabela 70	– Resultados do Teste 7.	164
Tabela 71	– Resultados do Teste 8.	164
Tabela 72	– Resultados do Teste 9.	165
Tabela 73	– Resultados do Teste 10.	166
Tabela 74	– Resultados do Teste 11.	166
Tabela 75	– Resultados do Teste 12.	167
Tabela 76	– Resultados do Teste 13.	168

Tabela 77	–	Resultados do Teste 14.	169
Tabela 78	–	Resultados do Teste 15.	170
Tabela 79	–	Resultados do Teste 16.	170
Tabela 80	–	Resultados do Teste 17.	171
Tabela 81	–	Resultados do Teste 18.	172
Tabela 82	–	Estratégias de solução	173
Tabela 83	–	Resultados do Teste 1 utilizando a Estratégia-1.	173
Tabela 84	–	Resultados do Teste 1 utilizando a Estratégia-2.	174
Tabela 85	–	Resultados do Teste 2 utilizando a meta-heurística Busca Tabu.	175
Tabela 86	–	Resultados do Teste 2 utilizando a meta-heurística Busca Tabu com Vizinhança Variável Reativa.	175
Tabela 87	–	Resultados do Teste 3.	176
Tabela 88	–	Resultados do Teste 4	177
Tabela 89	–	Resultados do Teste 5	178
Tabela 90	–	Resultados do Teste 6	179
Tabela 91	–	Resultados do Teste 7	180
Tabela 92	–	Resultados do Teste 8	181
Tabela 93	–	Resultados do Teste 9	181
Tabela 94	–	Resultados do Teste 10	182
Tabela 95	–	Resultados do Teste 11	183
Tabela 96	–	Resultados do Teste 12	183
Tabela 97	–	Resultados do Teste 13	184
Tabela 98	–	Resultados do Teste 14	185
Tabela 99	–	Resultados do Teste 15	186
Tabela 100	–	Resultados do Teste 16	187
Tabela 101	–	Resultados do Teste 17	187
Tabela 102	–	Resultados do Teste 18	188
Tabela 103	–	Sequência de chaveamento do step 1 no cenário de falta no alimentador 9	191
Tabela 104	–	Sequência de chaveamento do step 2 no cenário de falta no alimentador 9	192
Tabela 105	–	Sequência de chaveamento do step 3 no cenário de falta no alimentador 9	192
Tabela 106	–	Resultados do Teste 18, utilizando a Estratégia-1 e a meta-heurística de Busca Tabu	192

LISTA DE ABREVIATURAS

AA	Alimentador associado ao grupo de chaves
AHC	Algoritmo heurístico construtivo
BC	Banco de capacitor
BFTS	<i>Breadth-first-traversal search</i>
BT	Busca tabu
BTVVR	Busca tabu com vizinhança variável reativa
CA	Critério de aspiração
CAIDI	<i>Customer average interruption duration index</i>
CAO	<i>Change ancestor operator</i>
CF	Configuração final/incumbente
CI	Configuração inicial
CLPU	<i>Cold load pickup</i>
CPF	Configuração pós-falta
DEC	Duração equivalente de interrupção por unidade consumidora
DER	<i>Distribution energy resources</i>
DMS	<i>Distribution management system</i>
ENS	Energia não suprida
EV	Estrutura de vizinhança
FEC	Frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora
FLISR	<i>Fault location isolation service restoration</i>
GD	Geração distribuída
GRUPO-R	Grupo de chaves de restauração
GRUPO-RCF	Grupo de chaves de reconfiguração
I_R	Índice de restauração
LT	Lista tabu
NA	Normalmente aberto
NF	Normalmente fechado
OLTC	<i>On load tap changer</i>
OMS	<i>Outage management system</i>
PAO	<i>Preserve ancestor operator</i>
PLIM	Programação linear inteira mista
RNP	Representação nó profundidade
RT	Regulador de tensão
SAIDI	<i>System Average Interruption Duration Index</i>
SAIFI	<i>System Average Interruption Frequency Index</i>
SCH	Sequência de chaves
VNS	<i>Variable neighborhood search</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
1.2	ENTENDENDO O PROBLEMA DE RESTAURAÇÃO	27
1.2.1	O carregamento do sistema como dado de entrada para o algoritmo de restauração	28
1.2.2	A topologia do sistema como dado de entrada para o algoritmo de restauração	28
1.2.3	Função objetivo do problema de restauração	29
1.2.4	Solução final do algoritmo de restauração: a sequência de chaveamento	30
1.2.5	Tempo de reparo	30
1.2.6	Tempo que deve demorar um algoritmo de restauração	30
1.2.7	Características dos algoritmos de restauração para sistemas de distribuição	31
1.2.8	Número de fases do sistema que deve ser considerado pelo algoritmo de restauração	32
1.2.9	Cargas prioritárias	32
1.2.10	Equipamentos de controle de tensão	33
1.2.11	Geração distribuída	33
1.2.12	Corte de carga	34
1.2.13	A condição Cold load pick up	34
1.2.14	O FLISR e a função de Self-Healing	35
1.2.15	Problemas similares: os problemas de reconfiguração, restauração e resiliência	36
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	37
2	SISTEMAS RADIAIS DE DISTRIBUIÇÃO	39
2.1	REPRESENTAÇÃO DOS SISTEMAS RADIAIS DE DISTRIBUIÇÃO	39
2.1.1	A teoria de grafos e os sistemas de distribuição	39
2.1.2	A representação nó profundidade	40
2.1.3	Operadores da representação nó profundidade	41
2.2	FLUXO DE POTÊNCIA	46
2.2.1	Fluxo de potência em sistemas de distribuição: o fluxo por varredura	46
2.2.2	Fluxo por varredura e a RNP	49
2.2.3	Análise do fluxo de potência em sistemas altamente estressados para o problema de restauração	49
2.3	EQUIPAMENTOS NOS SISTEMAS RADIAIS DE DISTRIBUIÇÃO	52
2.3.1	Equipamentos de controle de tensão	52
2.3.2	Geração distribuída	54
2.4	MODELO DE CARGA DEPENDENTE DA TENSÃO	57
2.4.1	Carga dependente da tensão	57
2.4.2	Injeção de potência reativa pelos bancos de capacitores dependentes da	58

	tensão	
2.5	CARGAS TERMICAMENTE CONTROLADAS E A CONDIÇÃO CLPU	58
2.6	A CONDIÇÃO REVERSE POWER TAP CHANGER RUNAWAY EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	63
2.7	ÍNDICES DE CONTINUIDADE DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	64
2.7.1	DEC	64
2.7.2	FEC	65
2.7.3	ENS	65
3	O PROBLEMA DE RESTAURAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO	66
3.1	ABORDAGEM INTEGRADA DOS PROBLEMAS DE RESTAURAÇÃO E DE SEQUENCIAMENTO DE CHAVES: A ENERGIA NÃO SUPRIDA COMO FUNÇÃO OBJETIVO	66
3.1.1	Análise da integração dos problemas de restauração e sequenciamento de chaves em redes de distribuição	67
3.1.2	Análise de sensibilidade da integração dos problemas de restauração e sequência de chaveamentos	75
3.1.3	Seleção de uma função objetivo adequada para o problema de restabelecimento	79
3.2	RESTRICÇÕES DO PROBLEMA DE RESTAURAÇÃO	81
4	A BUSCA TABU COM VIZINHANÇA VARIÁVEL REATIVA	83
4.1	A META-HEURÍSTICA DE BUSCA TABU	83
4.2	A BUSCA TABU COM VIZINHANÇA VARIÁVEL REATIVA	86
4.3	GENERALIZAÇÃO E DISCUSSÃO SOBRE A BUSCA TABU COM VIZINHANÇA VARIÁVEL REATIVA	88
5	METODOLOGIA PROPOSTA	91
5.1	REPRESENTAÇÃO BINÍVEL PARA SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	91
5.2	BUSCA TABU COM VIZINHANÇA VARIÁVEL REATIVA PARA O PROBLEMA DE RESTAURAÇÃO	92
5.3	CONTROLE CENTRALIZADO DE EQUIPAMENTOS DE CONTROLE DE TENSÃO	98
5.4	HEURÍSTICA PARA SEQUÊNCIA DE CHAVEAMENTO	100
5.4.1	Os grupos de chaveamento	101
5.4.2	Cálculo da energia não suprida	112
5.4.3	Análise da dependência da ENS o suprida com a ordem dos grupos de chaveamentos	118
5.4.4	Heurística para determinar a ordem ótima da implementação dos grupos de chaveamento para minimizar a energia não suprida: o índice de restauração	122
5.4.5	Super-grupos de chaveamento	128
5.4.6	Considerações finais sobre a sequência de chaveamento	140
5.5	FORMAÇÃO DE MICRORREDES DINÂMICAS	149
6	TESTES E RESULTADOS	151
6.1	PARÂMETROS	151
6.2	SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZADOS	152
6.3	TESTES UTILIZADOS PARA AVALIAR A METODOLOGIA PROPOSTA	156

	PARA OS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	
6.4	RESULTADOS PARA O SISTEMA DE 53 NÓS	157
6.5	RESULTADOS PARA O SISTEMA REAL DE 7052 NÓS	172
7	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	193
	REFERÊNCIAS	195

1 INTRODUÇÃO

A dependência da sociedade contemporânea da eletricidade faz com que expectativa dos usuários pela continuidade do serviço de fornecimento seja crescente. Faltas em sistemas de distribuição são responsáveis por 74% do tempo de desconexão dos usuários (ZIDAN *et al.*, 2017), gerando prejuízos econômicos pelas perdas de produção, custos associados ao reinício de processos, danos em equipamentos e deterioração de matérias-primas (LINARES; REY, 2013). Além disto, a interrupção do fornecimento elétrico está vinculada a impactos sociais, por exemplo, temperaturas desconfortáveis em casa ou no trabalho, perdas de hora de lazer, e riscos nas áreas de saúde e segurança (LINARES; REY, 2013). Como resultado, as empresas distribuidoras estão investindo em soluções que automaticamente restaurem as redes de distribuição, visando melhorar os índices de confiabilidade, reduzir os tempos de restauração, custos vinculados ao restabelecimento e os lucros cessantes, e, melhorar a reputação das empresas elétricas (ANGELO; SELEJAN, 2013). A restauração automática exige uma sequência que fornece a ordem que as chaves do sistema devem ser manobradas para levar a rede da configuração pós-falta até a configuração final no estado restaurativo. A ausência desta ordem de manobras, ou sequência de chaveamentos, pode gerar etapas intermediárias ineficazes técnica e operacionalmente durante o processo em que o plano de restauração é implementado. Trabalhos na literatura não fornecem uma sequência de chaveamento como resultado final do problema (ROMERO *et al.*, 2016), ou abordam os problemas de restauração e de sequenciamento de chaves de forma separada e sequencial (CARVALHO; FERREIRA; BARRUNCHO, 2007). Nas técnicas que consideram os problemas de restauração e sequência de chaveamentos de forma separada, o resultado fornecido pelo algoritmo de restauração é o dado de entrada para o algoritmo que gera a sequência de chaveamento. A imprecisão desta abordagem é que, não necessariamente a lista de chaves que devem ser operadas que o algoritmo de restauração fornece é o melhor dado de entrada para o algoritmo que fornece o sequenciamento de operação das chaves, porque quando os problemas de restauração e sequência de chaveamentos são resolvidos separadamente, eles possuem funções objetivo diferentes. O problema de restabelecimento tem por objetivo minimizar a quantidade de carga desconectada com o menor número de chaveamentos possíveis, enquanto que o problema de sequenciamento de chaves tem o objetivo de reduzir a energia não suprida no sistema durante o evento de falta permanente. De fato, estas funções objetivo não são totalmente conflitantes entre si, e reconectar mais carga

pode diminuir o valor de energia não suprida no sistema, porém, outras variáveis fazem parte do cálculo da energia não suprida além da carga restaurada: o tempo de reparo da falha e o tempo necessário para manobrar os diferentes tipos de chaves na rede. Neste trabalho é demonstrada que a abordagem integrada dos problemas de restabelecimento e sequenciamento de chaves fornece resultados de igual ou melhor qualidade em contraste com os resultados obtidos quando os problemas são resolvidos de forma separada e sequenciada, para sistemas com apenas chaves manuais, chaves manuais e telecomandadas e, inclusive, para sistemas com apenas chaves telecomandadas.

Nos últimos anos grandes investimentos têm sido feitos no processo de automatização das redes, introduzindo novas tecnologias de informação e comunicação com a finalidade de melhorar a resposta de sistemas reais frente às interrupções indesejadas. Também, novos equipamentos têm sido desenvolvidos para melhorar a visibilidade e o controle dos sistemas elétricos. Equipamentos como indicadores de falta remotos e chaves telecomandadas têm surgido como resultado do desenvolvimento de novos elementos para a automação das redes de alta e média tensão. Os indicadores de falta remotos são sensores de baixo custo que detectam sinais elétricos associados com a ocorrência de faltas nas redes elétricas, como altas correntes ou baixas tensões. Aplicações de técnicas para a localização de faltas nas redes elétricas podem utilizar as informações fornecidas pelos indicadores de falta para melhorar a precisão na localização e identificação de faltas. As chaves telecomandadas podem isolar e conectar seções de um alimentador em resposta aos comandos de controle, melhorando o gerenciamento na rede para isolar faltas e reconfigurar as regiões que, sem pertencer à seção com falta, foram desconectadas do sistema.

Um dos principais resultados da automatização das redes elétricas de distribuição tem sido o aumento da penetração de tecnologias de geração distribuída (GD) de combustível fóssil e, principalmente, fontes renováveis. Devido à redução dos custos dos dispositivos de eletrônica de potência, sistemas de controle e do aumento dos incentivos ao uso de energias renováveis como fotovoltaica e eólica, a presença de GD em redes de média tensão tem aumentado consideravelmente, e a tendência é que esta penetração de GD seja intensificada nos próximos anos. No estado restaurativo a GD participa como uma fonte de energia localizada e, juntamente com as chaves automáticas e seus mecanismos de controle associados, é possível criar microrredes, em que cargas locais recuperam o fornecimento de energia através da operação ilhada da GD, aumentando desta forma a confiabilidade do sistema. Em cenários de grandes eventos adversos ou desastres naturais, a formação de microrredes tem melhorado a resiliência do sistema, que é definida como a habilidade da rede

para minimizar os impactos negativos na ocorrência de eventos adversos não frequentes (CHANDA; SRIVASTAVA, 2016), e que têm como prioridade restaurar primeiro as cargas críticas, e as cargas não críticas em segundo plano.

Um tipo de cargas importantes em sistemas de distribuição e que dificulta o procedimento de restauração, são as cargas termicamente controladas. Aparelhos de ar condicionado, aquecedores de ambiente e de água, bombas térmicas, etc. fornecem a maior contribuição para a carga total em uma casa típica (UÇAK; PAHWA, 1995). Em operação normal, o ciclo termostático que caracteriza este tipo de carga é mantido alternando períodos de funcionamento e desligamento, e sua contribuição às curvas de carga dos alimentadores não é perceptível porque as cargas que não dependem da temperatura também fazem parte do sistema elétrico. Porém, após uma interrupção de fornecimento de energia devido a uma falta permanente, as cargas termicamente controladas perdem a diversidade, resultando em cargas iniciais excessivas para a energização do sistema, esta condição é definida como *cold load pick up* (CLPU). Pequenas interrupções de 10 minutos podem incrementar a demanda significativamente em sistemas com grande penetração de cargas termicamente controladas e para sistemas de distribuição com uma porcentagem de penetração de cargas termicamente controladas acima de 30%, a condição CLPU deve ser considerada no procedimento de restauração (SCHNEIDER *et al.*, 2016). O método mais utilizado para o processo de restauração em sistemas em condição CLPU tem sido a restauração *step-by-step*, em que o sistema é dividido em subáreas que são reconectadas sequencialmente à rede em intervalos de tempo diferentes. Além da restauração *step-by-step*, a GD tem surgido como solução à perda de diversidade do consumo de energia das cargas termicamente controladas. Em cenários de contingência, os GDs junto com chaves automáticas formam microrredes energizando as cargas térmicas locais, preservando a sua diversidade e evitando o surgimento da condição CLPU no sistema (KUMAR *et al.*, 2010b).

A presença de GD, segundo exposto anteriormente, traz grandes desafios na operação dos sistemas de distribuição em estado restaurativo, mas também pode beneficiar a rede em estado de operação normal. Em estado restaurativo, entre as funcionalidades da GD destacam-se o aumento da confiabilidade do sistema operando de forma ilhada junto com cargas locais, a formação de microrredes com cargas termicamente controladas evitando a perda de diversidade e melhorando a resiliência do sistema ao energizar cargas prioritárias em cenários de grandes eventos adversos. Em estado normal, a presença de GD pode melhorar a qualidade do fornecimento com uma regulação dinâmica do perfil de tensão e trazer benefícios econômicos decorrentes da redução de perdas no sistema. Porém, em sistemas com alta

penetração de GD juntamente com os reguladores de tensão (RT) instalados na rede, podem aumentar os níveis de tensão para limites acima dos aceitáveis de qualidade de energia. Essa superposição entre GDs e RTs também tem causado problemas de operação, por exemplo, a alta penetração de GD induz a perda da radialidade em redes de distribuição provocando fluxo inverso nos RTs, e seus dispositivos de controle dificilmente conseguem determinar a posição final do tap para a regulação de tensão, caracterizando o fenômeno conhecido como *reverse power tap changer runaway*. Trabalhos recentes em redes de distribuição têm propostos a substituição do controle automático local dos taps dos RTs e dos bancos de capacitores chaveados (BC) por uma estratégia de controle centralizado (ULUSKI, 2010). O controle centralizado dos dispositivos de controle de reativos e tensão e da GD permite modificar a posição dos taps dos equipamentos de RT de forma eficiente e é utilizada neste trabalho para aprimorar o procedimento de restauração de redes de grande porte.

Neste trabalho propõe-se uma nova metodologia para resolver os problemas de restauração e sequenciamento de chaves de forma integrada visando a minimização da ENS para sistemas de grande porte com milhares de nós de carga. Nesta abordagem consideram-se os equipamentos de controle de tensão, como capacitores chaveados e reguladores de tensão para auxiliar o processo restaurativo; a presença e controle de geração distribuída com capacidade de *black start* que permite a operação ilhada com grupos de cargas locais. A condição CLPU é inserida no modelo e na técnica de solução, resultando em cargas iniciais excessivas para a energização da rede durante a restauração. O modelo polinomial da carga, ou também chamado modelo ZIP, é utilizado para representar a dependência das cargas com relação à tensão. A injeção de potência reativa pelos capacitores é considerada dependente da tensão. A meta-heurística de Busca Tabu com Vizinhança Variável Reativa, uma nova variação da meta-heurística de Busca Tabu clássica, é proposta para explorar o espaço de busca do problema em análise, junto com uma nova heurística para gerar a sequência de chaveamento. Um sistema teste de 53 nós encontrado na literatura e um sistema real de 7052 nós de uma cidade do litoral brasileiro são utilizados para avaliar a metodologia proposta.

1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O problema de restauração tem sido amplamente abordado na literatura utilizando algoritmo heurísticos, meta-heurísticas, e, nos últimos anos, métodos baseados em modelagem matemática. Entre os trabalhos que abordam o problema de restauração com técnicas heurísticas, detalham-se os seguintes:

Em (AOKI *et al.*, 1989) é proposto um algoritmo baseado no método de gradiente dual efetivo para resolver o problema de restauração de redes. O algoritmo é composto por quatro passos principais, em que no primeiro passo as cargas desligadas devido à falta permanente são conectadas nos alimentadores mais próximos. No segundo passo, as cargas são transferidas para alimentadores adjacentes no caso em que as restrições de operação estejam violadas. No terceiro passo, nos alimentadores com restrições de operação violadas, processos de corte de carga são executados. No quarto passo, são realizadas tentativas de reconexão das cargas que foram desligadas devido ao corte de carga. Dois sistemas testes foram utilizados para demonstrar a eficiência do algoritmo proposto, o primeiro é um sistema de pequeno porte com 78 seções com cargas e o segundo é um sistema real de 6,6 kV de tensão nominal, 11 subestações transformadoras, 87 alimentadores e 1188 seções com cargas.

Em (LIU; LEE; VENKATA, 1988) é proposto um método de solução para o problema de restauração baseado na aplicação de técnicas e regras influenciadas pela na experiência dos operadores. Este sistema especialista é baseado em aproximadamente 180 regras que podem ser utilizadas pelos operadores do sistema para utilizar nos planos de restauração, por meio de grupos de restauração, zonas de restauração e transferência de cargas. Para validar a técnica proposta, utiliza-se um sistema real com 3 subestações, 6 alimentadores, 43 seções de cargas e 49 chaves de manobras.

Em (MORELATO; MONTICELLI, 1989) uma estratégia para restauração de redes radiais baseada na experiência dos operadores é apresentada. Nesta estratégia, os autores utilizam um processo de busca heurística baseada em árvores de decisão binária, que percorre o espaço de possibilidades, ao mesmo tempo em que o conhecimento específico das condições de contorno do problema de restauração evita a explosão combinatória. Um sistema teste com 10 seções de carga e 33 chaves de manobras é utilizado para testar a metodologia.

Em (SHIRMOHAMMADI, 1992), um algoritmo eficiente baseado em regras heurísticas para restauração de redes radiais é proposto. Este algoritmo determina o número de operações que devem ser utilizadas para reconectar áreas isoladas em alimentadores após a incidência de uma falta permanente no sistema, falhas de equipamentos ou para realizar tarefas de manutenção preventiva. Um sistema de distribuição com 4 alimentadores é adotado nos testes realizados, em que cada um dos alimentadores possui, aproximadamente, 500 ramos e 50 chaves.

Em (MIU *et al.*, 1998), propõe-se um método de solução do problema de restauração em sistemas de grande porte considerando usuários prioritários. Os autores atribuem 3 índices às chaves do sistema com a finalidade de restaurar a maior quantidade possível de

consumidores. O primeiro índice está relacionado à máxima capacidade disponível de chaves normalmente abertas para transferir cargas, o segundo está vinculado à distância elétrica (impedância) de chaves normalmente abertas às barras do sistema, e o terceiro está relacionado à quantidade de carga que pode ser transferida pelas chaves normalmente fechadas. Um sistema de 416 nós é utilizado para avaliar o método proposto.

Em (MIU; CHIANG; MCNULTY, 2000), propõe-se um algoritmo para restauração de redes considerando o posicionamento de chaves em níveis e utilizando operações de controle dos capacitores. Cada nível é definido segundo o grau de adjacência dos alimentadores em que as chaves estão dispostas em relação à seção em falta. Por exemplo, chaves normalmente abertas e chaves normalmente fechadas são classificadas no nível 1, se são adjacentes à área fora de serviço, chaves normalmente abertas e chaves normalmente fechadas são classificadas no nível 2, se são adjacentes às chaves do nível 1, e assim por diante. As configurações candidatas são obtidas utilizando operações de chaveamentos em cada um dos níveis. Para cada configuração uma decisão de corte de carga é adotada e operações de controle nos capacitores são realizadas. Um sistema desbalanceado de 1138 nós é utilizado para testar a metodologia proposta obtendo resultados satisfatórios.

Em (LI *et al.*, 2004) é proposta uma técnica para avaliar a confiabilidade de redes de distribuição radiais considerando a sequência de restauração e as restrições físicas e operacionais do sistema. Após identificar a área afetada pela falha no sistema, um algoritmo de busca em largura (*breadth-first-search*) é utilizado para dividir os pontos de cargas afetados em seis classes baseados no tempo de restauração. Um método de fluxo de potência ramo-orientado é incluído na técnica de avaliação de confiabilidade para examinar as restrições da rede após a reconfiguração do sistema devido uma contingência na rede. Resultados são apresentados para um sistema de 36 nós de carga distribuídos em 7 alimentadores, em que o efeito de adicionar algumas chaves automáticas no sistema é analisado.

Em (KLEINBERG; MIU; CHIANG, 2011), os autores propõem utilizar o processo de corte de carga como ferramenta para melhorar a restauração de redes de distribuição. Para isto, um corte de carga direto é incluído na formulação do problema para cargas em serviço. A heurística desenvolvida toma decisões baseada na classificação das chaves candidatas e nas opções de corte de carga. Resultados para um sistema de 416 nós mostram que é possível reduzir o número total de chaveamentos, aumentar o número de consumidores com fornecimento de energia, e/ou aumentar a quantidade de carga restaurada utilizando o procedimento de cortes de carga.

Em (DIMITRIJEVIC; RAJAKOVIC, 2015), os autores propõem uma abordagem de restabelecimento de energia minimizando a quantidade de demanda desenergizada como primeiro objetivo, e a redução de custos de restauração como objetivo secundário. Para atender estes objetivos uma heurística grafo-orientada baseada na lógica de um algoritmo de PRIM modificado é proposta, na qual os coeficientes de custos de operação foram incluídos no estado atual (aberto ou fechado) dos equipamentos de chaveamentos na área desenergizada. Os resultados mostram que os custos da restauração do fornecimento são reduzidos em um sistema de 10 kV de tensão nominal, com 468 consumidores, 608 ramos e 6 subestações. A redução do custo da restauração foi obtida favorecendo as operações em chaves com coeficientes de baixo custo de operação.

Em (DING; BELL; ELDERS, 2016) apresentam-se dois métodos para avaliar e otimizar a configuração de um sistema de distribuição. No primeiro método procura-se minimizar as perdas do sistema de distribuição através da recombinação das subárvores resultantes de cortes realizados nos trechos que unem o nó raiz com o resto do sistema de 221 trechos e 195 nós. O segundo método avalia a confiabilidade do sistema através da análise de cada carga, encontrando o caminho de restauração mais efetivo e seu tempo associado. Para o segundo método um sistema de 69 nós e 70 ramos é analisado.

Entre os trabalhos que abordam o problema de restauração com técnicas meta-heurísticas, detalham-se os seguintes:

Em (TOUNE *et al.*, 2002), os autores realizam a comparação de 04 meta-heurísticas para resolver o problema de restauração de serviço elétrico. O algoritmo genético, *parallel simulated annealing*, busca tabu e a busca tabu reativa foram implementados e comparados de forma quantitativa e qualitativa na simulação de sistemas de 18, 24, 30, 36, 48 e 60 seções, concluindo que a busca tabu reativa gera melhores resultados. A busca tabu reativa, uma variação da busca tabu clássica, utiliza um mecanismo reativo em que a dimensão da lista tabu se torna variável dependendo da frequência de repetição de configurações candidatas através das iterações. Para evitar soluções ótimas locais e evitar o fenômeno de ciclagem, passos aleatórios de uma lista auxiliar são utilizados.

Em (WATANABE; NODU, 2004), os autores propõem uma metodologia de dois estágios para resolver o problema de restauração e definir uma sequência de chaveamentos para minimizar a quantidade de energia não suprida esperada após uma falta permanente. No primeiro estágio propõe-se utilizar o algoritmo genético para encontrar configurações radiais para resolver o problema de restabelecimento de energia. Em um segundo estágio, um novo algoritmo genético é utilizado para encontrar a sequência de chaveamentos em que as chaves

que alteram seu estado são reordenadas evitando criar laços e mantendo a radialidade durante todo o processo. Um sistema teste com 27 nós é utilizado para validar o algoritmo proposto.

Em (SANTOS *et al.*, 2010) propõe-se a solução dos problemas de reconfiguração e restauração através da combinação da técnica da representação nó profundidade (RNP) e um algoritmo evolutivo multiobjetivo baseado em tabelas de subpopulação, para redes de distribuição de grande porte. Testes foram realizados em um sistema real de 3860 nós com 632 chaves.

Em (CARVALHO; FERREIRA; BARRUNCHO, 2007) propõe-se uma técnica de solução para o problema de restauração utilizando dois estágios. No primeiro estágio, uma abordagem de otimização evolutiva de busca específica, o algoritmo genético com árvore de dispersão, é proposta para encontrar configurações pós-falta factíveis. Na segunda fase uma abordagem de programação dinâmica é proposta para determinar a sequência de chaveamentos ótima da configuração encontrada no primeiro estágio. Um sistema de distribuição com tensão nominal de 15 kV e 633 nós é utilizado para avaliar a metodologia proposta em que resultados satisfatórios foram obtidos.

Em (MATHIAS-NETO; MANTOVANI, 2016), os autores propõem o uso da meta-heurística Busca Tabu e da representação nó profundidade (RNP) para o problema de restauração de redes. Neste trabalho adiciona-se ao trabalho original da RNP um novo operador CUT para realizar procedimentos de corte e operação ilhada com geração distribuída. Cada um dos operadores é selecionado através de uma porcentagem de escolha para gerar configurações candidatas, priorizando a intensificação sobre a diversificação. Resultados foram obtidos e apresentados para um sistema teste de 37 nós.

Em (AUGUGLIARO; DUSONCHET; SANSEVERINO, 1998) é proposta uma técnica baseada na meta-heurística algoritmo genético. Nesta abordagem, o problema multi-objetivo inicial é transformado em um problema mono-objetivo utilizando o método de ponderação de pesos, dependendo da importância das funções objetivo. Um sistema de 90 nós de cargas é utilizado para avaliar a técnica proposta.

Em (FUKUYAMA; HSAIO-DONG CHIANG, 1995) uma técnica baseada em um algoritmo genético paralelo é apresentada para o problema de restauração do serviço de fornecimento de energia. O principal objetivo da abordagem apresentada é restaurar a maior quantidade de carga possível utilizando no processo de reconfiguração da rede os alimentadores com capacidade de reserva sem violar as restrições de operação. Um sistema teste de 25 nós e um sistema teste de 69 nós são utilizados para avaliar a metodologia proposta.

Em (AUGUGLIARO; DUSONCHET; SANSEVERINO, 2001) propõe-se uma abordagem multi-objetivo para o problema de restauração. O algoritmo utilizado é o NSGA (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm*), que divide a população de soluções em classes de dominância, com o objetivo de obter soluções diversas e de boa qualidade. No modelo da função objetivo considera-se reduzir o número de usuários sem fornecimento de energia e minimizar as perdas na rede. O Sistema teste utilizado possui 109 trechos, 81 nós de carga e 18 bancos de capacitores.

Em (KUMAR; DAS; SHARMA, 2008) uma abordagem multi-objetiva do problema de restauração utilizando a meta-heurística NSGA-II é proposta. Nesta abordagem, consideram-se as seguintes funções objetivo: maximizar a quantidade de carga restaurada, minimizar a operação de chaves automáticas, minimizar o número de operações de chaves manuais e reduzir as perdas no sistema. Para escolher uma solução, os autores sugerem que nem todas as funções objetivo têm igual importância, sendo que maximizar a carga restaurada é a mais importante. Quatro sistemas teste de 10, 14, 37 e 75 chaves com 13, 10, 32 e 173 nós, respectivamente, são utilizados para avaliar o algoritmo proposto.

Entre os trabalhos que abordam o problema de restauração com modelagem matemática, detalham-se os seguintes:

Em (ROMERO *et al.*, 2016) apresenta-se um modelo matemático para o problema de restauração de redes. Neste modelo, o problema de programação não linear inteiro misto é convertido em um problema de programação cônica de segunda ordem inteiro misto com a finalidade de ser resolvido através de *solvers* comerciais de programação convexa. Testes são realizados utilizando o solver CPLEX em um sistema de 53 nós em que a solução ótima do problema é garantida.

Em (CHEN *et al.*, 2017) propõe-se um esquema sequencial (*sequential service restoration* – SSR) para o problema de restauração de serviço de fornecimento de energia utilizando a formação de microrredes na ocorrência de eventos de interrupção de grandes proporções. Os autores propõem um esquema SSR para definir os passos de restauração que possam coordenar as operações dos geradores distribuídos e operações de chaveamentos em vários estágios de tempo. O problema é formulado como um problema de programação linear inteiro misto (PLIM), e é aplicado em um sistema teste do IEEE modificado de 123 nós. O esquema SSR é formado por 4 passos, no primeiro passo informação sobre a falha é coletada através do OMS (*outage management system*), no segundo passo a falta é localizada e isolada através de operações de chaveamentos, no terceiro passo uma análise é realizada para identificar as fontes que podem participar do processo restaurativo e, finalmente, no quarto

passo a sequência de restauração é obtida com a resolução do modelo PLIM utilizando o *solver* comercial CPLEX.

Em (ARIF *et al.*, 2018) propõe-se uma abordagem linear inteira mista estocástica de dois estágios para o problema de restauração com incertezas no tempo de reparo e demanda. No primeiro estágio, equipes de manutenção são encaminhadas em direção aos componentes da rede que estão com falha. No segundo estágio a restauração do sistema é realizada utilizando geração distribuída e processos de reconfiguração. Dos sistemas testes são utilizados, o primeiro possui 34 nós e o segundo possui 8500 nós de carga.

Em (POUDEL; DUBEY, 2018) um modelo linear inteiro misto é proposto com o objetivo de maximizar a resiliência de um sistema durante condições de operação adversas, restaurando a maior quantidade de cargas críticas utilizando recursos de energia dos geradores distribuídos. Dois sistemas testes são utilizados para avaliar o modelo proposto, o primeiro sistema possui 123 nós e 11 cargas críticas, enquanto que o segundo sistema possui 906 nós e 17 cargas críticas.

Em (CHEN *et al.*, 2018) é formulado um modelo de programação inteira mista considerando redes trifásicas desbalanceadas para um esquema de restauração sequencial utilizando geração distribuída. Desta forma, é assumido que após a falta todas as chaves são abertas, e a partir destas topologias, as cargas são reconectadas sequencialmente. Resultados são apresentados para um sistema de 123 nós.

Em (LI *et al.*, 2018), os autores propõem uma formulação matemática cônica de segunda ordem inteira mista para o problema de restauração em sistemas de distribuição com geração distribuída. O problema de restabelecimento é formulado como sendo multi-objetivo, minimizando a carga não restaurada e o número de chaveamentos. Dois sistemas testes são utilizados para avaliar a metodologia proposta, o primeiro é um sistema de 33 nós e o segundo é um sistema de 84 nós.

Entre os trabalhos que abordam a ativação da condição CLPU em sistemas de distribuição, detalham-se os seguintes:

Em (UÇAK; PAHWA, 1995) utiliza-se o método de restauração passo-a-passo (*step-by-step restoration*) para reconectar cargas da rede após uma interrupção em que a perda de diversidade de cargas termicamente controladas geram a condição CLPU no sistema. O processo de restauração *step-by-step* divide o sistema em regiões e as restaura por estágios com o objetivo de aumentar a confiabilidade do sistema e reduzir a duração do tempo médio de interrupção por usuário. Para este fim, um modelo de função exponencial retardado é utilizado para caracterizar a condição CLPU, e uma estratégia de troca de pares adjacentes

(*adjacent pairwise interchange*) é utilizada para determinar a sequência em que as regiões são energizadas. Um sistema teste de 12 seções em 4 alimentadores é utilizado para avaliar a metodologia proposta.

Em (CHAVALI; PAHWA; DAS, 2002) a meta-heurística de algoritmo genético é proposta para restaurar um sistema de distribuição na condição CLPU. Nesta abordagem um modelo de carga com decaimento exponencial é utilizado. Para a carga que é reconectada, e sua posterior recuperação de diversidade. Um sistema com 10 nós de carga é utilizado para avaliar a técnica proposta.

Em (KUMAR *et al.*, 2010a) propõe-se a alocação de geração distribuída para evitar que a condição CLPU apareça em sistemas de distribuição com cargas termicamente controladas. Uma metodologia baseada no algoritmo genético é implementada para alocar geradores distribuídos em regiões próximas às cargas de aquecimento. Desta forma, em um cenário de falta no sistema, os geradores alocados operam de forma ilhada com as cargas térmicas, evitando a perda de diversidade e o aumento de cargas iniciais excessivas no sistema, permitindo a reconexão das cargas ilhadas após o tempo de reparo da falha. O sistema teste utilizado para avaliar a metodologia proposta, contém 33 nós e tensão nominal de 12,66 kV em que resultados satisfatórios foram obtidos.

Em (SCHNEIDER *et al.*, 2016), uma nova metodologia é proposta para avaliar a magnitude de pico e duração da condição CLPU utilizando um modelo multiestado da carga. Os autores utilizam a hipótese que a possibilidade para estimar o crescimento de carga na condição CLPU é crítica para o desenvolvimento de processos efetivos de restauração.

Em (ALNUJAIMI; ABIDO; ALMUHAINI, 2018), os autores analisam os índices de confiabilidade em sistemas de distribuição na condição CLPU. Os índices de confiabilidade selecionados para análise são o SAIFI (*system average interruption frequency index*), SAIDI (*system average interruption duration index*), CAIDI (*customer average interruption duration index*) e ENS (*energy not supplied*), em que a meta-heurística de busca do raio (*lightning search algorithm*) é utilizada para encontrar a sequência ótima de restauração para cada carga. O sistema utilizado para avaliar a abordagem proposta possui 10 seções de carga.

Entre os trabalhos que abordam o problema de restauração com foco na formação de microrredes com GD e grupos de cargas locais, detalham-se os seguintes:

Em (PHAM; BÉSANGER; HADJSAID, 2009) propõe-se reduzir os efeitos de um blecaute de grandes magnitudes em sistemas de distribuição utilizando uma alta penetração de geradores distribuídos com capacidade de *black start* em um contexto de redes inteligentes. O sistema teste utilizado contém duas subestações, a primeira subestação possui 55 nós e a

segunda subestação é constituída por 300 nós. A partir dos resultados obtidos, conclui-se que o processo de a restauração é melhorado com a presença de GDs, principalmente GDs de grande capacidade, porém, investimentos na instalação de chaves automáticas são necessários.

Em (SONG *et al.*, 2013) propõe-se diferentes esquemas de operação para acionar funções inteligentes entre os recursos de energia distribuída (*distributed energy resources – DER*) e as redes de distribuição inteligentes (*smart grid distribution network – SGDN*). As DER oferecem novas oportunidades de melhoria na eficiência do sistema de distribuição, mas para isto são necessários esquemas avançados de operação com interconexão entre as áreas de usuários e a possibilidade de operação de forma autônoma, sem comunicação com o centro de controle do sistema de distribuição existente. Entre as melhorias que as DER oferecem, encontram-se a redução de perdas durante operação normal e o fornecimento de energia para cargas locais durante condições anormais. Um sistema teste de 32 nós é utilizado para avaliar as melhorias propostas no trabalho, enfatizando a necessidade de acordos contratuais entre o operador da SGDN e os donos dos DER através de incentivos para que os últimos possam se equipar de dispositivos de controle e monitoramento, as DER.

Em (CHANDA; SRIVASTAVA, 2016) apresenta-se uma abordagem sobre a resiliência em sistemas de distribuição comparando cargas prioritárias, tipos de interrupção e índices de medição com relação ao conceito de confiabilidade de uma rede. Os autores afirmam que falta definir um índice de avaliação de resiliência em redes de distribuição, para isto propõem um método para quantificar a resiliência de um sistema utilizando índices baseados na teoria de percolação da rede e a análise de complexidade da rede. Os autores avaliam a resiliência de um sistema utilizando um algoritmo de reconfiguração de dois estágios com microrredes.

1.2 ENTENDENDO O PROBLEMA DE RESTAURAÇÃO

Nesta seção são apresentados os conceitos e definições necessários para mostrar a complexidade do problema de restauração em redes de distribuição. Estes tópicos são importantes para a resolução do problema, e muitas vezes não são abordados por trabalhos nesta área de pesquisa. Alguns destes conceitos são revisados com maiores detalhes em seções posteriores, porém, o objetivo desta seção é apresentá-los de forma sucinta e gerar a motivação necessária para ser objeto de análise.

1.2.1 O carregamento do sistema como dado de entrada para o algoritmo de restauração

O resultado de todo algoritmo de restauração é dependente do nível de carregamento da rede no instante da obtenção das informações necessárias que devem ser fornecidas como dados de entrada para a metodologia utilizada. Assumir um carregamento alto no sistema pode resultar em um número reduzido de usuários reconectados na rede durante o tempo que o sistema opera em estado restaurativo, enquanto que assumir um nível de carregamento baixo pode ocasionar que os limites de operação, de tensão, corrente ou potência, sejam violados na operação em estado restaurativo. Muitos trabalhos na área desconsideram o carregamento do sistema no estado restaurativo, assumindo um valor de carregamento invariável ao longo do tempo, desconsiderando os hábitos de consumo dos consumidores ligados no sistema de distribuição. Por outro lado, existem trabalhos na área que estimam o carregamento da rede como parte dos dados de entrada para o problema de restauração. Na literatura, o carregamento do sistema tem sido obtido por meio de curvas de carga típicas (ĆURČIĆ *et al.*, 1995) estimadores de cargas (MASSIGNAN *et al.*, 2017) ou valores adquiridos por meio de estimadores de estado (LEITE; VARGAS; MANTOVANI, 2018).

Na prática, em sistemas de distribuição atuais o operador do sistema estima o valor de carregamento na rede baseado na experiência, curvas de carga, e na medida do valor de corrente na saída dos alimentadores durante o estado restaurativo. Desta forma, se uma falta acontece em um alimentador, por exemplo às 14h, o operador do sistema sabe que parte da carga desenergizada pode ser remanejada para outros alimentadores específicos, porém se a falha no sistema continua próximo do horário de pico, o operador sabe que a topologia corrente não será factível, portanto, um novo remanejamento de carga deve ser realizado.

1.2.2 A topologia do sistema como dado de entrada para o algoritmo de restauração

A topologia da rede que deve ser fornecida como dado de entrada para o algoritmo de restauração é a configuração do sistema com a região em falta isolada. A localização da falta é uma etapa prévia ao problema de restauração de serviço e deve ser resolvida, também, em tempo real. A demora em encontrar a seção com falha atrasa o início das manobras de chaveamentos necessárias para reconectar os usuários que se encontram em seções saudáveis (sem falha). Este atraso gera desconforto aos usuários e é motivo de multa por piorar os indicadores de continuidade vinculados à duração da interrupção, como o DEC ou a ENS. Em sistemas de distribuição com cargas termicamente controladas a demora em encontrar a seção

com falha pode ativar a condição CLPU, resultando em cargas iniciais excessivas para a energização da rede durante a restauração.

Na prática, o operador do sistema de distribuição estima a localização da seção em falta utilizando as chamadas telefônicas (*call centers*) recebidas dos usuários informando o corte de fornecimento de energia elétrica até que alguma equipe de manutenção possa confirmar visualmente o equipamento ou seção com falha. Muitas vezes, a área em falha é estimada em apenas uma seção (conjunto de equipamentos limitados por chaves de manobras), ou em um conjunto de seções limitadas entre duas chaves específicas. As equipes de manutenção são distribuídas geograficamente de forma espacial na área coberta pelo sistema de distribuição e, em média, para cada conjunto de 72 chaves de manobras manuais existe uma equipe de manutenção (BOBEL, 2007), embora estas equipes se mantenham em constante trânsito. As manobras de chaveamento são rápidas, sendo que, em média, demoram um minuto para serem executadas de forma telecomandada ou manual, no entanto, o que torna demorado o processo de chaveamento manual é o deslocamento das equipes de manutenção. O tempo de operação de deslocamento das equipes de manutenção envolve o tempo de trânsito, definir a área de segurança, etc., e pode demorar, em média, 40 minutos (este valor varia de empresa para empresa).

1.2.3 Função objetivo do problema de restauração

Diversas funções objetivo têm sido consideradas pelos algoritmos de restauração propostos na literatura, entre as quais destacam-se:

- a. Minimizar a quantidade de demanda sem fornecimento de energia (ou maximizar a quantidade de carga reenergizada);
- b. Minimizar o número de chaveamentos, priorizando o uso de chaves telecomandadas sobre chaves manuais;
- c. Minimizar o valor de perdas no sistema;
- d. Balanceamento de cargas entre fases.

As funções objetivo c. e d. são importantes na operação normal de sistemas de distribuição, porém representam pouco benefício, e podem ser conflitantes com os objetivos principais a. e b. em um estado de emergência como é o estado restaurativo. Neste trabalho as duas primeiras funções objetivo são abordadas de forma integradas para reduzir o montante da ENS.

1.2.4 Solução final do algoritmo de restauração: sequência de chaveamento

A solução final que um algoritmo de restauração deve fornecer é a sequência em que as chaves devem ser manobradas para levar a rede da configuração pós-falta até a configuração final no estado restaurativo. Uma lista com chaves que devem ser abertas e fechadas sem uma ordem de operação não garante que etapas intermediárias do processo não violem alguma restrição de operação. Uma estratégia factível é efetuar todos os chaveamentos de abertura e, logo, efetuar todos os chaveamentos de fechamento, porém, esta estratégia de manobras pode prejudicar os índices de continuidade como energia não suprida (ENS), duração equivalente de interrupção por unidade consumidora (DEC) e frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora (FEC). Neste trabalho propõe-se um novo algoritmo para obter a sequência de chaveamento para o problema de restauração.

1.2.5 Tempo de reparo

O tempo de reparo da falha no sistema é altamente dependente do tempo de deslocamento da equipe de manutenção nas áreas de interesse. Este tempo de deslocamento está sujeito ao dia, horário, condições climáticas e ao pessoal disponível no momento de ocorrência da falta. Por exemplo, um cabo partido em baixa tensão pode demorar 80 minutos para ser reparado em que 40 minutos são utilizados no deslocamento da equipe de manutenção, enquanto que um cabo partido em alta tensão pode demorar 130 minutos devido à necessidade de equipamentos especializados para o procedimento de reparo. Em caso de um transformador queimado são necessários entre 180 a 240 minutos para recuperar o fornecimento normal em áreas urbanas da rede, enquanto que para um transformador queimado em áreas rurais pode demorar até um dia para o restabelecimento das condições normais de operação.

1.2.6 Tempo de processamento de um algoritmo de restauração

Em um cenário de emergência como a interrupção de fornecimento elétrico devido a uma falta permanente na rede os operadores no centro de controle da empresa de distribuição estão submetidos a uma pressão muito alta para agir de forma rápida e eficiente (ĆURČIĆ *et al.*, 1995). Nesse sentido, os operadores devem ser corretamente assistidos por ferramentas computacionais adequadas que auxiliem os processos de visualização do sistema e as tomadas de decisões. Portanto, um algoritmo de restauração deve ser rápido e, idealmente, deve fornecer resultados em tempos menores do que um minuto (ĆURČIĆ *et al.*, 1995). Este

tempo pode ser afetado por vários fatores, como as características do algoritmo, os equipamentos de controle considerados, as características do computador utilizado ou a complexidade do problema e do sistema em análise.

1.2.7 Características dos algoritmos de restauração para sistemas de distribuição

Os algoritmos propostos na literatura para resolver o problema de restauração em sistemas de distribuição, podem ser classificados em:

a. Heurísticas: algoritmos de procedimentos simples, muitas vezes baseados na experiência do operador do sistema. Fornecem soluções de boa qualidade em tempos baixos. São adequados para serem utilizados em sistemas de pequeno e grande porte. Não garantem otimalidade.

b. Meta-heurísticas: gerenciam processos heurísticos e tentam evitar a convergência para ótimos locais, fornecem soluções de boa qualidade em tempos relativamente baixos. Utilizados para sistemas de pequeno e grande porte. Não garantem otimalidade.

c. Modelagem matemática: algoritmos que garantem otimalidade. Fornecem ótimos globais em tempos relativamente altos. Utilizados para sistemas de pequeno porte. Para sistemas de grande porte, podem ou não fornecer solução, sendo limitados pelo solver comercial utilizado ou pelas características do computador empregado.

Neste trabalho conclui-se que os algoritmos meta-heurísticos e os algoritmos baseados em modelagem matemática, são complementares entre si. Para sistemas de pequeno porte, os algoritmos meta-heurísticos fornecem soluções de boa qualidade, ou ótimos locais, com tempos muito baixos, mas sem garantir otimalidade. No entanto uma meta-heurística pode ser avaliada segundo a qualidade das soluções que são geradas, por exemplo a dispersão entre as soluções, ou através de análises estatísticas. Por outro lado, metodologias baseadas em modelagem matemática garantem soluções ótimas globais em tempos relativamente altos.

Para sistemas reais de grande porte, algoritmos meta-heurísticos fornecem soluções de boa qualidade, ou ótimos locais, utilizando tempos relativamente baixos. Algoritmos baseados em modelagem matemática não fornecem soluções para sistemas de grande porte, por limitações do solver comercial utilizado, ou pelas características do computador em uso, e também devido à complexidade computacional dos algoritmos de otimização clássica. Uma alternativa de solução é abordar o problema de restauração para sistemas reais, com milhares de nós de carga, por meio de técnicas meta-heurísticas, mas utilizando técnicas baseadas em

modelagem matemáticas como *benchmarking*, com a finalidade de ajustar os parâmetros das meta-heurísticas em valores adequados.

1.2.8 Número de fases do sistema que deve ser considerado pelo algoritmo de restauração

O problema de restauração de serviço em redes de distribuição é um problema que deve ser resolvido em tempo real, ou seja, deve fornecer uma sequência de chaveamento no menor tempo possível para ser executada pelos funcionários da empresa concessionária. Os sistemas reais de distribuição são normalmente trifásicos desequilibrados, embora muitos problemas na área de distribuição, como o planejamento de distribuição em redes primárias, utilizam equivalentes monofásico como parte da modelagem da rede. Usualmente na saída dos alimentadores, os valores de corrente entre as fases não são muito diferentes, e devido o problema de restauração necessitar de solução em tempo real, utilizar equivalentes monofásicos para representar a rede e encontrar a solução do problema é uma hipótese válida e não compromete a qualidade das soluções fornecidas pelos algoritmos.

1.2.9 Cargas prioritárias

Cargas prioritárias são consumidores que sofrem significativamente mais danos e prejuízos com a perda de fornecimento de energia elétrica em comparação com outros tipos de usuários. Em geral, são consumidores mais sensíveis aos cortes de suprimento de energia e incluem hospitais e instituições similares, sedes de governo, embaixadas, centros de comunicação como televisão ou rádio, escolas, centros públicos em que grandes grupos de pessoas se concentram como teatros, cinemas, etc. (ĆURČIĆ *et al.*, 1995). A atenção especial que as empresas distribuidoras dispensa para estes tipos de cargas, usualmente estão refletidas e reguladas por leis, códigos de práticas ou contratos entre usuários e empresas de distribuição (ĆURČIĆ *et al.*, 1995). Dependendo da natureza do usuário prioritário, eles podem estar equipados com fontes alternativas de fornecimento como geradores distribuídos, porém, as empresas de energia têm a obrigação de minimizar a interrupção destes consumidores prioritários. Uma lista hierarquizada de usuários prioritários deve ser considerada durante a solução do problema de restauração. Idealmente, um algoritmo de restauração deve executar a reconexão de todas as cargas desconectadas, e caso não seja possível, deve-se restaurar as cargas prioritárias em ordem hierarquizada considerando, por exemplo, que a carga de um hospital é mais importante que a carga de um cinema (ĆURČIĆ *et al.*, 1995).

1.2.10 Equipamentos de controle de tensão

Os equipamentos de controle de tensão como bancos de capacitores e reguladores de tensão, têm sido utilizados para melhorar as características operacionais no sistema, como melhorar o perfil de tensão, reduzir a corrente pelos condutores e as perdas, etc. No planejamento de curto prazo de sistemas de distribuição, normalmente, a instalação de equipamentos de controle de tensão não considera a possibilidade de melhorar as condições de operação da rede durante o processo restaurativo. Porém, no capítulo 6, resultados mostram que considerando a possibilidade de controle destes dispositivos, as respostas do algoritmo de restauração podem ser melhoradas.

1.2.11 Geração distribuída

Em anos recentes, a geração distribuída baseada em fontes renováveis tem recebido uma ampla aceitação porque representam energia livre de poluição e não depende de recursos naturais limitados. Convencionalmente, os sistemas de distribuição têm sido planejados do ponto de vista que a subestação primária é a única fonte de energia. Portanto, o fluxo de potência esperado deve ser em um único sentido, das subestações até as cargas. O aumento da penetração de unidades de geração distribuída, com parâmetros imprevisíveis devido às mudanças permanentes das condições ambientais, origina novos desafios nos problemas de planejamento e operação dos sistemas de distribuição, incluindo o fluxo de potência bidirecional, a interação da geração distribuída com equipamentos de controle de tensão, a coordenação complexa de dispositivos de controle e proteção, aumento das correntes de faltas, a flutuação de tensão devido à variação de potência na saída dos geradores baseados em energias renováveis, etc. Em procedimentos atuais de operação, as unidades de geração distribuída são desconectadas automaticamente quando uma falta ocorre em redes de distribuição. Estas desconexões são efetuadas para minimizar os efeitos das unidades de geração distribuída nas correntes de faltas (ZIDAN *et al.*, 2017).

Em cenários de faltas permanentes, a geração distribuída pode melhorar a confiabilidade do sistema operando de forma ilhada junto com cargas locais. Tecnologias atuais de geração distribuída são baseadas no uso de combustíveis fósseis e fontes renováveis de energia. Devido a sua intermitência, geradores eólicos e solares não são apropriados para restauração sem a integração com outras fontes de energia distribuída, (WANG; WANG; CHEN, 2016) como armazenadores de energia, enquanto que geradores que utilizam

combustíveis fósseis como turbinas a gás e microturbinas são apropriados para operar ilhados em cenários de contingências.

1.2.12 Corte de carga

Em certos cenários de falta, restaurar toda a carga desconectada após a contingência não é possível. Desta forma, um corte de carga pode ser necessário para obter soluções factíveis que atendam os limites operacionais, como a tensão nos nós de carga, corrente pelos cabos e a potência dos transformadores. Na condição CLPU, cargas iniciais excessivas para serem restauradas fazem com que o algoritmo de restauração forneça soluções tendo do corte de carga como uma necessidade, dificultando o processo restaurativo e dividindo o processo de reenergização em blocos de cargas para diferentes intervalos de tempos. O corte de fornecimento, normalmente, é evitado para usuários que não foram afetados pela falta permanente. Isto com o objetivo de evitar prejudicar índices de continuidade como o FEC e evitar, também, multas para a distribuidora por parte da agência reguladora. Porém, em condições específicas, como a existência de cargas prioritárias e contratos assinados entre concessionárias e usuários, cargas não afetadas diretamente pela falha podem ser desligadas com o propósito de melhorar os valores das funções objetivos.

1.2.13 A condição *Cold Load Pick Up*

Muitas cidades no mundo apresentam condições climáticas extremas em diferentes épocas do ano, atingindo temperaturas muito baixas (por exemplo, $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$) ou muito altas (por exemplo, $45\text{ }^{\circ}\text{C}$). Equipamentos termicamente controlados, de aquecimento ou refrigeração, são utilizados para tornar estas condições climáticas extremas em condições aceitáveis para o desenvolvimento de uma vida cotidiana normal. Entre estes equipamentos termicamente controlados podem ser encontrados os aquecedores de ambiente, bombas de calor ou ar condicionado. A condição CLPU em sistemas de distribuição é uma condição em que a diversidade destas cargas de aquecimento é perdida como resultado da interrupção prolongada do fornecimento de energia elétrica. Decorrente desta perda de diversidade, o valor da demanda no sistema aumenta em duas ou três vezes com relação ao seu valor típico, resultando em cargas iniciais excessivas para a energização da rede durante a restauração.

Para entender como a carga no sistema aumenta devido a perda de diversidade, é necessário entender os hábitos de consumo dos consumidores em um sistema de distribuição. Normalmente, a demanda máxima individual dos consumidores ocorre em momentos

diferentes do dia, isto porque cada usuário tem hábitos de consumo próprios e independentes. Porém, se todas as demandas máximas individuais aconteceram no mesmo instante, o sistema de distribuição entraria em um estado de operação crítico, em que os equipamentos da rede operariam próximos aos seus limites, inclusive sendo necessário o corte de fornecimento de energia elétrica para determinados consumidores.

Uma situação similar acontece nos sistemas de distribuição quando a condição CLPU é ativada. No instante de reenergização de cargas após uma falta permanente em um cenário de condição climática extrema, os equipamentos termicamente controlados entram em funcionamento de forma simultânea, resultando em cargas iniciais excessivas, porque este tipo de carga representa aproximadamente o 70% da demanda total (ALNUJAIMI; ABIDO; ALMUHAINI, 2018). Evidentemente, outros fatores devem ser levados em consideração para a análise da condição CLPU, como por exemplo, o instante em que as cargas são reenergizadas. Em condições climáticas gélidas, quanto mais tempo um prédio permanece sem aquecimento a temperatura nos ambientes continua a diminuir, o que representa um aumento da carga que deve ser reenergizada pela empresa distribuidora. Nestas situações, procedimentos rápidos de localização de falta, isolamento da região com falha, e a restauração de serviço são necessários para diminuir, ou até evitar, os efeitos da condição CLPU.

Concluindo, o aumento de carga em um sistema de distribuição decorrente da ativação da condição CLPU, não é consequência do aumento no consumo dos equipamentos termicamente controlados acima do máximo, mas sim é resultado de que estes equipamentos estão funcionando ao mesmo tempo. Portanto, a percepção que a empresa distribuidora tem é que a demanda no sistema tem se multiplicado em duas ou três vezes, embora na realidade isto é produto da operação simultânea e contínua dos equipamentos termicamente controlados.

1.2.14 O FLISR e a função de *Self-Healing*

Os sistemas de distribuição convencionais são planejados de forma malhada e operados de forma radial. Quando uma falta é detectada no sistema, ela tem que ser localizada e isolada no menor tempo possível. Logo, a implementação de um plano de restauração permite reconectar usuários desenergizados transferindo-os para alimentadores adjacentes. O conjunto destes procedimentos tem sido denominado localização de falta, isolamento, e restauração de serviço, ou simplesmente FLISR (*fault location, isolation and service restoration*) pela sigla em inglês.

O FLISR é um componente fundamental da função de *self-healing* (ou auto-cura em redes de distribuição) em avançados sistemas de gerenciamento de distribuição ou *distribution management systems* (DMS). O FLISR permite às empresas distribuidoras aprimorar a confiabilidade do sistema de distribuição e receber benefícios econômicos ao garantir a continuidade do serviço (ZIDAN *et al.*, 2017). Usualmente o FLISR é considerado como um procedimento de dois estágios, no primeiro estágio detecta-se e isola a falta, enquanto que no segundo estágio os usuários da rede são reconectados. Sistemas atuais de distribuição não estão totalmente automatizados e, portanto, as ações requeridas pela função FLISR são realizadas manualmente pelos operadores do sistema.

O *Self-healing* pode ser descrito como a capacidade de um sistema de distribuição para, quando sujeito a uma falta, poder realizar ações corretivas para restabelecer-se por si mesmo no melhor estado possível com objetivo de desempenhar suas funções básicas sem violar nenhuma restrição (ZIDAN *et al.*, 2017). A rede responde instantaneamente aos problemas do sistema com o objetivo de atenuar os efeitos da interrupção de fornecimento. Esta resposta do sistema é realizada por meio de uma autoavaliação contínua para detectar, analisar, responder e restaurar os componentes da rede. A função *self-healing* implementa os dois estágios do FLISR como um único bloco, de forma automatizada para minimizar os efeitos de interrupção de serviço, por meio da localização e isolamento dos componentes com falha, e recuperando o sistema imediatamente sem intervenção humana.

1.2.15 Problemas similares: os problemas de reconfiguração, restauração e resiliência

Três problemas similares em sistemas de distribuição podem ser encontrados na literatura, porém possuem funções objetivo diferentes.

O problema de reconfiguração de sistemas de distribuição é um problema de planejamento da operação e tem por função objetivo encontrar o melhor estado operacional das chaves (aberto ou fechado) para um sistema de distribuição operar radialmente atingindo certos objetivos, como a minimização de perdas e/ou melhorar o perfil de tensão. Dependendo da região geográfica do sistema, condições climáticas e outras variáveis, a reconfiguração de um sistema deve ser realizada algumas vezes por ano, por exemplo, em inverno e verão, ou quando o sistema cresce de tal forma que uma nova configuração ótima seja necessária, o que pode acontecer após certo número de anos, em que as condições de previsão de cargas consideradas no planejamento da expansão sofreu grandes alterações.

O problema de restauração de serviço é um problema de operação de natureza emergencial. Tem por objetivo minimizar as consequências decorrentes de faltas permanentes.

Usualmente, os usuários afetados por uma falta em um alimentador são realocados em alimentadores vizinhos ou de suporte. A restauração da rede é um problema que deve ser resolvido em tempo real, portanto deve ser resolvido no menor tempo computacional possível para uma rápida implementação através da realização de uma sequência de manobras de chaves manuais ou telecomandadas. As principais ferramentas para avaliar a qualidade de um algoritmo de restauração são os índices de continuidade como o DEC ou a ENS.

O problema de resiliência em sistemas de distribuição é um problema relativamente recente na literatura e tem como principal cenário de aplicação preservar a operação do sistema em condições climáticas extremas adversas. Em países que estão sujeitos a fenômenos atmosféricos como furacões, tufões, entre outros, muitas vezes o fornecimento de energia elétrica é perdido em grandes regiões geográficas. Nestas condições de emergência, a geração distribuída com a condição *black start* apresenta-se como uma fonte de geração importante, permitindo a sua operação com grupos de cargas de forma ilhada. Na literatura, os índices de continuidade não são considerados como bons indicadores para avaliar um algoritmo de resiliência, e não existe um consenso em quais deveriam ser os parâmetros que devem ser avaliados para concluir sobre o nível de resiliência de um sistema (CHANDA; SRIVASTAVA, 2016).

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este documento está dividido em 7 capítulos. No capítulo 1 apresentam-se a motivação do trabalho, a revisão da literatura, uma lista de tópicos vinculados ao problema de restauração de redes de distribuição e esta seção com a estrutura do texto. No capítulo 2 analisam-se os sistemas de distribuição radiais, a representação grafo-orientada, o método para avaliar as variáveis de operação, os equipamentos existentes nos sistema de distribuição atuais como geração distribuída e equipamentos de controle de tensão, modelos dependentes da tensão para cargas e capacitores, condições de operação como a CLPU, e os índices de continuidade de sistemas de distribuição. No capítulo 3, apresenta-se o modelo do problema de restauração utilizado. No capítulo 4, a proposta de uma variação da meta-heurística de Busca Tabu (BT), a Busca Tabu com Vizinhança Variável Reativa (BTVVR) é apresentada, discutida e generalizada. No capítulo 5 apresenta-se a metodologia de solução proposta para o problema de restauração. Neste capítulo é apresentada também a representação grafo-orientada de dois níveis (binível), a BTVVR aplicada ao problema de restauração, a estratégia de controle centralizado de equipamentos de controle de tensão, a heurística para obter a sequência de chaveamento e o processo de formação de microrredes dinâmica com a

finalidade de aumentar a confiabilidade das redes de distribuição. No capítulo 6 os resultados são apresentados com o objetivo de validar e avaliar a metodologia proposta, para isto, dois sistemas foram utilizados nos testes, um sistema teste de 53 nós encontrado na literatura e um sistema real de grande porte de 7052 nós de uma cidade do litoral brasileiro. No capítulo 7 são apresentadas as conclusões e trabalhos futuros.

2 SISTEMAS RADIAIS DE DISTRIBUIÇÃO

As redes de distribuição de energia elétrica são normalmente planejadas de forma malhada e operadas de forma radial. A estrutura malhada destes sistemas permite procedimentos operacionais como a reconfiguração para redução de perdas, a restauração dos consumidores em situações de contingências, e tarefas de manutenção programadas e não programadas nos circuitos e equipamentos .

Este capítulo trata sobre os sistemas de distribuição, na seção 2.1 detalha-se como as redes de distribuição são representadas. Na seção 2.2. apresenta-se o fluxo de potência em sistemas radiais e sua utilização em cenários de alto carregamento. Na seção 2.3 detalham-se os equipamentos de controle de tensão e a GD. Na seção 2.4 são apresentados os modelos de carga e de capacitor dependentes da tensão. Na seção 2.5 são analisadas as cargas termicamente controladas e a condição CLPU. Na seção 2.6 a condição *reverse power tap changer runaway* é analisada para redes com geração distribuída e reguladores de tensão. Finalmente, na seção 2.7 são apresentados os índices de continuidade em sistemas de distribuição.

2.1 REPRESENTAÇÃO DOS SISTEMAS RADIAIS DE DISTRIBUIÇÃO

2.1.1 A teoria de grafos e os sistemas de distribuição

Sistemas e processos do mundo real podem ser convenientemente descritos por meio de diagramas compostos por um conjunto de pares de pontos com linhas que os unem (BONDY; MURTY, 2008). Desta forma um grafo G é um par ordenado $(V(G), E(G))$ que consiste em um conjunto $V(G)$ de nós e um conjunto $E(G)$ de arestas. Um caminho do grafo G é definido como a sequência de vértices $v_1, \dots, v_i, \dots, v_n$ tal que cada par (v_i, v_{i+1}) , para $1 \leq i \leq n - 1$, é um elemento de E . Por definição, um caminho que não passa duas vezes pelo mesmo vértice é denominado caminho simples. Adicionalmente, se um caminho simples possui os vértices inicial v_1 e o final v_n iguais, este é denominado um ciclo e seu grafo de origem é denominado cíclico. Contrariamente, se um grafo G não possui ciclos é denominado acíclico (MATHIAS-NETO, 2016).

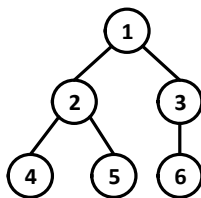
Os sistemas de distribuição são normalmente operados de forma radial por critérios de coordenação de proteção e redução de corrente de curto-circuito. A topologia radial das redes pode ser representada em analogia com grafos acíclicos, em que toda barra, ou nó de carga, é

representada por um nó, e todo trecho ou ramo que une dois nós de carga, é representado por uma aresta. Uma forma eficiente de ordenação de grafos acíclicos em matrizes é através da representação nó profundidade (DELBEM *et al.*, 2004), detalhada na seção 2.1.2.

2.1.2 A representação nó profundidade

Na RNP (DELBEM *et al.*, 2004) organiza-se através de matrizes, grafos acíclicos chamados de árvores. Uma árvore pode ser representada pelos seus nós e a profundidade destes em relação a um nó raiz. Na RNP utiliza-se o número de nós N para definir uma matriz de dimensão $2 \times N$, na qual se organiza em uma linha os nós e na outra linha a profundidade destes nós com relação ao nó raiz. Os dados da matriz são formados pelo par ordenado (n_x, p_x) produzido a partir do nó raiz e continua na sequência de cada nó ao ser visitado através de uma busca em profundidade (*depth-first search*). Na Figura 1, apresenta-se um exemplo da RNP para uma árvore A.

Figura 1 – Representação nó profundidade para uma árvore A.



$$A: \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 & 2 & 1 & 2 \\ 1 & 2 & 4 & 5 & 3 & 6 \end{bmatrix} \begin{array}{l} \leftarrow \textit{profundidade} \\ \leftarrow \textit{nó} \end{array}$$

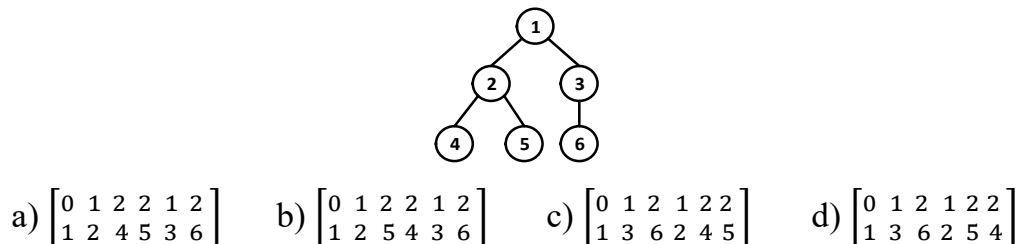
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Na Figura 1, a árvore A formada pelos nós 1, 2, 3, 4, 5, e 6, é representada segundo a RNP de acordo com os nós que a compõem e as suas respectivas profundidades. A representação começa no nó raiz 1 para a qual a profundidade zero (0) é atribuída, formando o par ordenado (1, 0). A continuação o nó 2 é visitado e devido a seu distanciamento com o nó raiz, uma profundidade 1 lhe é atribuída para formar o par ordenado (2, 1). Da mesma forma, os seguintes nós visitados 4 e 5, recebem igual valor de profundidade formando os pares ordenados (4, 2) e (5, 2). Continuando com a busca em profundidade, o nó 3 é visitado formando o par ordenado (3, 1) e, finalmente, o nó 6 é visitado para gerar o par (6, 2).

A forma de representar uma árvore através da RNP não é única e pode ter formas equivalentes de ordenação desde que atinja os critérios de posição e profundidade. Na Figura

2, apresentam-se todas as formas alternativas equivalentes para representar a árvore A por meio da RNP.

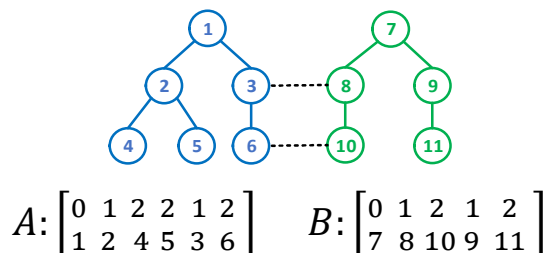
Figura 2 – Variações da representação nó profundidade para uma árvore A .



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Na Figura 3 apresenta-se a floresta F formada pelas árvores A (azul) e B (verde) em que as linhas tracejadas entre os pares de nós 3 – 8 e 6 – 10, constituem arestas abertas (chaves normalmente abertas) para possíveis mudanças da topologia da floresta F .

Figura 3 – Floresta F formada pelas árvores A e B .



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O trabalho original da RNP apresenta dois operadores para o processo de reconfiguração de uma floresta, e em (MATHIAS NETO, 2016), adiciona-se um novo operador para o processo de poda de árvores. Estes operadores são detalhados na seção 2.1.3.

2.1.3 Operadores da representação nó profundidade

Os operadores *preserve ancestor operator* (PAO) e o *change ancestor operator* (CAO) propostos em (DELBEM *et al.*, 2004) junto com o operador CUT proposto em (MATHIAS NETO; MANTOVANI, 2016), são os três operadores que utilizam as tabelas da RNP para realizar alterações em determinada floresta com a finalidade de modificar uma topologia. A principal vantagem destes operadores está em gerar apenas configurações radiais, considerando que a sua aplicação está sujeita à presença de pontos de corte e conexão.

A seguir apresentam-se os três operadores utilizados neste trabalho, ressaltando que uma modificação foi realizada no operador CUT com relação ao trabalho original. Maiores detalhes dos operadores podem ser encontrados em (DELBEM *et al.*, 2004) e (MATHIAS NETO; MANTOVANI, 2016).

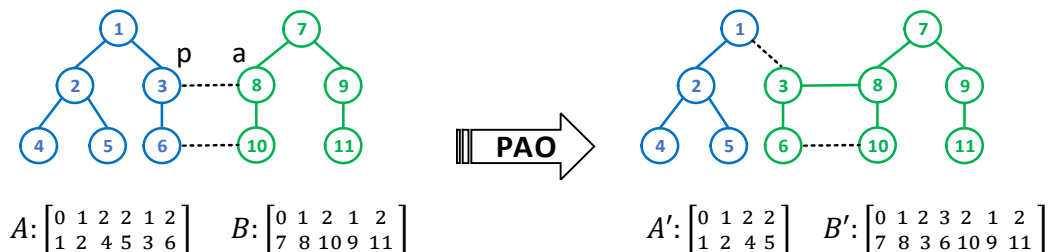
2.1.3.1 PAO

O PAO utiliza dois nós, um nó de poda p e um nó adjacente a , para ser aplicado em uma floresta sob análise. A aplicação do PAO pode ser resumida da seguinte forma, “podar a árvore em p e a conectar em a ” (ver exemplo na Figura 4).

O PAO caracteriza-se por fazer mudanças pouco complexas vinculadas ao processo de intensificação. Na Figura 4 é apresentado um exemplo da execução do operador PAO em uma floresta composta por duas árvores. O processo de aplicação do operador PAO sobre uma floresta é apresentado a seguir.

1. Seja i_x a coluna e p_x a profundidade de um nó x na matriz RNP de uma árvore.
2. Um nó de poda p e um nó adjacente a são escolhidos de duas árvores diferentes A e B , respectivamente. Identificar as colunas i_p e i_a , e as profundidades p_p e p_a dos 2 nós selecionados.
3. Determinar o conjunto das colunas (i_p, i_z) da árvore A , em que este conjunto corresponde a uma sub árvore com nó raiz em p e percorrer a partir da coluna i_p ao longo da matriz RNP em direção à última coluna da matriz, identificando elementos com profundidade necessariamente maiores do que p_p . A busca é interrompida caso algum elemento da matriz com profundidade menor ou igual a p_p seja encontrada, ou o fim da tabela seja atingido.
4. Copiar o conteúdo entre, e inclusive, as colunas (i_p, i_z) da árvore A para uma árvore temporária T . As profundidades dos nós da árvore temporária T devem ser atualizadas conforme a seguinte equação: $p[j] = p[k] - p_p + p_a + 1$, em que $p[k]$ representa a profundidade do nó presente na coluna k da árvore A . A coluna k varia de i_p a i_z . O símbolo $p[j]$ representa a profundidade do elemento presente na coluna j da árvore T . A coluna j na tabela T satisfaz a equação $j = k + 1 - i_p$.
5. Construir uma nova árvore B' a partir da união das árvores B e T . A árvore T deve ser inserida na coluna $i_a + 1$.
6. Construir uma nova árvore A' , utilizando a árvore A excluindo os nós presentes em T .

Figura 4 – Exemplo da aplicação do operador PAO.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Na Figura 4, a árvore A e a nova árvore A' com raiz em 1 estão na cor azul, enquanto que a árvore B e a nova árvore B' com raiz em 7 estão na cor verde. As árvores A' e B' foram obtidas utilizando o operador PAO aplicado nas árvores A e B , utilizando um nó de poda $p = 3$, e um nó adjacente $a = 8$.

O operador PAO pode ser aplicado em uma mesma árvore, desde que o nó adjacente a não pertença à sub árvore com raiz no nó p .

2.1.3.2 CAO

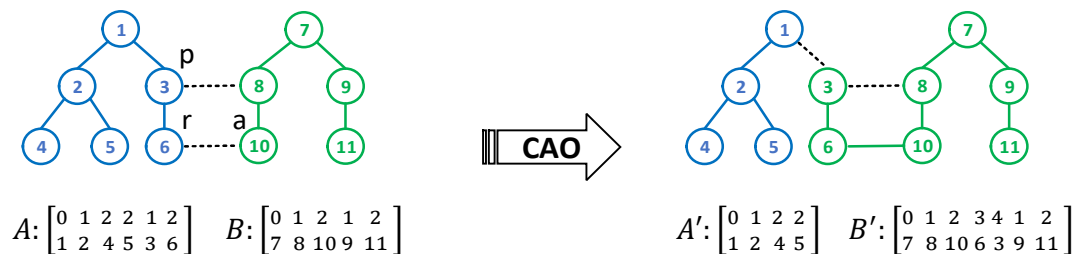
O CAO utiliza três nós, um nó de poda p , um nó adjacente a e um nó raiz r , para sua aplicação sobre uma floresta sob análise. A aplicação do CAO pode ser resumida da seguinte forma, “podar a árvore em p e conectar r em a ” (ver exemplo na Figura 5).

O CAO caracteriza-se por fazer mudanças complexas vinculadas ao processo de diversificação. Na Figura 5 é apresentado um exemplo da execução do operador CAO em uma floresta composta por duas árvores. O processo de aplicação do operador CAO em uma floresta é apresentado a seguir:

1. Seja i_x a coluna, e p_x a profundidade de um nó x na matriz RNP de uma árvore.
2. Três nós são selecionados para o operador CAO ser realizado, um nó de poda p e um nó raiz r (pertencente à sub árvore com raiz no nó p) são escolhidos em uma árvore A , e um nó adjacente a é escolhido em uma árvore B . Identificar as colunas i_p , i_r e i_a e as profundidades p_p , p_r e p_a dos nós selecionados.

3. Determinar o conjunto das colunas (i_p, i_z) da árvore A , em que este conjunto corresponde a uma sub árvore com nó raiz em p e percorre a partir de i_p os elementos da matriz RNP em direção à última coluna da matriz, identificando elementos com profundidade necessariamente maiores a p_p . A busca é interrompida caso algum elemento da matriz com profundidade menor ou igual a p_p seja encontrada, ou o fim da tabela seja atingido.
4. Copiar o conteúdo entre, e inclusive, as colunas (i_p, i_z) da árvore A para uma árvore temporária T . Identificar os elementos que conectam r e p para formar o caminho $r_0, r_1, r_2, \dots, r_i, \dots, r_n$ em que r_0 e r_n são r e p respectivamente.
5. Em uma matriz temporária $T1$ o algoritmo deve copiar individualmente cada sub árvore enraizada em cada elemento de $r_0, r_1, r_2, \dots, r_i, \dots, r_n$, sem a sub árvore enraizada em r_{i-1} , atualizando as profundidades dos respectivos nós.
6. Construir uma nova árvore B' a partir da união das árvores B e $T1$. A árvore $T1$ deve ser inserida na coluna $i_a + 1$.
7. Construir uma nova árvore A' , a partir da árvore A excluindo os nós existentes em $T1$.

Figura 5 – Exemplo da aplicação do operador CAO.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Na Figura 5, a árvore A e a nova árvore A' com raiz em 1 estão na cor azul, enquanto que a árvore B e a nova árvore B' com raiz em 7 estão na cor verde. As árvores A' e B' foram obtidas utilizando o operador CAO sobre as árvores A e B , utilizando um nó de poda $p = 3$, nó raiz $r = 6$, e um nó adjacente $a = 10$. O operador CAO pode ser aplicado em uma mesma árvore, desde que o nó adjacente a não pertença à sub árvore com raiz no nó p .

2.1.3.3 CUT

O operador CUT é um operador que faz uso das tabelas da RNP e um nó de poda p para gerar uma sub árvore sobre uma floresta (ver exemplo na Figura 6). O operador CUT caracteriza-se por fazer mudanças vinculadas ao processo de diversificação.

A diferença da proposta original do CUT (MATHIAS NETO; MANTOVANI, 2016) e proposta neste trabalho, é que uma variação é efetuada na sub árvore que é objeto de corte. Quando o operador CUT for utilizado, é realizado um reordenamento na sub árvore podada selecionando um novo nó raiz. Este novo nó raiz deve ser o nó com maior profundidade em relação ao ponto de corte e não deve ser o nó extremo de alguma chave normalmente aberta. No caso que dois ou mais nós atendam estas características, uma escolha aleatória entre eles é realizada. No caso que todos os nós da sub árvore podada sejam extremos de chaves normalmente abertas, seleciona-se o nó com maior profundidade.

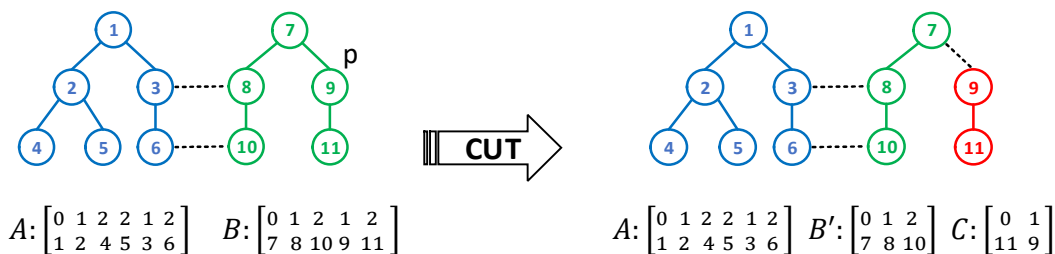
Na Figura 6 é apresentado um exemplo da execução do operador CUT em uma floresta composta por duas árvores. O processo de aplicação do operador CUT em uma floresta é apresentado a seguir.

1. Seja i_x a coluna e p_x a profundidade de um nó x na matriz RNP de uma árvore.
2. Selecionar um nó de poda p em uma árvore B . Identificar a coluna i_p e a profundidade p_p do nó selecionado.
3. Determinar os índices (i_p, i_z) da árvore B , sendo que este conjunto corresponde a uma sub árvore com nó raiz em p e percorre a partir de i_p os elementos da matriz RNP em direção à última coluna da matriz, identificando elementos com profundidade necessariamente maiores a p_p . A busca é interrompida caso algum elemento da matriz com profundidade menor ou igual a p_p seja encontrada, ou o fim da tabela seja atingido.
4. Copiar o conteúdo entre, e inclusive, as colunas (i_p, i_z) da árvore A para uma árvore temporária C . Identificar um novo nó raiz r , em que r deve ser o nó com mais profundidade com relação a p e não deve ser extremo de chave normalmente aberta. No caso de dois ou mais nós atenderem estas condições uma escolha aleatória entre eles é realizada. No caso em que todos os nós da sub árvore podada serem extremos de chave normalmente aberta, seleciona-se o nó com maior profundidade.
5. Atualizar as posições e profundidades da sub árvore objeto de corte considerando o nó r como novo nó raiz com profundidade zero.

6. Incluir a nova árvore C como uma nova árvore na floresta.
7. Construir uma nova árvore B' , a partir da árvore B excluindo os nós existentes em C .

Na Figura 6 a árvore A com nó inicial em 1 está na cor azul, a árvore B e a nova árvore B' com nó inicial em 6 estão na cor verde. A nova árvore C obtida com o operador CUT está representada na cor vermelha. No processo de obtenção da árvore C o corte foi realizado no nó de poda $p = 9$, porém escolhe-se o nó 11 como nova raiz da árvore podada por ser o nó mais afastado do ponto de corte sem ser extremo de chave normalmente aberta.

Figura 6 – Exemplo da aplicação do operador CUT.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O reordenamento da sub árvore podada, embora tenha uma disposição por profundidade diferente da árvore original, ela é necessária para diversificar a busca e facilitar o possível retorno à floresta original de regiões que foram objeto de corte.

2.2 FLUXO DE POTÊNCIA

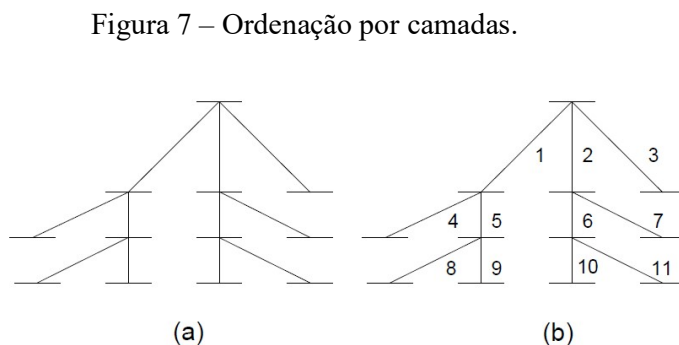
2.2.1 Fluxo de potência em sistemas de distribuição: o fluxo por varredura

O fluxo por varredura proposto em (SHIRMOHAMMADI *et al.*, 1988), é um algoritmo de fluxo de potência iterativo, amplamente utilizado na solução de problemas de redes de distribuição, radiais ou fracamente malhadas, pelas suas características de eficiência computacional e robustez. O fluxo por varredura caracteriza-se por 4 etapas para sua execução, a) a ordenação da rede em camadas, b) o processo *backward*, c) o processo *forward* e, d) a avaliação do critério de parada. Na seção e) apresenta-se uma análise final do problema de cálculo de fluxo de potência com foco no problema de restauração. As descrições dos passos das etapas do fluxo por varredura são detalhadas a seguir.

a) Ordenação em camadas

Como proposto no trabalho original, o fluxo de potência por varredura é um algoritmo orientado em ramos. Desta forma, para sua implementação foi proposto um esquema eficiente de numeração dos ramos para melhorar o desempenho numérico do método.

Neste procedimento de ordenamento os ramos do sistema são classificados por camadas segundo a sua distância com relação ao nó raiz. Um exemplo desta numeração pode ser visto na Figura 7 em que a numeração de ramos de uma camada, em um sistema de distribuição (Figura 7 (a)), só começa após todos os ramos da camada anterior serem numerados (Figura 7 (b)). A ordenação é realizada apenas uma vez durante o algoritmo. Após o ordenamento em camadas, uma tensão inicial igual à tensão do nó raiz (usualmente 1,0 p.u.) é atribuída a cada nó da árvore e o processo iterativo, composto pelas etapas *backward* e *forward* é inicializado.



Fonte: Adaptado de (PEREIRA, 2016).

b) O processo *backward*

O processo *backward* consiste em percorrer o sistema através dos ramos desde as últimas camadas até a primeira. Este procedimento inicia-se com o cálculo das correntes nodais e em seguida as correntes nos ramos são obtidas iniciando-se nas camadas finais em direção ao nó raiz.

O cálculo de corrente nodal no nó i na iteração k é $I_i^{(k)} = \left(S_i / V_i^{(k-1)} \right)^* - Y_i \cdot V_i^{(k-1)}$, em que S_i e Y_i são a injeção de potência e a soma de todos os elementos *shunt* existentes no nó i , respectivamente. O cálculo de corrente J_L no ramo L entre os nós $i - j$ para um sistema de n ramos conectados à jusante da barra j é dado por $J_L^{(k)} = -I_j^{(k)} + \sum_{a=1}^n J_{j-a}^{(k)}$

c) O processo *forward*

No processo *forward*, que se caracteriza por percorrer o sistema a partir dos trechos da primeira camada até a última, recalculam-se as tensões nodais da rede. O procedimento inicia-se no nó raiz, calculando o valor da tensão nos nós finais dos trechos pertencentes à primeira camada, para em seguida calcular o valor da tensão nos nós finais dos trechos da segunda camada e assim por diante. Para dois nós, i e j , em que i se encontra mais próximo ao nó raiz, a relação de tensão entre estes dois nós é dada por, $V_j^{(k)} = V_i^{(k)} - Z_L \cdot J_L^{(k)}$

d) A avaliação do critério de parada

Neste trabalho, dois critérios de parada são adotados. O primeiro, é um teste de convergência do algoritmo, em que a diferença da potência aparente fornecida pelo alimentador em duas iterações consecutivas seja menor a um valor real positivo próximo a zero (ε), ou a diferença entre a potência especificada S_i e a potência calculada para o nó i , $S_i^{(k)} = V_i^{(k)} \cdot (I_i^{(k)})^* - Y_i |V_i^{(k)}|^2$, em que os erros de potência ativa $\Delta P_i^{(k)} = Re[\Delta S_i^{(k)} - S_i]$ e reativa $\Delta Q_i^{(k)} = Im[\Delta S_i^{(k)} - S_i]$ para cada nó devem ser menores a ε . O segundo critério de parada é o número máximo de iterações *ITER_MAXIMO*.

e) Análise do fluxo de potência por varredura para o problema de restauração

O fluxo de potência pelo método por varredura embora seja robusto e eficiente, exige um elevado tempo computacional quando utilizado para avaliar grandes quantidades de configurações com milhares de nós de carga. O algoritmo por varredura utiliza recursos computacionais de ordenação por camadas cada vez que uma nova configuração é avaliada, tornando o algoritmo mais lento. Para contornar este problema na seção 2.2.2, a integração do método por varredura com a RNP é apresentada. Outro cenário a ser analisado é a execução do algoritmo de fluxo de potência em redes de distribuição altamente carregadas. Nestes cenários de grande carregamento, iterações desnecessárias podem estar sendo realizadas para avaliar configurações de pouco interesse. Para evitar consumir recursos computacionais (e consequentemente tempo de processamento) neste tipo de configurações, na seção 2.2.3 apresenta-se um processo de avaliação para contornar este problema, estabelecendo um número máximo de iterações, de forma dinâmica para o algoritmo de fluxo de potência.

2.2.2 Fluxo por varredura e a RNP

O fluxo de potência por varredura como descrito anteriormente, requer uma etapa de pré-processamento em que o sistema é ordenado em camadas e, uma vez finalizada esta etapa, utilizam-se iterativamente os processos *backward* e *forward* até que um critério de parada seja satisfeito.

A combinação do método de fluxo de potência por varredura com a RNP, faz com que a etapa de pré-processamento não seja mais necessária e constitui a principal vantagem quando distintas configurações geradas são avaliadas através dos operadores PAO, CAO e CUT. Esta propriedade é consequência da ordenação por profundidade, que tem as mesmas características que o ordenamento por camadas, porém, se apenas um cálculo de fluxo potência é realizado, a inclusão da RNP não faz nenhuma diferença (SANTOS *et al.*, 2008). Contudo, o foco deste trabalho está em resolver o problema de restauração de redes de distribuição, em que milhares de configurações serão avaliadas, o que tornam necessários mecanismos eficientes de avaliação para reduzir o tempo de processamento.

2.2.3 Análise do fluxo de potência em sistemas altamente estressados para o problema de restauração

Nesta seção é apresentada uma análise do algoritmo de fluxo de potência por varredura empregado em sistemas de distribuição radiais em estado de operação normal e em estado restaurativo, considerando cargas termicamente controladas. A modelagem e a análise do comportamento das cargas termicamente controladas encontram-se na seção 2.3.5.

Para esta análise têm sido utilizados os dados de um sistema real de uma cidade do litoral brasileiro de 7052 nós. Este sistema possui 9 alimentadores distribuídos entre dois transformadores, em que 5 alimentadores estão conectados ao primeiro transformador (TR-1) e os 4 alimentadores restantes estão conectados ao transformador número 2 (TR-2). No capítulo 6, o sistema em análise é apresentado com maior detalhe.

Para fins didáticos, a análise nesta seção tem enfoque na tensão, embora possa ser realizada para outras variáveis de operação como a corrente e a potência. Um fluxo de potência é calculado utilizando o método por varredura em que, os critérios de parada do algoritmo foram definidos na condição do que for atingida primeiro: (a) número máximo de iterações $ITER_MAXIMO = 10$; ou, (b) diferença da potência aparente fornecida pelo alimentador em duas iterações consecutivas menor a $\varepsilon = 0,000001$. Dois cenários são apresentados para análise, no primeiro cenário o sistema encontra-se em estado normal, no

segundo cenário uma falta permanente no TR-2 é considerada e a solução inicial gerada é analisada.

Na Tabela 1 apresentam-se, com quatro casas decimais, a tensão mínima e máxima em p.u. para cada alimentador através das iterações do algoritmo de fluxo de potência para o primeiro cenário. Na Tabela 2, resultados com as mesmas características são apresentados para o segundo cenário.

Tabela 1 – Magnitudes de tensões para o sistema de 7052 nós através das iterações de um fluxo de potência por varredura em estado normal (T – transformador, A – alimentador, V – tensão, M – tensão máxima, m – tensão mínima).

T	A	V	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	M	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	-	-	-	-	-	-
		m	0.9731	0.9720	0.9720	0.9720	-	-	-	-	-	-
	2	M	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	-	-	-	-	-	-
		m	0.9777	0.9770	0.9770	0.9770	-	-	-	-	-	-
	3	M	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	-	-	-	-	-
		m	0.9744	0.9734	0.9734	0.9734	0.9734	-	-	-	-	-
	4	M	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	-	-	-	-	-
		m	0.9710	0.9699	0.9698	0.9698	0.9698	-	-	-	-	-
	5	M	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	-	-	-	-	-	-
		m	0.9801	0.9796	0.9796	0.9796	-	-	-	-	-	-
2	6	M	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	-	-	-	-
		m	0.9430	0.9366	0.9362	0.9362	0.9362	0.9362	-	-	-	-
	7	M	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	-	-	-	-	-
		m	0.9408	0.9360	0.9357	0.9357	0.9357	-	-	-	-	-
	8	M	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	-	-	-	-
		m	0.9443	0.9390	0.9387	0.9387	0.9387	0.9387	-	-	-	-
	9	M	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	-	-	-	-	-
		m	0.9603	0.9578	0.9577	0.9577	0.9577	-	-	-	-	-

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Na Tabela 1, a magnitude de tensão mínima na maioria dos alimentadores varia pouco a partir da segunda ou terceira iteração, podendo-se concluir que para cenários em que o sistema se encontra em estado normal ou com carregamento leve, com poucas iterações encontra-se uma excelente solução aproximada no processo de fluxo de potência. Porém, os resultados obtidos para o segundo cenário variam consideravelmente. Os alimentadores 3 e 5 recebem a carga desligada do transformador TR-2, sobrecarregando e estressando estes alimentadores. No alimentador 3, a magnitude tensão mínima varia entre 0,7976 na primeira iteração e 0,6553 na décima iteração, iteração na qual o algoritmo finaliza ao atingir o número máximo de iterações preestabelecido. No alimentador 5 a situação é mais crítica, obtendo

valores de magnitudes tensão mínimas que flutuam entre 0,6760 p.u. e 0,0536 p.u. durante o processo iterativo do algoritmo, e ainda, valores de magnitudes de tensão máximas que teoricamente não deveriam superar o valor de 1 p.u. por se tratar de um sistema de distribuição passivo (ausência de fontes auxiliares de geração ou compensação), variam entre 1 p.u. e 2,6312 p.u., permitindo concluir que o algoritmo falha numericamente em encontrar uma resposta para sistemas altamente estressados.

Tabela 2 – Magnitudes de tensões para o sistema de 7052 nós através das iterações de um fluxo de potência por varredura com falha em TR-2 (T – transformador, A – alimentador, V – tensão, M – tensão máxima, m – tensão mínima).

T	A	V	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	M	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	-	-	-	-	-	-
		m	0.9731	0.9720	0.9720	0.9720	-	-	-	-	-	-
	2	M	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	-	-	-	-	-	-
		m	0.9777	0.9770	0.9770	0.9770	-	-	-	-	-	-
	3	M	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
		m	0.7976	0.7149	0.6872	0.6707	0.6639	0.6594	0.6575	0.6562	0.6557	0.6553
	4	M	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	-	-	-	-	-
		m	0.9710	0.9699	0.9698	0.9698	0.9698	-	-	-	-	-
	5	M	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	2.6312	1.2043	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
		m	0.6760	0.4931	0.2882	0.0536	0.6520	0.6520	0.6497	0.5122	0.3387	0.0596
2	6	M	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	7	M	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	8	M	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	M	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Configurações com variáveis de operação violadas, embora possam ser desconsideradas, existem algoritmos de solução que baseiam sua eficácia no uso de memória para explorar o espaço de busca de um problema e, conseqüentemente, encontrar soluções de boa qualidade. Neste trabalho utiliza-se um desses algoritmos para resolver o problema de restauração, a meta-heurística Busca Tabu (com mais detalhe no capítulo 4).

A Busca Tabu utiliza os atributos de configurações recentemente visitadas para orientar a exploração do espaço de busca de um problema em análise, e ainda configurações candidatas que violem limites operacionais podem fornecer informação relevante para explorar novas áreas atrativas da região factível do problema em estágios posteriores do

algoritmo. No entanto, configurações em que a violação de limites operacionais seja muito elevada, dificilmente fornecem informação valiosa ao processo de busca.

A proposta neste trabalho para contornar o problema acima descrito no fluxo de potência por varredura para sistemas radiais altamente estressados é, portanto, estabelecer um número máximo de iterações de forma dinâmica para o algoritmo. Desta forma, o valor inicial de iterações máximo predefinido $ITER_MAXIMO$ é atualizado para um número N em que, na iteração ' N ' do algoritmo de fluxo por varredura, a magnitude de tensão mínima calculada atinge valores inferiores a uma grandeza preestabelecida $G = 0,85$ p.u., conseqüentemente, se a magnitude de tensão mínima de um alimentador durante as iterações não é inferior a G , o número de iterações máximo $ITER_MAXIMO$ não é atualizado. Desta forma no cenário da Tabela 2, para o alimentador 3 e alimentador 5 seriam realizadas apenas duas iterações, e as tensões mínimas obtidas seriam utilizadas para penalizar a configuração candidata.

2.3 EQUIPAMENTOS NOS SISTEMAS RADIAIS DE DISTRIBUIÇÃO

Os sistemas de distribuição contêm diversos equipamentos e dispositivos para controle e operação da rede. Equipamentos como transformadores com *on load tap changer* (OLTC), RT, BC e, ultimamente, GD estão presentes nas redes de distribuição. Neste capítulo, equipamentos de controle de tensão são analisados na seção 2.3.1, e na seção 2.3.2 uma análise da geração distribuída com foco no problema de restauração na formação de microrredes é apresentada.

2.3.1 Equipamentos de controle de tensão

Nos sistemas de distribuição, os BCs, RTs e transformadores com OLTC são equipamentos utilizados para manter as magnitudes de tensão dentro dos limites preestabelecidos, melhorar a regulação de tensão na rede e produzirem como efeito secundário a redução das perdas técnicas no sistema. Normalmente os RTs e OLTCs fazem o controle local de tensão com relação a um nó de referência, enquanto que os capacitores podem ter controle de posição de *tap* temporizado por hora, ou também, associado a um nó específico.

2.3.1.1 Regulador de tensão e transformador com *on load tap changer*

Os RTs e os transformadores com OLTC são equipamentos instalados no sistema que têm como função modificar a tensão na sua saída em relação à tensão na sua entrada. Os RTs

têm a possibilidade de funcionar bidireccionalmente mudando o nó de controle de tensão segundo a direção de potência ativa, em cenários de alteração na topologia e/ou na existência de GD operando no sistema.

As equações (1) e (2) modelam o comportamento da tensão e corrente nos RTs e nos transformadores com OLCT, respectivamente:

$$V_{RT}^{out} = \frac{V_{RT}^{in}}{a_R} \quad (1)$$

$$I_{RT}^{out} = a_R \times I_{RT}^{in} \quad (2)$$

Onde:

$$a_R = 1 - tap \cdot \Delta tap \quad \forall tap \in \{tap_{min}, \dots, tap_{max}\} \quad (3)$$

Em que:

- V_{RT}^{out} : Tensão de saída do dispositivo;
- V_{RT}^{in} : Tensão de entrada do dispositivo;
- I_{RT}^{out} : Corrente de saída do dispositivo;
- I_{RT}^{in} : Corrente de entrada do dispositivo;
- Δtap : Tamanho de passo dos taps;
- tap_{min} : Tap mínimo do dispositivo;
- tap_{max} : Tap máximo do dispositivo.

2.3.1.2 Capacitores

Os capacitores alocados de forma técnica e economicamente otimizada na rede de distribuição melhoram o perfil das magnitudes de tensão, reduzem as perdas de energia, liberam capacidade de condutores e melhoram o fator de potência. Os capacitores têm, usualmente, um controle de posição de tap temporizado por hora, ou um controle de tensão local associado a um nó preestabelecido da rede.

Nos sistemas de distribuição é possível encontrar instalados capacitores fixos ou bancos de capacitores chaveados. Os capacitores fixos podem ser considerados como fontes de potência reativa constante, enquanto que bancos de capacitores chaveados possuem vários módulos com capacidades individuais (ΔC_i). Considerando que os capacitores chaveados contam com um número máximo de módulos ($n_{sw_{max,i}}$), a potência reativa fornecida pelo capacitor instalado no nó i pode ser dada por (4).

$$C_i^{sw} = nsw_i \cdot \Delta C_i \quad (4)$$

Onde:

$$nsw_i \in \{0, 1, 2, \dots, nsw_{max,i}\}$$

2.3.2 Geração distribuída

A instalação de GD nas redes de média tensão é uma realidade devido à redução dos custos dos dispositivos de eletrônica de potência e dos sistemas de controle e automação no mercado, e do aumento dos incentivos governamentais ao uso de fontes de energias renováveis como a fotovoltaica e eólica. Através de uma operação adequada dos GDs em cenários de operação normal, a qualidade do fornecimento pode ser melhorada com uma regulação dinâmica do perfil de tensão, e benefícios econômicos decorrente da redução de perdas no sistema podem ser obtidos. Em cenários de faltas permanentes, os GDs podem aumentar a confiabilidade do sistema, operando de forma ilhada junto com cargas locais. Os GDs podem ser classificadas segundo 5 critérios de funcionamento (SONG *et al.*, 2013):

A. Função de comunicação e controle

Uma rede de comunicação de duas vias com a GD é uma função essencial necessária para o monitoramento dos estados e operação cooperativa em um sistema de distribuição. A possibilidade de controle de um GD é um importante critério para ser considerado no gerenciamento e controle de uma rede. Os GDs podem ser classificados por sua capacidade de comunicação e os contratos de controle e gerenciamento entre a concessionária e os proprietários das unidades de geração em:

- i. GD com comunicação/controle: GD utilizando uma rede de comunicação de duas vias com contratos de controle e gerenciamento com a concessionária.
- ii. GD sem comunicação/controle: GD que não está disponível para contratos de gerenciamento e controle com a concessionária.

B. Função de *black start* para operação ilhada intencional

A capacidade de arranque autônomo dos GDs e a capacidade de formar ilhas junto com um grupo de cargas de forma intencional é um importante critério para a restauração do fornecimento de energia. Os GDs são classificados em duas categorias segundo a capacidade de *black start*.

i. GD com *black start*: este tipo de GD tem funções de controle de carga-frequência e permite operação ilhada intencional. Esta função é classificada pela disponibilidade da fonte de energia primária.

ii. GD sem *black start*: geração eólica, geração fotovoltaica, tipos de máquinas auto excitadas, etc, são tipos de equipamentos que não permitem a operação ilhada intencional devido às incertezas vinculadas à disponibilidade da sua fonte de geração, por exemplo, vento ou radiação solar. Porém, usinas eólicas, fotovoltaicas e outro tipo de máquinas auto excitadas com armazenamento de energia podem ser classificadas como GD com *black start*.

C. Função de armazenamento de energia

Algumas unidades de GD têm sua própria capacidade de armazenamento de energia por motivos econômicos. Este tipo de unidades pode carregar e descarregar seus níveis de energia para nivelar, balancear e, também, regular a saída de potência ativa. Segundo este critério, os GDs podem ser classificados em:

i. GD com armazenamento de energia: GD que está equipado com dispositivos de armazenamento de energia.

ii. GD sem armazenamento de energia: GD que não está equipado com dispositivos de armazenamento de energia.

D. Função de controle de reativos (*Q control function*)

Os inversores modernos para conexão de GD na rede podem controlar a saída de potência reativa mantendo níveis de eficiência adequados, reduzindo as perdas e melhorando o perfil de tensão nas redes de distribuição. As unidades de GD podem ser classificadas em:

i. GD com controle de reativos: GD que é capaz de controlar a saída de potência reativa, controle PV.

ii. GD sem controle de reativos: GD que não é capaz de controlar a saída de potência reativa.

E. Função de disponibilidade de geração durante estado de emergência e estado de operação após eliminação de falta.

O estado de operação das GD após a eliminação da falta é uma informação valiosa para o processo de restauração, e é classificada da seguinte forma:

i. A GD mantém sua operação de conexão à rede após a eliminação da falta.

ii. A GD perde a conexão com a rede da concessionária durante a falta, e não pode ser reconectada quando a falha é eliminada.

A formação de microrredes, através da operação ilhada de GD com um grupo de cargas locais, é uma operação complementar para sistemas de distribuição em estado de emergência. A construção de microrredes aproveita a flexibilidade operacional da GD reduzindo a vulnerabilidade convencional causada pela geração centralizada e as longas distâncias entre as fontes principais de potência e as cargas. Métodos existentes para o uso de microrredes com o objetivo de aprimorar o processo de restauração podem ser divididos em dois, de acordo as condições das microrredes: microrredes com fronteira definida, e, microrredes com formação dinâmica.

A microrredes com fronteira definida são microrredes já instaladas cujas fronteiras são fixas. Neste caso, uma microrrede pode atuar de modo isolado para alimentar suas próprias cargas críticas, utilizando geração local e unidades de armazenamento mesmo quando a rede da concessionária esteja indisponível. Este modo de operação requer especial controle para frequência e tensão, uma vez que nenhum tipo de suporte de potência ativa e reativa vem da rede da concessionária. Nestes casos, os inversores de eletrônica de potência atuam como fontes de potência reativa para controlar a tensão. Em adição às cargas críticas dentro da sua fronteira, uma microrrede pode também ser utilizada para restaurar cargas críticas fora da sua fronteira utilizando o excedente de potência disponível. Neste caso, a microrrede atua como um alimentador virtual para reenergizar cargas críticas, sendo especialmente útil para áreas onde não existe outro caminho de restauração adequado ou que alguma outra fonte de alimentação esteja disponível. Para restabelecer cargas externas, caminhos factíveis devem ser formados para conectar as microrredes com as cargas, em que chaves telecomandadas podem ajudar a executar este processo.

As microrredes com formação dinâmica, ao contrário das microrredes com fronteira definida, não necessitam de microrredes existentes uma vez que elas podem ser formadas dinamicamente controlando as chaves automáticas dos alimentadores. Este tipo de esquema de operação pode fornecer uma maior flexibilidade comparada com métodos baseados em microrredes com fronteiras fixas, e estas microrredes podem ser adaptadas para diferentes contingências e cenários de desastres naturais. Porém, este esquema de operação e formação das microrredes apresenta desafios para controlar e coordenar chaves automáticas sem violar restrições operacionais.

2.4 MODELO DE CARGA DEPENDENTE DA TENSÃO

2.4.1 Carga dependente da tensão

O modelo polinomial da carga, ou também chamado modelo ZIP, é utilizado neste trabalho para representar a dependência das cargas com relação ao módulo da tensão. Neste tipo de representação, as cargas são constituídas por componentes de impedância constante (Z), corrente constante (I), e potência constante (P), em que a dependência com a magnitude de tensão muda com a participação das variáveis γ e ϕ , de cada componente como apresentado nas equações (5) e (6).

$$P_i = \left(\gamma_i^Z \frac{V_i^2}{V_0^2} + \gamma_i^I \frac{V_i}{V_0} + \gamma_i^P \right) P_i^0 \quad (5)$$

$$Q_i = \left(\phi_i^Z \frac{V_i^2}{V_0^2} + \phi_i^I \frac{V_i}{V_0} + \phi_i^P \right) Q_i^0 \quad (6)$$

Em que:

- γ_i^Z : Participação da carga de impedância constante na demanda de potência ativa no nó i ;
- γ_i^I : Participação da carga de corrente constante na demanda de potência ativa no nó i ;
- γ_i^P : Participação da carga de potência constante na demanda de potência ativa no nó i ;
- ϕ_i^Z : Participação da carga de impedância constante na demanda de potência reativa no nó i ;
- ϕ_i^I : Participação da carga de corrente constante na demanda de potência reativa no nó i ;
- ϕ_i^P : Participação da carga de potência constante na demanda de potência reativa no nó i ;
- V_i : Magnitude de tensão no nó i ;
- V_0 : Magnitude de tensão nominal;
- P_i : Demanda de potência ativa;
- P_i^0 : Demanda de potência ativa a magnitude de tensão nominal V_0 ;
- Q_i : Demanda de potência reativa;
- Q_i^0 : Demanda de potência reativa a magnitude de tensão nominal V_0 .

O valor de cada componente pode estar no intervalo [0,1] no “modelo ZIP restrito”, ou pode ser maior a 1 e/ou menor que 0 no “modelo ZIP preciso” (HAJAGOS; DANAI, 1998). Porém, a soma da participação $\gamma^Z + \gamma^I + \gamma^P$ e $\phi^Z + \phi^I + \phi^P$ para cada componente em cada

nó deve ser igual a 1 (HAJAGOS; DANAI, 1998). Para o modelo de carga constante, $\gamma^P = \phi^P = 1$ e $\gamma^Z = \gamma^I = \phi^Z = \phi^I = 0$, enquanto que para cargas dependentes da tensão, várias empresas distribuidoras consideram $\gamma^Z + \gamma^I = 0,5$; $\gamma^P = 0$; $\phi^Z = 1$; e $\phi^I + \phi^P = 0$ (HAJAGOS; DANAI, 1998).

2.4.2 Injeção de potência reativa pelos bancos de capacitores dependentes da tensão

Uma representação mais realista para a operação dos bancos de capacitores é apresentada na equação (7), em que a injeção de potência reativa pelos bancos de capacitores no nó é dependente do valor da tensão no nó de instalação.

$$Q_i^C = b^C V_i^2 \quad (7)$$

Em que:

- Q_i^C : Injeção de potência reativa pelo banco de capacitor C no nó i ;
- b^C : Susceptância do banco de capacitor C;
- V_i : Magnitude de tensão no nó i .

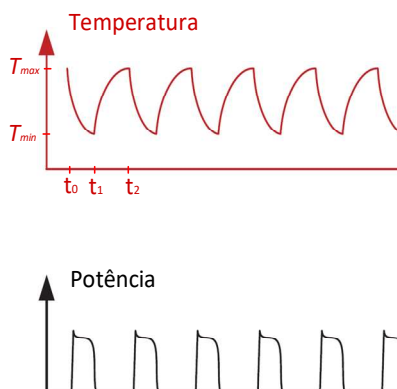
2.5 CARGAS TERMICAMENTE CONTROLADAS E A CONDIÇÃO CLPU

Cargas termicamente controladas de refrigeração ou de aquecimento, como aparelhos de ar condicionado, aquecedores de ambiente e de água, bombas térmicas, etc., representam a maior quantidade de demanda em uma rede de distribuição.

Na Figura 8, o comportamento de uma carga termicamente controlada de refrigeração em função do tempo é apresentado, sendo que uma carga de aquecimento tem comportamento similar.

No comportamento cíclico da Figura 8, o funcionamento do equipamento inicia no instante t_0 e permanece em operação até que uma temperatura T_{min} decorrente do fornecimento de potência ao sistema controlado é atingida. Uma vez atingida T_{min} , deixa-se de demandar energia do sistema (ou demanda muito pouca energia em estado de espera) e a temperatura aumenta naturalmente para T_{max} . No instante t_2 o controle volta a ser acionado, iniciando o seu ciclo termostático caracterizado pelos períodos com, e sem, a intervenção do sistema térmico na demanda do sistema elétrico.

Figura 8 – Comportamento de uma carga termicamente controlada



Fonte: Adaptado de (CHEN; WANG; TON, 2017).

No comportamento cíclico da Figura 8, o funcionamento do equipamento inicia no instante t_0 e permanece em operação até que uma temperatura T_{min} decorrente do fornecimento de potência ao sistema controlado é atingida. Uma vez atingida T_{min} , deixa-se de demandar energia do sistema (ou demanda muito pouca energia em estado de espera) e a temperatura aumenta naturalmente para T_{max} . No instante t_2 o controle volta a ser acionado, iniciando o seu ciclo termostático caracterizado pelos períodos com, e sem, a intervenção do sistema térmico na demanda do sistema elétrico.

Em operação normal o ciclo termostático é mantido alternando períodos de funcionamento e desligamento, porém este comportamento não é perceptível através da análise de curvas de carga de alimentadores uma vez que cargas não dependentes da temperatura também fazem parte do sistema elétrico e contribuem para a composição da curva de carga.

No entanto, após a interrupção do fornecimento de energia devido a uma falta permanente, as cargas termicamente controladas perdem diversidade resultando em cargas iniciais excessivas para a energização da rede durante a restauração, sendo esta condição definida como *cold load pick up* (Figura 9).

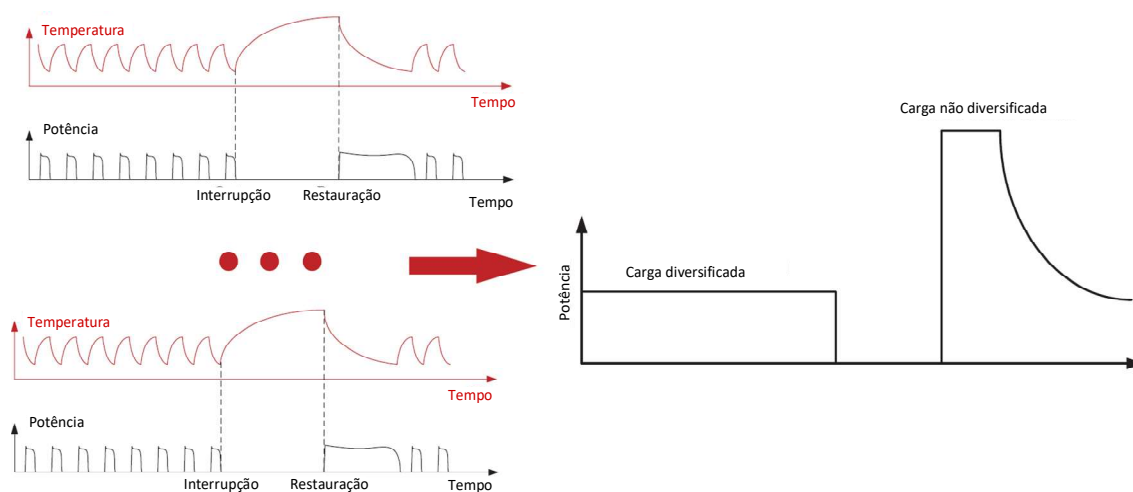
Pequenas interrupções, mesmo que de 10 minutos, podem incrementar a demanda significativamente em sistemas com grande penetração de cargas termicamente controladas. Para sistemas de distribuição com uma porcentagem de penetração de cargas termicamente controladas acima de 30% a condição CLPU deve ser considerada no procedimento de restauração da rede (SCHNEIDER *et al.*, 2016).

Para isto, na literatura têm sido utilizados diferentes modelos para estimar a resposta da restauração do sistema com alta penetração de CLPU. Curvas CLPU, modelos físicos e

modelos exponenciais retardados têm sido empregados para a análise em sistemas de distribuição com CLPU. Neste trabalho, utiliza-se um modelo de função exponencial retardada (Figura 10) para a modelagem do valor de pico e a duração da carga não-diversificada agregada.

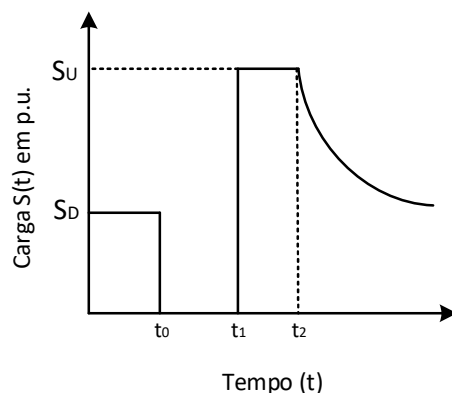
Na Figura 10, apresenta-se a curva para o modelo de função exponencial retardada, caracterizada pela perda de diversidade no período compreendido entre t_1 e t_2 e o decaimento exponencial por meio do coeficiente α que reflete a retomada de diversidade após t_2 . As equações que descrevem a curva na Figura 10 são dadas por (8) – (13).

Figura 9 – Curva de cargas termicamente controladas após uma falta permanente



Fonte: Adaptado de (CHEN; WANG; TON, 2017).

Figura 10 – Modelo de função exponencial retardada para sistemas em condição CLPU.



Fonte: Adaptado de (UCAK; PAHWA, 1994).

$$S(t) = [S_D + (S_U - S_D) \cdot e^{-\alpha(t-t_2)}] \cdot u(t - t_2) + S_U \cdot [1 - u(t - t_2)] \cdot u(t - t_1) \quad (8)$$

$$S_D = S_{DTC} + S_{DTNC} \quad (9)$$

$$S_{DTC} = \varphi \cdot S_D \quad (10)$$

$$S_{DTNC} = (1 - \varphi) \cdot S_D \quad (11)$$

$$S_U = k \cdot S_{DTC} + S_{DTNC} \quad (12)$$

$$k = \frac{\ln\left(\frac{t_{interrupção}}{A}\right)}{B} \quad (13)$$

Em que:

- t : Variável de tempo (h);
- $S(t)$: Valor de demanda no instante de tempo t (p.u.);
- S_D : Valor de demanda diversificada (p.u.);
- S_U : Valor de demanda não diversificada (p.u.);
- α : Coeficiente de decaimento exponencial (hr^{-1});
- $t_2 - t_1$: Início de decaimento exponencial após energização (hr);
- $u(t)$: Função passo unitário, tal que $u(t > 0) = 1$ e $u(t \leq 0) = 0$;
- S_{DTC} : Valor de demanda termicamente controlada;
- S_{DTNC} : Valor de demanda termicamente não controlado;
- φ : Porcentagem da demanda diversificada que é termicamente controlada. Dado de natureza estatística;
- k : Fator que depende do tempo de interrupção, e os valores empíricos A e B ;
- $t_{interrupção}$: Tempo de interrupção;
- A : Valor empírico. Usualmente assume o valor 0,107;
- B : Valor empírico. Usualmente assume o valor 1,101.

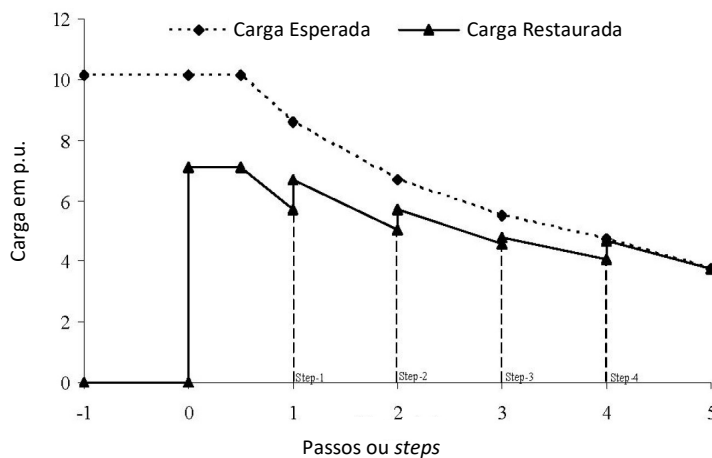
Desta forma, os valores de demanda para os diferentes intervalos de tempo são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3– Valores de demanda para intervalos de tempo na condição CLPU

Valor da demanda	Intervalo de tempo
0	$t < t_1$
0	$t = t_1$
S_U	$t_1 < t < t_2$
S_U	$t = t_2$
$S_D + (S_U - S_D) \cdot e^{-\alpha(t-t_2)}$	$t_2 < t$

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Para restaurar ou energizar a rede e contornar o problema de sobrecargas devido as CLPU, a restauração *step-by-step* tem sido o método mais empregado em sistemas de distribuição. Neste método dividem-se as redes em subáreas e restaura-se cada uma delas sequencialmente em determinados períodos de tempo chamados de etapas ou *steps*. Desta forma, a topologia final obtida após a implementação da sequência de chaveamentos para uma etapa de restauração, é considerada como a topologia inicial para a etapa seguinte. Na Figura 11 ilustra-se o processo da restauração tipo *step-by-step*.

Figura 11 – Processo da restauração *step-by-step*.

Fonte: Adaptado de (UCAK; PAHWA, 1994).

2.6 A CONDIÇÃO *REVERSE POWER TAP CHANGER RUNAWAY* EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

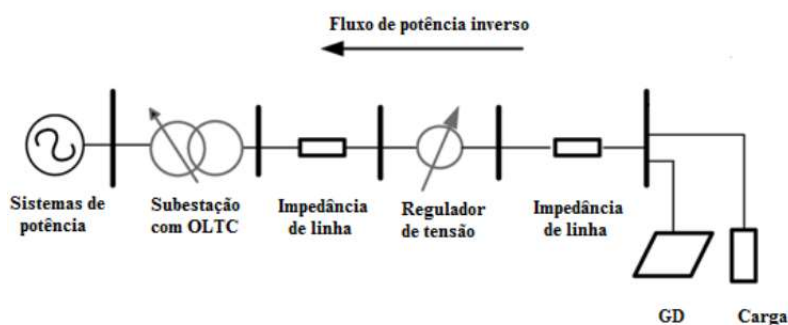
A condição *reverse power tap changer runaway* em alimentadores de distribuição com presença de RT e GD, é definida como a falha do RT em encontrar uma posição final do *tap* em situações de fluxo inverso pela injeção de potência da GD.

De forma convencional, os RTs operam de forma autônoma e não coordenada, baseada no controle de sinais locais. A presença de GD em redes de distribuição gera um incremento nas operações do RT desgastando estes equipamentos, resultando em altos custos de manutenção e reparo. Em cenários de uma considerável injeção de potência por parte dos GDs, o fluxo de potência pode se tornar inverso nos alimentadores de distribuição. Na Figura 12, apresenta-se a topologia de um sistema radial com transformador com OLTC, RT e um GD de tipo fotovoltaico.

Os RTs, normalmente, têm um modo de operação bidirecional (AGALGAONKAR; PAL; JABR, 2014) de importante utilidade em cenários de fluxo inverso e/ou quando mudanças na topologia são efetuadas. Neste modo bidirecional, o RT troca seu nó objetivo de controle de tensão segundo a direção de potência ativa através dele. Na Figura 13, apresenta-se um circuito equivalente do sistema da Figura 12.

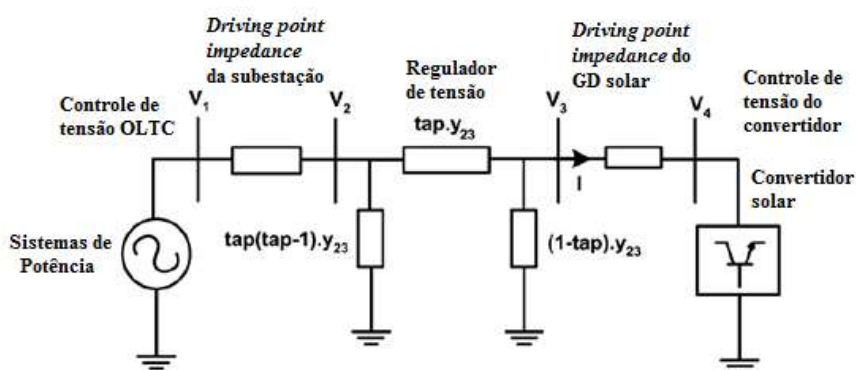
Em um cenário de fluxo de potência ativa direto, o RT regula V_3 ou V_4 e, durante o fluxo de potência ativa inverso, o RT regula V_2 . Uma operação de GD com fator de potência unitário pode gerar um fluxo de potência inverso no RT resultando em um controle da tensão V_2 , do lado da subestação. Porém se a subestação é a fonte mais forte, i.e., com baixo *driving point impedance*, o RT falha em regular a tensão requerida em V_2 atingindo a sua posição máxima ou mínima de *tap*, isto é conhecido como condição *reverse power tap changer runaway*. Conseqüentemente, com um valor alto de *driving point impedance* do lado da subestação, a condição *runaway* pode ser evitada (AGALGAONKAR; PAL; JABR, 2014). Para sobrepôr o problema da posição de *tap* final, trabalhos na área têm proposto substituir o controle autônomo local atual pelo controle centralizado supervisionado (ULUSKI, 2010). Nesse sentido, neste trabalho propõe-se utilizar o controle centralizado dos equipamentos de controle de tensão como parte da metodologia para resolver o problema de restauração de redes de distribuição.

Figura 12 – Topologia de um sistema radial com transformador com OLTC, RT e GD fotovoltaica



Fonte: Adaptado de (AGALGAONKAR; PAL; JABR, 2014).

Figura 13 – Circuito equivalente de um sistema radial com transformador com OLTC, RT e GD fotovoltaica



Fonte: Adaptado de (AGALGAONKAR; PAL; JABR, 2014).

2.7 ÍNDICES DE CONTINUIDADE DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

Para avaliar o desempenho de um sistema de distribuição, vários índices de continuidade têm sido desenvolvidos. Os índices de continuidade mais utilizados em sistemas de distribuição para interrupções são o DEC, FEC e ENS.

2.7.1 DEC

O DEC é a duração equivalente de interrupção por unidade consumidora e é calculado utilizando a equação (14):

$$DEC = \frac{\sum_{i=1}^k C_a(i) \times t(i)}{C_c} \quad (14)$$

Em que:

- $C_a(i)$: Número de unidades consumidoras, atendidas em baixa ou média tensão, interrompidas em um evento (i), no período de apuração;
 $t(i)$: Duração de cada evento (i), no período de apuração;
 i : Índice de eventos ocorridos no sistema que provocam interrupções em uma ou mais unidades consumidoras;
 k : Número máximo de eventos no período considerado;
 C_C : Número total de unidades consumidoras faturadas, do conjunto considerado no período de apuração, atendidas em baixa ou média tensão.

2.7.2 FEC

O FEC é a frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora, expressa em número de interrupções e centésimos do número de interrupções, e é calculado utilizando a equação (14).

$$FEC = \frac{\sum_{i=1}^k C_a(i)}{C_C} \quad (15)$$

Em que:

- $C_a(i)$: Número de unidades consumidoras, atendidas em baixa ou média tensão, interrompidas em um evento (i), no período de apuração;
 i : Índice de eventos ocorridos no sistema que provocam interrupções em uma ou mais unidades consumidoras;
 k : Número máximo de eventos no período considerado;
 C_C : Número total de unidades consumidoras faturadas, do conjunto considerado no período de apuração, atendidas em baixa ou média tensão.

2.7.3 ENS

A ENS pode ser definida como a quantidade de energia que deixa de ser consumida pelos usuários em decorrência de uma interrupção. O valor da ENS é calculado como o valor da área sob a curva que descreve a quantidade de carga não suprida pelo tempo, do início do processo restaurativo até o tempo de reparo da falha. No Capítulo 5, a ENS é analisada com maior detalhe.

3 O PROBLEMA DE RESTAURAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO

O problema de restauração de sistemas de distribuição de energia elétrica pode ser formulado matematicamente como um problema de otimização não linear inteiro misto, não convexo do tipo NP-completo. Na seção 3.1. é apresentada e justificada a escolha do valor de energia não suprida como função objetivo que deve ser minimizada, por meio de uma abordagem integrada dos problemas de restauração e sequenciamento de operação de chaves de manobras. Na seção 3.2. são apresentadas as restrições do problema.

3.1 ABORDAGEM INTEGRADA DOS PROBLEMAS DE RESTAURAÇÃO E DE SEQUENCIAMENTO DE CHAVES: A ENERGIA NÃO SUPRIDA COMO FUNÇÃO OBJETIVO

Na literatura (CARVALHO; FERREIRA; BARRUNCHO, 2007), os problemas de restauração e de sequenciamento de chaves têm sido abordados de forma separada e sequencial. Desta forma, o resultado do algoritmo de restauração é o dado de entrada para o algoritmo que gera a sequência de chaveamento. A inconsistência com esta abordagem é que, não necessariamente o resultado que o algoritmo de restauração fornece, é o melhor dado de entrada para o algoritmo que fornece o sequenciamento de operação das chaves, porque quando os problemas de restauração e sequência de chaveamentos são resolvidos separadamente, eles consideram funções objetivos diferentes. O problema de restabelecimento do fornecimento de energia tem por objetivo minimizar a quantidade de carga desconectada com o menor número de chaveamentos possíveis, enquanto que o problema de sequenciamento de chaves tem o objetivo de reduzir a energia não suprida no sistema durante um evento de falta permanente. De fato, estas funções objetivo não são totalmente conflitantes entre si, pois reconectar mais carga pode reduzir o valor de energia não suprida no sistema, porém, outras variáveis fazem parte do cálculo da energia não suprida além da carga restaurada: o tempo de reparo da falha e o tempo necessário para manobrar os diferentes tipos de chaves da rede.

Nesta seção é demonstrada, de forma argumentativa, que a solução integrada dos problemas de restabelecimento e sequenciamento de manobras de chaves fornece resultados de igual ou melhor qualidade em contraste com os resultados obtidos quando os problemas são resolvidos de forma separada e sequenciável para sistemas com apenas chaves manuais, chaves manuais e telecomandadas e, inclusive, para sistemas com apenas chaves

telecomandadas. Também, uma análise de sensibilidade apresenta as condições ideais em que resolver ambos os problemas, integrados ou separados, fornece resultados de igual qualidade e, a partir desta análise, a melhor função objetivo é escolhida para o problema de restauração.

A presente seção está organizada da seguinte forma: na seção 3.1.1. é realizada uma análise sobre a integração dos problemas de restabelecimento e sequenciamento de chaves em um único problema, na seção 3.1.2. é efetuada a análise de sensibilidade sobre a abordagem integrada de ambos os problemas e, finalmente, na seção 3.1.3. apresenta-se uma discussão sobre qual deve ser a melhor função objetivo do problema de restauração dependendo dos equipamentos de controle e as tecnologias que existem nos sistemas de distribuição.

3.1.1 Análise da integração dos problemas de restauração e sequenciamento de chaves em redes de distribuição

Os indicadores de continuidade do serviço de distribuição de energia elétrica são normalmente estabelecidos com relação à duração e à frequência de interrupção, entre os principais encontra-se o DEC, FEC e ENS. Em geral, a minimização do tempo em que as cargas são restauradas melhora os indicadores de continuidade do sistema. Porém, minimizar o tempo de restauração não influencia no número de faltas na rede, e, portanto, o FEC não é afetado (ALNUJAIMI; ABIDO; ALMUHAINI, 2018). Neste trabalho, o índice de continuidade escolhido para ser melhorado é o valor da ENS. O cálculo da ENS é detalhado no Capítulo 5.

O problema de restauração é usualmente considerado na literatura como um problema composto por funções objetivo relativamente conflitantes entre si, em que as duas principais são: maximizar a quantidade de carga reconectada e minimizar o número de chaveamentos. A presença de múltiplos objetivos no problema, a princípio, dá origem a um grupo de soluções ótimas (ao invés de uma única solução) conhecidas como soluções ótimas de Pareto, e cada solução não pode ser considerada melhor que outra na fronteira ótima de Pareto (DEB *et al.*, 2002). Porém, no problema de restauração as funções objetivo não possuem a mesma importância e, portanto, podem ser priorizadas. Por exemplo, as empresas distribuidoras estão mais interessadas em reconectar mais carga ainda que sejam necessários mais chaveamentos. Dessa forma, a maximização de cargas reconectadas pode ser considerada como o objetivo mais relevante para o problema de restabelecimento de energia em sistemas sob contingências (KUMAR; DAS; SHARMA, 2008). Portanto, um problema com várias funções objetivo, embora com graus de importância diferentes, pode ficar melhor representado por meio de técnicas de abordagem hierarquizadas como encontrado na literatura (ROMERO *et al.*, 2016).

A finalidade de abordar o problema de restabelecimento de forma multiobjetivo, é ter um espectro de opções de solução para o processo restaurativo, desde soluções com muitas cargas reconectadas utilizando muitos chaveamentos, até soluções com poucas cargas reconectadas empregando poucos chaveamentos. O usuário, responsável pela tomada de decisões, deve escolher a melhor opção segundo as condições em que a falta permanente ocorre no sistema. A pergunta está em, porque o usuário escolheria uma solução que restaura pouco em vez de uma solução que restaura muito? A resposta intuitiva é que para reconectar muita carga é provável que seja necessário efetuar muitos chaveamentos, demorando o processo de reconexão de cargas e, conseqüentemente, aumentando o montante da energia que deixa de ser vendida pela concessionária. Por outro lado, de forma intuitiva também, é possível pensar que uma solução com poucos chaveamentos restaura pouca carga, mas com um tempo total de implementação baixo.

As análises, para soluções com muitos ou poucos chaveamentos, são apenas intuitivas e, dependendo das condições do problema, podem existir soluções que restauram muita carga com poucos chaveamentos e vice-versa. Para evitar análises desnecessárias e decisões inadequadas pelo usuário, uma função objetivo diferente deve ser escolhida como indicador de qualidade das candidatas à solução para o problema de restauração. Neste trabalho, a função objetivo escolhida é a minimização do valor da ENS. Desta forma, uma candidata à solução é avaliada segundo a quantidade de energia que a empresa concessionária deixa de vender durante o evento de falta permanente. Para tal fim, a estratégia é a seguinte: para cada candidata a solução que o algoritmo de restauração visita durante a exploração do espaço de busca, é calculado o valor da ENS. Este cálculo da ENS é realizado por meio da geração da seqüência de chaveamento para cada candidata a solução, utilizando a heurística proposta no Capítulo 5.

Concluindo, é possível afirmar que o problema de restauração, seja abordado de forma multiobjetivo por meio das soluções que fazem parte da Fronteira Ótima de Pareto, ou de forma mono-objetivo e hierarquizado por meio de técnicas como a ponderação de pesos, a natureza da resposta convencional do problema de restauração é a mesma: uma lista de chaves sem ordem de operação. Esta lista de chaves faz parte do problema de sequenciamento de chaves como um dado de entrada para estabelecer a ordem de operação em que os chaveamentos devem ser efetuados visando minimizar o valor de energia não suprida no sistema. Ou seja, a lista de chaves gerada, que devem ser operadas, é apenas uma etapa intermediária para o verdadeiro objetivo do problema de restauração: minimizar o valor de energia não suprida. Neste trabalho, esta etapa intermediária é desconsiderada, assumindo o

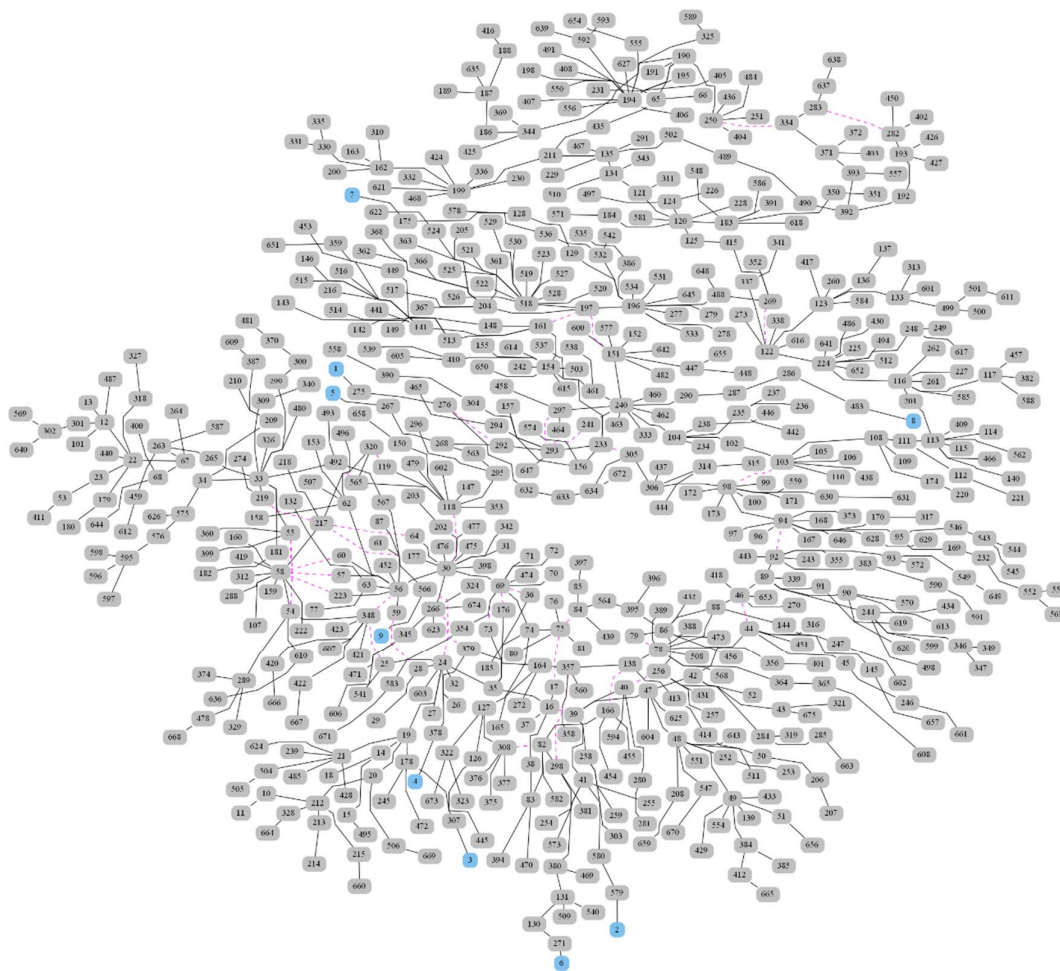
valor da ENS como a função objetivo que deve ser minimizada no problema de restabelecimento.

Para visualizar o efeito que tem a consideração da ENS como função objetivo sobre o resultado do problema de restauração, um exemplo utilizando um sistema de grande porte é apresentado. Seja o seguinte exemplo, em que um sistema real de grande porte com nove alimentadores, 7052 nós e 707 chaves, é utilizado como teste. Na Figura 14 apresenta-se o diagrama unifilar do sistema, em que as seções na cor azul representam as seções no início de cada alimentador, as seções em cinza representam seções de carga, as linhas pretas e contínuas representam as chaves normalmente fechadas e as linhas roxas e descontínuas representam as chaves normalmente abertas. No Capítulo 6, este sistema é apresentado com maiores detalhes.

A análise é realizada assumindo uma falta permanente no começo de cada alimentador, considerando um tempo de reparo de três horas. Para cada falta são utilizadas duas estratégias de solução. Na primeira estratégia, os problemas de restauração e sequenciamento de chaves são considerados independentes e resolvidos sequencialmente, portanto, a função objetivo do problema de restabelecimento é minimizar a carga não suprida utilizando o menor número de chaves possível. Uma vez finalizado o problema de restabelecimento, a lista de chaves obtida para manobras é utilizada como dado de entrada para o problema de sequência de chaveamento que visa minimizar o valor da ENS. A segunda estratégia de solução, considera o valor da ENS como função objetivo que deve ser minimizada pelo algoritmo de restauração. Na Tabela 4 ambas as estratégias de solução são detalhadas.

Para analisar a existência de diferentes tipos de chaves instaladas nos sistemas de distribuição, três cenários são considerados no exemplo. No primeiro cenário é assumido que o sistema possui apenas chaves manuais com tempo de manobra de 40 minutos cada uma. Em um segundo cenário, é assumido que o sistema possui 354 chaves telecomandadas com tempo de manobra de um minuto, e 353 chaves manuais com tempo de manobra de 40 minutos. Para o terceiro cenário, é assumido que todas as chaves são telecomandadas com tempo de operação de um minuto. Os resultados para o primeiro, segundo e terceiro cenários, são apresentados nas Tabelas 5, 6 e 9, respectivamente.

Figura 14 – Configuração inicial do sistema real de 7052 nós



Fonte: próprio autor

Tabela 4 – Estratégias de solução

Estratégia	Descrição	Função objetivo do problema de restauração
Estratégia-1	Resolver sequencialmente os problemas de restauração e sequenciamento de chaves	Carga não restaurada + Número de chaveamentos
Estratégia-2	Integração dos problemas de restauração e sequenciamento de chaves	Energia não suprida

Fonte: próprio autor

Na Tabela 5, os resultados para o sistema com apenas chaves manuais são apresentados. Como pode ser observado, todos os resultados obtidos utilizando a Estratégia-2 foram de igual ou melhor qualidade que os obtidos com a Estratégia-1. Particularmente, o

valor da ENS no cenário de falta no Alimentador 2, foi reduzido em 46,19 % quando utilizada a Estratégia-2, comparada com o valor da ENS obtido com a primeira estratégia.

Tabela 5 – Resultados para o sistema com chaves manuais

Falta	ENS [kWh]		Redução da ENS
	Estratégia-1 (ENS1)	Estratégia-2 (ENS2)	$\frac{(ENS1 - ENS2)}{ENS1} \cdot 100$ [%]
Alimentador 1	3072,26	3072,26	0,00 %
Alimentador 2	13482,07	7254,06	46,19 %
Alimentador 3	3072,26	3072,26	0,00 %
Alimentador 4	3072,26	3072,26	0,00 %
Alimentador 5	3072,26	3072,26	0,00 %
Alimentador 6	17494,24	17494,24	0,00 %
Alimentador 7	495,53	495,53	0,00 %
Alimentador 8	11202,06	11202,06	0,00 %
Alimentador 9	20959,21	20959,21	0,00 %

Fonte: próprio autor

Na Tabela 6 são apresentados os resultados quando é considerada a existência de chaves manuais e telecomandadas instaladas na rede. Muitos sistemas atuais de distribuição possuem conjuntos de chaves com características similares a esta. Em geral, o valor da ENS é igual ou de melhor qualidade utilizando a Estratégia-2, em comparação com os valores obtidos com a Estratégia-1. A maior redução da ENS utilizando a Estratégia-2 em relação ao valor obtido com a Estratégia-1, é de 94,07 % no cenário de falta permanente no Alimentador 1, em que na Estratégia-1 propõe-se utilizar uma chave manual, enquanto que na Estratégia-2 utilizam-se três chaves telecomandadas.

Tabela 6 – Resultados para o sistema com chaves manuais e telecomandadas

Falta	ENS [kWh]		Redução da ENS
	Estratégia-1 (ENS1)	Estratégia-2 (ENS2)	$\frac{(ENS1 - ENS2)}{ENS1} \cdot 100$ [%]
Alimentador 1	3072,26	182,19	94,07 %
Alimentador 2	339,58	214,20	36,92 %
Alimentador 3	3072,26	2124,30	30,86 %
Alimentador 4	76,81	76,81	0,00 %
Alimentador 5	3072,26	2756,42	10,28 %
Alimentador 6	437,36	437,36	0,00 %
Alimentador 7	12,39	12,39	0,00 %
Alimentador 8	5111,43	5111,43	0,00 %
Alimentador 9	20221,76	12119,39	40,07 %

Fonte: próprio autor

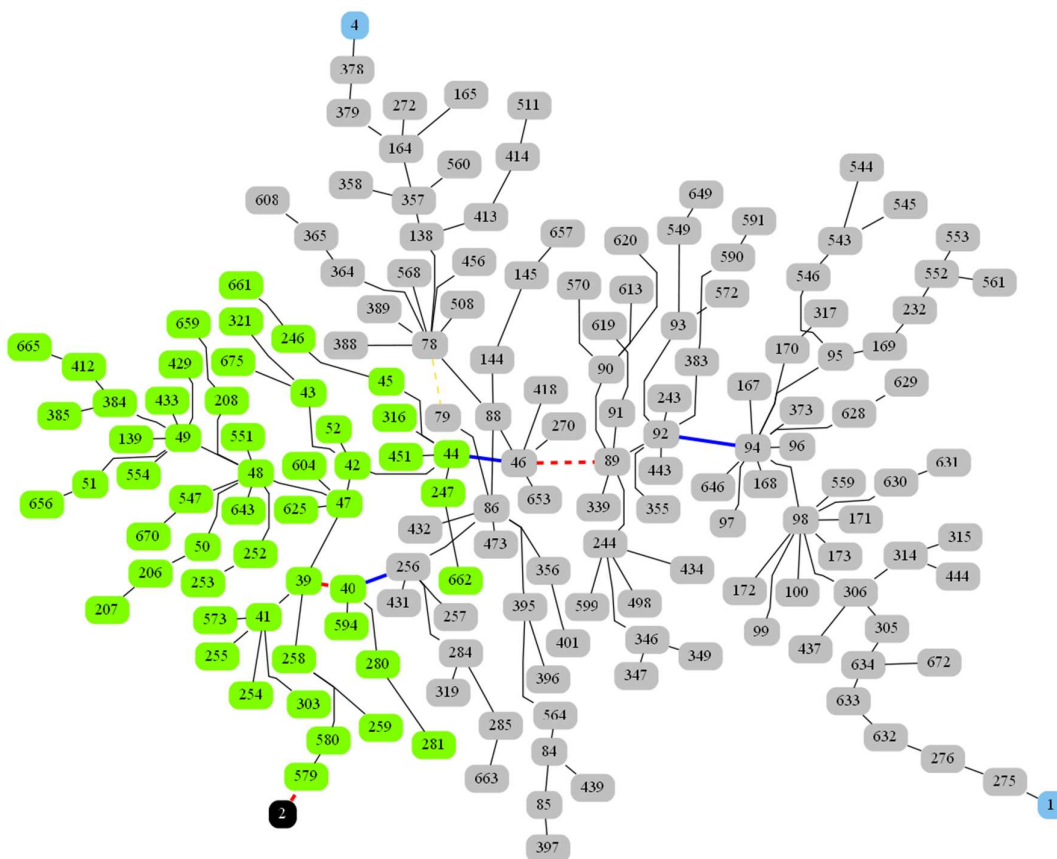
Cenários interessantes aparecem quando analisadas as faltas no Alimentador 3 e no Alimentador 5. No Alimentador 3, utilizando a Estratégia-1 apenas uma manobra de chave manual é necessária, enquanto que com a Estratégia-2 são necessários quatro chaveamentos telecomandados e um chaveamento manual. A diferença no valor da ENS para ambos os casos está que, mesmo utilizando mais chaveamentos na Estratégia-2, os chaveamentos telecomandados reconectam rapidamente carga no sistema, deixando o chaveamento manual para o final.

Da mesma forma acontece com a falta permanente no Alimentador 5, na Estratégia-1 utiliza-se um chaveamento manual, enquanto que a Estratégia-2 utilizam-se dois chaveamentos telecomandados e um chaveamento manual. O valor da ENS com a Estratégia-2 é menor porque os chaveamentos telecomandados são utilizados com prioridade, reconectando grande parte da carga no sistema, deixando o chaveamento manual para os estágios posteriores.

Um resultado muito interessante é obtido quando assumida uma falta permanente no início do Alimentador 2. Uma hipótese que deve ser avaliada é a seguinte: com a existência de chaves manuais e telecomandadas no sistema, utilizar apenas a Estratégia-2 ou utilizar a Estratégia-1 penalizando o uso de chaves manuais devem ser obtidas as mesmas soluções. O cenário com falta no Alimentador 2 mostra que isto não é verdade. Nesse cenário, a Estratégia-1 e a Estratégia-2 fornecem soluções em que são necessárias 5 manobras de chaves telecomandadas em cada uma, e ambas as estratégias restauram toda a carga desenergizada após a falta permanente. Porém, a Estratégia-2 fornece uma solução de melhor qualidade porque reconecta uma região do sistema rapidamente. Na Estratégia-1, um grupo de cargas energizadas pertencentes ao Alimentador 4 são realocadas em um alimentador adjacente, demorando a reconexão das cargas desenergizadas no sistema, porque a função objetivo não contempla a necessidade de priorizar a reenergização de usuários desconectados, apenas prioriza o uso de chaves telecomandadas.

Na Figura 15 apresenta-se a configuração final do sistema considerando a Estratégia-1, em que as linhas vermelhas e descontínuas representam as chaves abertas e as linhas azuis e contínuas representam as chaves fechadas para gerar a configuração final do sistema, e na Tabela 7 detalha-se a sequência de chaveamento correspondente. Na Figura 16 apresenta-se a configuração final utilizando a Estratégia-2 e na Tabela 8 mostra-se a sequência de chaveamento correspondente.

Figura 15 – Configuração final após falta no Alimentador 2 utilizando a Estratégia-1



Fonte: próprio autor

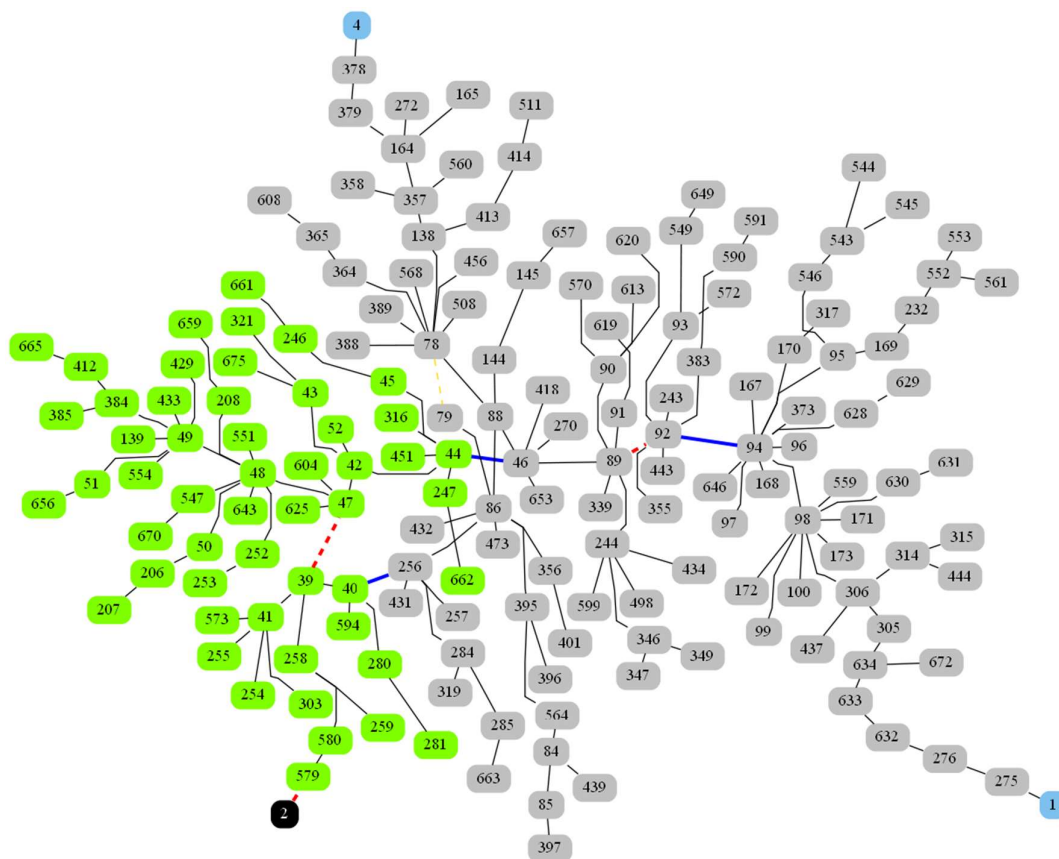
Tabela 7 – Sequência de chaveamento após falta no Alimentador 2 utilizando a Estratégia-1

Estágio	Ação	Chave
Isolamento da falta	Abrir	2 – 579
1	Abrir	46 – 89
2	Fechar	92 – 94
3	Abrir	39 – 40
4	Fechar	44 – 46
5	Fechar	256 – 40

Fonte: Próprio autor

Na Tabela 9, os resultados obtidos para o sistema com apenas chaves telecomandadas, são apresentados. Novamente as soluções obtidas utilizando a Estratégia-2 são de igual, ou melhor qualidade que os resultados obtidos utilizando a Estratégia-1.

Figura 16 – Configuração final após falta no Alimentador 2 utilizando a Estratégia-2



Fonte: próprio autor

Tabela 8 – Sequência de chaveamento após falta no Alimentador 2 utilizando a Estratégia-2

Estágio	Ação	Chave
Isolamento da falta	Abrir	2 – 579
1	Abrir	39 – 47
2	Fechar	44 – 46
3	Abrir	89 – 92
4	Fechar	92 – 94
5	Fechar	256 – 40

Fonte: Próprio autor

Na seção 3.1.2 é realizada uma análise de sensibilidade para identificar as condições ideais em que é possível encontrar soluções com a mesma qualidade utilizando a Estratégia-1 ou a Estratégia-2. A busca destas condições é motivada no tempo computacional necessário para processar ambas as estratégias de solução, uma vez que a Estratégia-1 necessita de menos tempo computacional que a Estratégia-2 para obter a solução do problema. Para efetuar esta análise, os resultados obtidos para o Alimentador 9 são utilizados.

Tabela 9 – Resultados para o sistema com chaves telecomandadas

Falta	ENS [kWh]		Redução da ENS
	Estratégia-1 (<i>ENS1</i>)	Estratégia-2 (<i>ENS2</i>)	$\frac{(ENS1 - ENS2)}{ENS1} \cdot 100$ [%]
Alimentador 1	76,81	76,81	0,00 %
Alimentador 2	339,58	196,38	42,17 %
Alimentador 3	76,81	76,81	0,00 %
Alimentador 4	76,81	76,81	0,00 %
Alimentador 5	76,81	76,81	0,00 %
Alimentador 6	437,36	437,36	0,00 %
Alimentador 7	12,39	12,39	0,00 %
Alimentador 8	280,05	280,05	0,00 %
Alimentador 9	5981,08	5725,73	4,27 %

Fonte: próprio autor

3.1.2 Análise de sensibilidade da integração dos problemas de restauração e sequência de chaveamentos

Nesta seção é realizada uma análise de sensibilidade para sistemas de distribuição com apenas chaves telecomandadas. Nesta análise são estabelecidas as condições ideais para obter soluções de igual qualidade utilizando a Estratégia-1 ou a Estratégia-2 que foram detalhadas na seção 3.1.1.

A análise não é realizada para sistemas com chaves manuais, porque a Estratégia-2 é considerada superior com a existência deste tipo de chaves no sistema, porque nesta estratégia considera-se o tempo de operação das chaves e o tempo de reparo da falha, condições que não são consideradas na Estratégia-1.

Na presença de chaves manuais, a Estratégia-1 (com função objetivo de minimizar carga desconectada) tem a tendência de fornecer uma lista com muitos chaveamentos e tempo total de chaveamentos alto, que pode ultrapassar o tempo de reparo. Por outro lado, quando consideradas apenas chaves telecomandadas no sistema, é difícil que o tempo para realizar todos os chaveamentos ultrapasse o tempo de reparo, portanto, devem existir condições de operação em que a Estratégia-1 e a Estratégia-2 apresentem resultados da mesma qualidade. A procura destas condições é motivada no tempo computacional consumido por ambas as estratégias de solução, uma vez que a Estratégia-1 consome menos tempo computacional que a Estratégia-2, como detalhado na análise a seguir.

Uma falta permanente é assumida no início do Alimentador 9 no sistema da Figura 14, no qual é considerado que existem apenas chaves telecomandadas. Os resultados, utilizando ambas as estratégias de solução, são os seguintes:

- Utilizando a Estratégia-1, são necessários 17 chaveamentos para restaurar 5.877,80 kW com valor de ENS igual a 5.981,08 kWh e tempo computacional de 28,49 segundos. Na Figura 17 apresenta-se a configuração final do sistema, e na Tabela 10 apresenta-se a sequência de chaveamento correspondente.
- Utilizando a Estratégia-2, são necessários 14 chaveamentos para restaurar 5.864,28 kW com valor de ENS igual a 5.725,73 kWh e tempo computacional de 175,32 segundos. Na Figura 18 apresenta-se a configuração final do sistema, e na Tabela 11 apresenta-se a sequência de chaveamento correspondente.

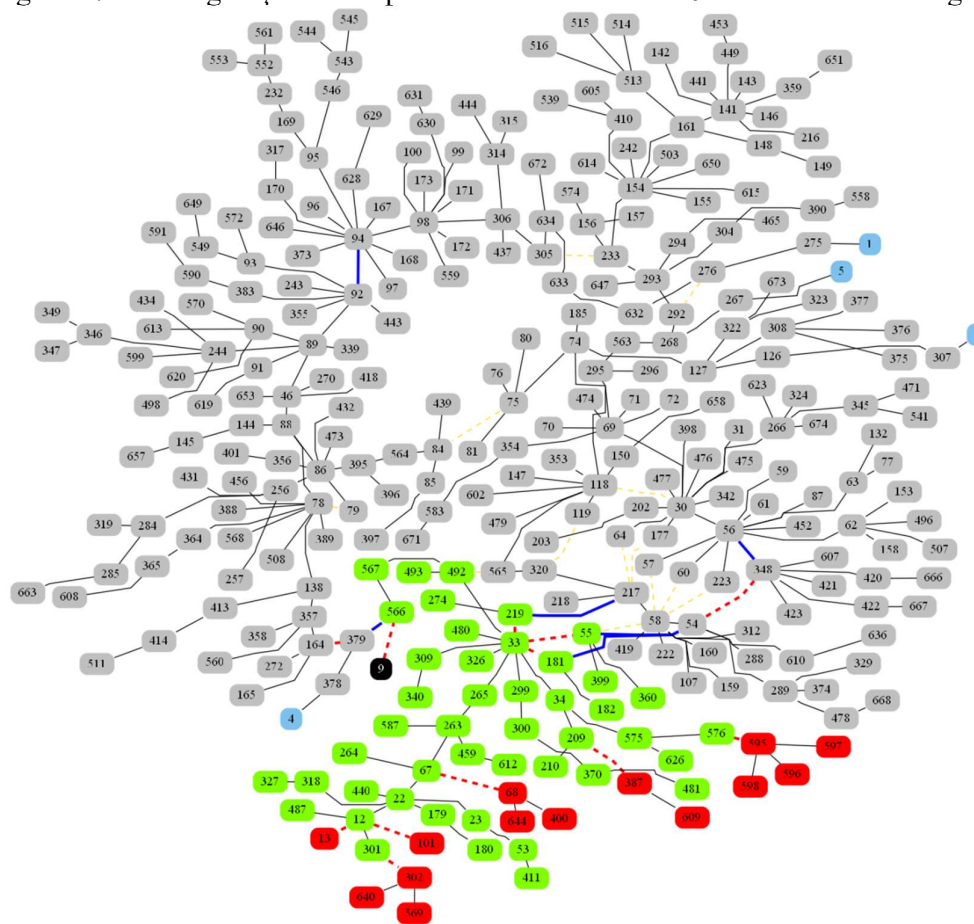
Como pode ser observado, na Estratégia-1 restaura-se mais carga com mais chaveamentos, porém o valor de ENS é maior que o resultado obtido utilizando a Estratégia-2 que precisa de menos chaveamentos para restaurar menos carga.

A diferença no valor da ENS se explica porque na Estratégia-2 procura-se restaurar carga de forma rápida com o objetivo de melhorar o indicador de continuidade do sistema. Porém, o tempo computacional para a Estratégia-1 foi muito menor, e esta característica é importante para um problema que deve ser resolvido em tempo real, como é o problema de restauração.

Portanto, é interessante procurar as condições em que a Estratégia-1 e a Estratégia-2 oferecem resultados da mesma qualidade, para aproveitar o pequeno tempo computacional que demanda a primeira estratégia de solução. Para isto, uma análise de sensibilidade é apresentada na Tabela 12, em que o tempo necessário para manobrar uma chave telecomandada é alterado, até as duas estratégias de solução fornecerem resultados com a mesma qualidade.

Na Tabela 12 são apresentados os resultados fornecidos por ambas as estratégias de solução, modificando o tempo de manobra das chaves telecomandadas, iniciando com 60 segundos, considerando que na literatura os tempos de manobras considerados flutuam entre 50 segundos (KUMAR; DAS; SHARMA, 2008) e 5 minutos (LEI; WANG; HOU, 2018).

Figura 17 – Configuração final após falta no Alimentador 9 utilizando a Estratégia-1



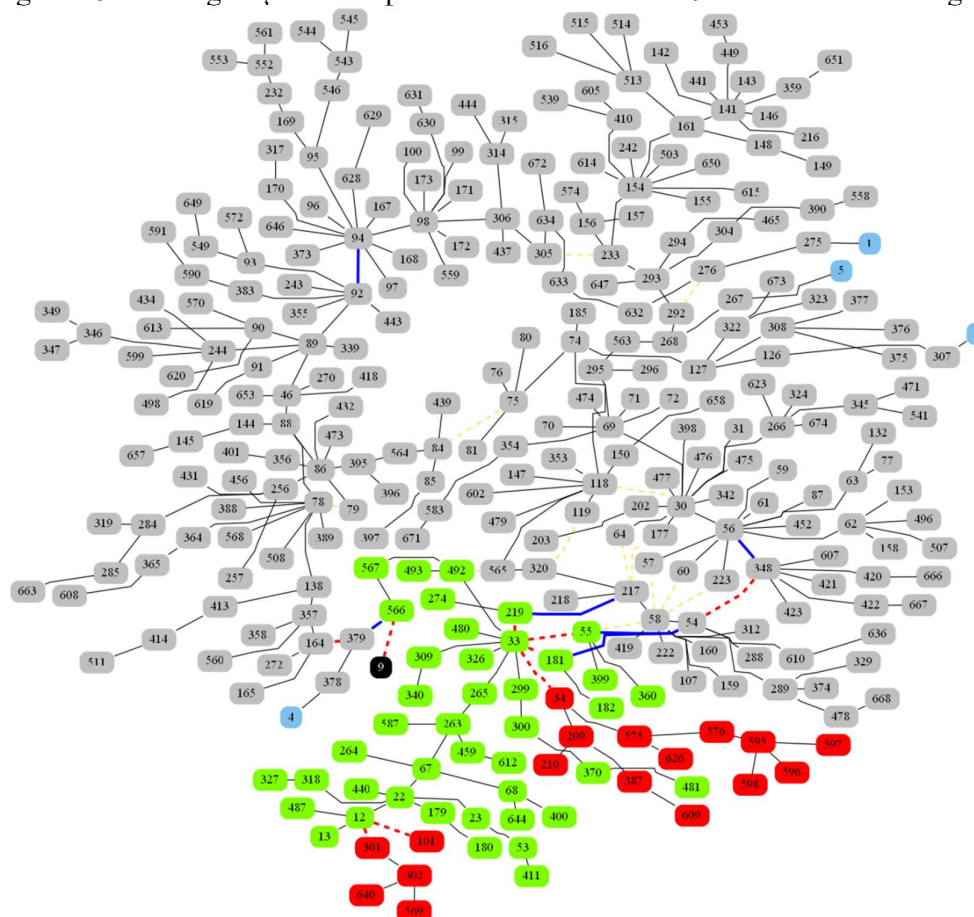
Fonte: próprio autor

Tabela 10 – Sequência de chaveamento após falta no Alimentador 9 utilizando a Estratégia-1

Estagio	Ação	Chave
Isolamento da falta	Abrir	9 – 566
1	Abrir	379-164
2	Fechar	92 – 94
3	Abrir	301 – 302
4	Abrir	12 – 101
5	Abrir	12 – 13
6	Abrir	67 – 68
7	Abrir	209 – 387
8	Abrir	576 – 595
9	Abrir	33 – 55
10	Abrir	33 – 219
11	Abrir	33 – 181
12	Fechar	379 – 566
13	Fechar	54 – 55
14	Fechar	54 – 181
15	Abrir	54 – 348
16	Fechar	348 – 56
17	Fechar	217 – 219

Fonte: Próprio autor

Figura 18 – Configuração final após falta no Alimentador 9 utilizando a Estratégia-2



Fonte: próprio autor

Tabela 11 – Sequência de chaveamento após falta no Alimentador 9 utilizando a Estratégia-2

Estagio	Ação	Chave
Isolamento da falta	Abrir	9 – 566
1	Abrir	379-164
2	Fechar	92 – 94
3	Abrir	301 – 302
4	Abrir	12 – 101
5	Abrir	12 – 13
6	Abrir	67 – 68
7	Abrir	209 – 387
8	Abrir	576 – 595
9	Fechar	33 – 55
10	Fechar	33 – 219
11	Fechar	33 – 181
12	Abrir	379 – 566
13	Fechar	54 – 55
14	Fechar	54 – 181

Fonte: Próprio autor

Como é possível observar na Tabela 12, quando o tempo de operação de uma chave telecomandada diminui, com tendência a ser instantâneo, resolver os problemas de restauração e sequenciamento, separados ou juntos, oferecem resultados com a mesma qualidade, porém, o tempo computacional da segunda estratégia é maior. Pode-se concluir que a Estratégia-1 é válida quando os tempos de operação das chaves são baixos com tendência a serem instantâneos. Porém, o tempo de operação das chaves depende da tecnologia de comunicação do sistema e das características oferecidas pelo fabricante dos equipamentos de chaveamentos.

Tabela 12 – Análise de sensibilidade da integração dos problemas de restauração e sequenciamento de chaves. TCH – tempo de operação de chave, N – número de chaveamentos, CR – carga restaurada, ENS – energia não suprida, t – tempo de processamento

TCH [seg]	Estratégia-1				Estratégia-2			
	N	CR [kW]	ENS [kWh]	t [segundo]	N	CR [kW]	ENS [kWh]	t [segundo]
60	17	5877,80	5981,08	28,49	14	5864,28	5725,73	175,32
50	17	5877,80	5761,78	28,73	14	5864,28	5555,75	175,15
40	17	5877,80	5542,48	29,27	14	5864,28	5385,77	174,63
30	17	5877,80	5323,18	28,82	14	5864,28	5215,79	176,57
20	17	5877,80	5103,88	28,43	14	5864,28	5045,81	181,71
10	17	5877,80	4884,58	28,95	14	5864,28	4875,83	191,66
5	17	5877,80	4774,93	29,12	17	5877,80	4774,93	188,85

Fonte: Próprio autor

3.1.3 Seleção de uma função objetivo adequada para o problema de restabelecimento

Neste trabalho, é considerada a minimização do valor da ENS como a função objetivo do problema de restauração. Para modelar matematicamente esta função objetivo, a função objetivo do problema clássico de restauração, minimizar a quantidade de carga sem fornecimento de energia utilizando o menor número de chaveamentos possível, é associada com o problema de sequenciamento de chaves.

Com esta abordagem, tem-se o intuito de desconsiderar a calibração de parâmetros e evitar metodologias inadequadas encontradas na literatura. Por exemplo, evitar definir os pesos no método de ponderação que visa transformar um problema multiobjetivo em mono-objetivo, e evitar, também, o uso de técnicas multiobjetivas ao considerar a ENS como único valor que deve ser minimizado.

Duas estratégias foram definidas para abordar os problemas de restauração e sequenciamento de chaves. Na Estratégia-1 assume-se que os problemas devem ser resolvidos

de forma separada e em sequência, portanto a função objetivo do problema de restauração é definida como minimizar a carga desconectada com o menor número de chaveamentos, enquanto que na Estratégia-2 propõe-se a integração de ambos os problemas, em um único problema modelando a minimização do valor da ENS como função objetivo.

Segundo a análise efetuada na seção 3.1.1. é possível observar que a Estratégia-2 fornece soluções de igual, ou melhor, qualidade que as soluções obtidas com a Estratégia-1 para um sistema de grande porte com três condições de projeto diferentes: considerando apenas chaves manuais, considerando um conjunto misto de chaves manuais e telecomandadas, e assumindo apenas chaves telecomandadas. Porém, o custo computacional da Estratégia-2 é maior que da Estratégia-1. A análise realizada na seção 3.1.1. evidencia que os tempos vinculados à Estratégia-1 atingem valores próximos a 30 segundos, enquanto que com a Estratégia-2 os tempos computacionais são próximos a três minutos.

Para escolher a melhor estratégia de solução para o problema de restabelecimento, e conseqüentemente a função objetivo do problema, deve ser levada em consideração que a diferença entre as soluções obtidas com as duas estratégias é muito maior quando é considerada a existência de chaves manuais nos sistemas de distribuição, enquanto que, quando apenas chaves telecomandadas são consideradas, a diferença da qualidade entre as soluções obtidas com a primeira e a segunda estratégia, é relativamente pequena.

Conclui-se, portanto, que quando chaves manuais estão instaladas na rede de distribuição, a segunda estratégia de solução é a mais adequada, dado que as soluções são de qualidade superior em comparação com os resultados que poderiam ser obtidos aplicando a primeira estratégia, embora o tempo computacional necessário para obter a solução seja maior. Por outro lado, quando existem apenas chaves telecomandadas na rede, adotar a primeira estratégia apresenta-se como uma opção válida, porque a qualidade das soluções obtidas pelas duas estratégias é próxima e o ganho em tempo computacional é importante para um problema que deve ser resolvido em tempo real como é o problema de restauração; embora, como analisado na seção 3.1.2, os tempos de manobras para chaves telecomandadas sejam baixos com tendência a serem instantâneos, e isto depende da tecnologia de comunicação que o sistema distribuição possui e das características oferecidas pelo fabricante dos equipamentos de chaveamento.

3.2 RESTRIÇÕES DO PROBLEMA DE RESTAURAÇÃO

As restrições do problema apresentadas nesta seção permitem avaliar com precisão a factibilidade de cada proposta de solução encontrada por meio da técnica meta-heurística através do espaço de busca do problema. As restrições para o problema de restauração são:

- 1) As equações estáticas de fluxo de potência para redes radiais e fracamente malhadas com GD;
- 2) Cada RT possui um número predefinido de posições de taps para controlar a tensão em degraus (Δtap_a). A relação de regulação é dada por (16);

$$RR_a = 1 - tap_a * \Delta tap_a \quad tap_a \in \{tap_{min,a}, \dots, tap_{max,a}\} \quad (16)$$

- 3) Os bancos de capacitores chaveados, são compostos por um número máximo de degraus ($nsw_{max,b}$) que controla uma capacidade individual (ΔC_b). A injeção de potência reativa em cada condição de operação (C_b^{sw}) é dada por (17);

$$C_b^{sw} = nsw_b * \Delta C_b \quad nsw_b \in \{0,1,2, \dots, nsw_{max,b}\} \quad (17)$$

- 4) A rede de distribuição é codificada usando RNP que garante a radialidade da rede através de seus operadores que são aplicados para explorar o espaço de busca no algoritmo de restauração;
- 5) Restrição de limite de geração de potências ativa e reativa, (18) e (20), fator de potência dos GDs, (19), magnitude de tensão nas barras, fluxo de corrente nos ramos da rede e fluxo de potência através do transformador da subestação, (21), (22) e (23), respectivamente. Em cenários em que os limites de operação (tensão, corrente ou potência) são violados, uma penalização de operação é adicionada no valor da função objetivo segundo a equação (24).

$$0 \leq Pg_i \leq Pg_{i,max} \quad (18)$$

$$-\varphi_{i,min} \leq \varphi_i \leq \varphi_{i,max} \quad (19)$$

$$-Pg_i * \tan(\varphi_{i,max}) \leq Qg_i \leq Pg_i * \tan(\varphi_{i,max}) \quad (20)$$

$$V_{k,min} \leq V_k \leq V_{k,max} \quad (21)$$

$$|I_{km}| \leq I_{km,max} \quad (22)$$

$$|S_j^n| \leq S_{j,max}^n \quad (23)$$

$$\text{Penalização Operação} = K_V * \Delta V + K_I * \Delta I + K_S * \Delta S \quad (24)$$

Em que:

Pg_i	:	potência ativa gerada pelo i-ésimo DG;
$Pg_{i,max}$:	capacidade máxima de geração do i-ésimo DG;
Qg_i	:	potência reativa gerada pelo i-ésimo DG;
φ_i	:	ângulo do fator de potência do i-ésimo DG;
$\varphi_{i,min}, \varphi_{i,max}$:	ângulo do fator de potência mínimo e máximo, respectivamente, do i-ésimo DG;
V_k	:	magnitude de tensão na barra k;
$V_{k,min}; V_{k,max}$:	magnitudes de tensão mínima e máxima na barra k;
$ I_{km} $:	magnitude de corrente entre os nós k e m;
$I_{km,max}$:	capacidade máxima de corrente através do condutor entre os nós k e m;
$ S_j^n $:	magnitude da potência aparente através do transformador j na subestação n;
$S_{j,max}^n$:	capacidade máxima de potência aparente através do transformador j na subestação n.
K_V	:	constante de penalização de limite de tensão violada;
ΔV	:	violação de tensão na configuração candidata;
K_I	:	constante de penalização de limite de corrente violada;
ΔI	:	violação de corrente na configuração candidata;
K_S	:	constante de penalização de limite de potência violada;
K_S	:	constante de penalização de limite de tensão violada;

6) Restrição de rampa devido às cargas de aquecimento.

4 A BUSCA TABU COM VIZINHANÇA VARIÁVEL REATIVA

Neste capítulo apresenta-se a meta-heurística proposta neste trabalho para a solução do problema de restauração e o mesmo está dividido em 3 seções. Na seção 4.1, a meta-heurística de Busca Tabu é detalhada. Na seção 4.2, a Busca Tabu com Vizinhança Variável Reativa proposta neste trabalho é apresentada. Na seção 4.3, uma generalização e discussão sobre a Busca Tabu com Vizinhança Variável reativa é apresentada.

4.1 A META-HEURÍSTICA BUSCA TABU

A Busca Tabu (GLOVER, 1989) é uma meta-heurística que gerencia processos simples de busca na procura contínua de melhores soluções. A BT se caracteriza pelo uso dos atributos das configurações geradas na exploração do espaço de busca de um problema em análise. Os principais elementos da busca tabu são:

- Configuração inicial: é o ponto de partida do algoritmo, e, dependendo do problema, pode ser gerada aleatoriamente ou através de um algoritmo heurístico construtivo (AHC). A configuração inicial pode ser factível ou infactível segundo as características do problema. O processo de busca inicia na configuração inicial.
- Estrutura de vizinhança: os processos simples de exploração que compõem as estruturas de vizinhança (EV) são aqueles que definem como o espaço de busca é explorado. A estrutura de vizinhança é a parte mais importante da BT, e a sua composição de atributos deve ser cuidadosamente selecionada para garantir um algoritmo eficiente e que gere soluções de boa qualidade. O processo de busca é realizado através das estruturas de vizinhança.
- Lista tabu: a BT contém uma lista de atributos proibidos chamada lista tabu (LT). Nesta lista, de tamanho predefinido, os atributos de configurações recentemente visitadas são armazenados. Dependendo de sua dimensão, a LT pode ser de curta ou longa duração, podendo armazenar atributos dos candidatos gerados ou até configurações completas. A finalidade da LT é evitar a convergência em ótimos locais e que o algoritmo retorne para configurações já visitadas, permitindo a exploração de novas regiões consideradas atrativas. Durante o processo de busca, novas configurações candidatas são geradas a partir de uma configuração corrente, utilizando as estruturas de vizinhança. A melhor destas configurações candidatas é escolhida

como a nova solução corrente. A passagem da configuração corrente para a melhor configuração candidata é chamada de movimento. Um movimento é chamado de movimento tabu quando a melhor configuração candidata contém atributos armazenados na LT, sendo descartada se não atender o critério de aspiração.

- Critério de aspiração: no processo de busca, alguns movimentos tabus podem impedir a exploração de configurações não visitadas com características consideradas desejáveis. Esta característica desejada é chamada de critério de aspiração (CA), que normalmente é definido como “melhorar a solução incumbente”, embora esta condição faça com que o CA seja poucas vezes ser acionado.
- Critério de parada: é o requisito para o finalizar o algoritmo. O critério de parada pode ser especificado através de um número máximo de iterações, um número predefinido de iterações sem que a solução incumbente seja atualizada, ou quando características desejadas sejam atingidas por uma configuração candidata.

Utilizando esses conceitos básicos, um algoritmo de BT simples é detalhado no Algoritmo 1. A solução final ou incumbente (x^*) é a melhor configuração encontrada no processo.

Algoritmo 1 – Busca tabu simples

Passo de iniciação:

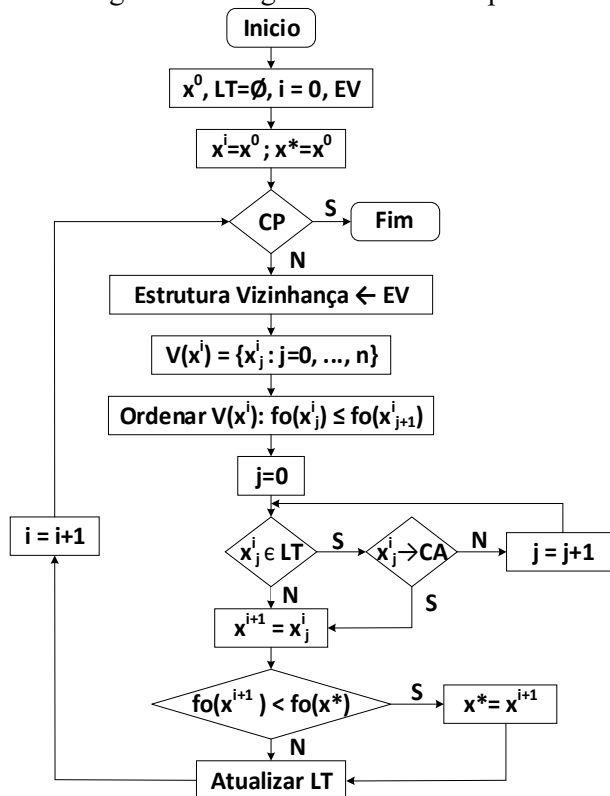
- Construir a configuração inicial (x^0).
- Definir a estrutura de vizinhança (EV).
- Fazer $LT = \emptyset$.
- Estabelecer o critério de parada (CP).
- Iteração = 0.

Passo principal:

- Definir a configuração inicial como a configuração corrente.
- Se o critério de parada é atingido ir passo v. Caso contrário ir ao passo iii.
- Aplicar a estrutura de vizinhança na solução corrente. Escolher o melhor vizinho sem atributos na LT ou que, contendo atributos proibidos, cumpra o critério de aspiração. O vizinho escolhido será a nova configuração corrente e a LT atualizada. Ir ao passo iv.
- Incrementar em uma unidade o número de iteração. Voltar ao passo ii.
- Fim do algoritmo.

O diagrama de blocos de um algoritmo de BT simples é apresentado na Figura 19.

Figura 19 – Algoritmo de BT simples.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Em que:

- x^0 : Configuração inicial
- LT** : Lista tabu
- i** : Número de iteração
- EV** : Estrutura de vizinhança
- x^i : Configuração corrente da iteração i
- x^* : Configuração incumbente
- CP** : Critério de parada
- EV** : Estrutura de vizinhança
- $V(x^i)$: Vizinhança da configuração corrente da iteração i
- j** : Número de vizinho
- x_j^i : Vizinho j pertencente à vizinhança da configuração corrente da iteração i
- $fo(x_j^i)$: Valor da função objetivo do vizinho j pertencente à vizinhança da configuração corrente da iteração i
- CA** : Critério de aspiração

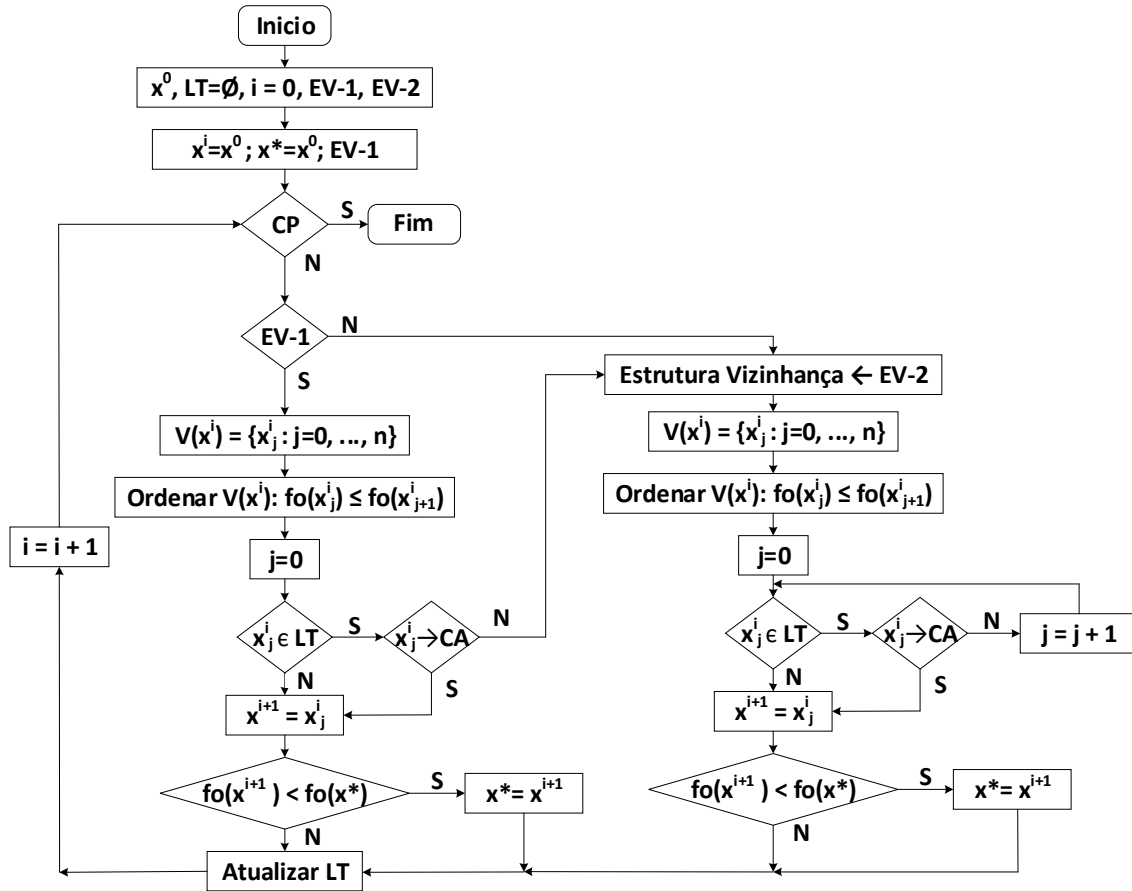
4.2 A BUSCA TABU COM VIZINHANÇA VARIÁVEL REATIVA

A Busca Tabu com Vizinhos Variáveis Reativas proposta neste trabalho é uma versão modificada do algoritmo BT clássico e utiliza as suas principais funcionalidades como a estrutura de vizinhança e a lista tabu. Para melhorar o seu desempenho na exploração de áreas atrativas e factíveis do espaço de busca do problema, a BTVVR tem a funcionalidade de reagir instantaneamente quando a melhor configuração vizinha possui um atributo tabu e atualiza o seu mecanismo de exploração de vizinhança, ou seja, a BTVVR é inicializada com uma estrutura de vizinhança inicial (EV-1) e que pode em seguida ser alterada para outra estrutura de vizinhança final (EV-2). Os passos para executar o algoritmo BTVVR são detalhados no Algoritmo 2.

Algoritmo 2 – Busca tabu com vizinhança variável reativa
<p>Passo de inicial</p> <ul style="list-style-type: none"> - Construir a configuração inicial (x^0). - Definir as estruturas de vizinhança EV-1 e EV-2. Fazer $LT = \emptyset$. - Estabelecer o critério de parada (CP). Iteração = 0. <p>Passo principal</p> <ol style="list-style-type: none"> i. A configuração inicial passa a ser a configuração corrente. ii. Se o critério de parada é atingido, ir passo ix. Caso contrário ir ao passo iii. iii. Aplica-se a EV-1 na solução corrente. O melhor vizinho gerado é selecionado e os seus atributos comparados com os atributos armazenados na LT. Ir ao passo iv. iv. Se o melhor vizinho não possui atributos proibidos ou se atender o critério de aspiração a solução corrente e a LT são atualizados. Nesta atualização a nova solução corrente será a melhor solução vizinha encontrada e os seus atributos são armazenados na LT. Incrementar em uma unidade o número de iteração e voltar ao passo ii. Caso contrário ir ao passo v. v. Atualizar a estrutura de vizinhança EV-1 para a estrutura de vizinha EV-2. Ir ao passo vi. vi. Se o critério de parada foi atingido ir ao passo ix. Caso contrário ir ao passo vii. vii. Aplica-se a EV-2 na solução corrente. O melhor vizinho gerado é selecionado e os seus atributos comparados com os atributos armazenados na LT. Ir ao passo viii. viii. Se o melhor vizinho não possuir atributos proibidos ou se atender o critério de aspiração a solução corrente e a LT são atualizados. Nesta atualização a nova solução corrente será a melhor solução vizinha encontrada e os seus atributos são armazenados na LT. Incrementar em uma unidade o número de iteração e voltar ao passo vi. Caso contrário voltar ao passo vii e escolher um vizinho diferente. ix. Fim do algoritmo.

O diagrama de blocos do algoritmo BTVVR é apresentado na Figura 20.

Figura 20 – Algoritmo da BTVVR



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Em que:

- x^0 : Configuração inicial
- LT** : Lista tabu
- i** : Número de iteração
- EV-1** : Estrutura de vizinhança inicial
- EV-2** : Estrutura de vizinhança final
- x^i : Configuração corrente da iteração i
- x^* : Configuração incumbente
- CP** : Critério de parada
- EV** : Estrutura de vizinhança
- $V(x^i)$: Vizinhança da configuração corrente da iteração i

- j** : Número de vizinho
 x^j : Vizinho j pertencente à vizinhança da configuração corrente da iteração i
 $f_0(x^j)$: Valor da função objetivo do vizinho j pertencente à vizinhança da configuração corrente da iteração i
CA : Critério de aspiração

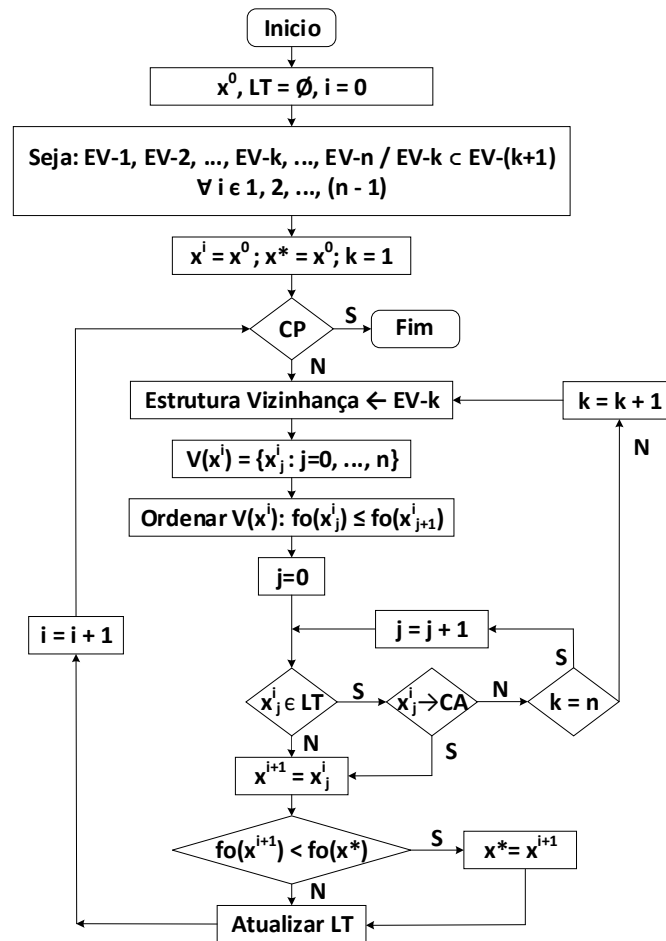
4.3 GENERALIZAÇÃO E DISCUSSÃO SOBRE A BUSCA TABU COM VIZINHANÇA VARIÁVEL REATIVA

Inicialmente, a BTVVR foi proposta para resolver o problema de restauração de redes de distribuição devido à necessidade de procurar soluções sem corte de carga e, caso não fosse possível, incluir mecanismos de corte de cargas para atingir configurações que satisfaçam as restrições operacionais do sistema.

O desafio é identificar o instante em que não é possível restaurar toda a carga localizada nas seções sãs do sistema que foram afetadas pela contingência e considerar o corte de carga como operação não desejada, mas necessária para obter soluções operacionalmente factíveis. O movimento tabu foi escolhido como indicador que a busca por soluções com características desejadas foi saturada e que novos procedimentos, menos atrativos para o problema, têm que ser considerados no processo de busca.

Uma generalização à BTVVR pode ser definida com n estruturas de vizinhança (EV- n), atualizando sequencialmente desde EV-1 até EV- n quando a melhor configuração vizinha da i -ésima iteração possui um atributo tabu. Cada estrutura de vizinhança deve conter mecanismos básicos simples com características desejadas em estruturas iniciais, até características não desejadas, mas necessárias em estruturas finais. Uma característica é definida como desejada ou não a partir do ponto de vista econômico ou operacional. As estruturas de vizinhança da BTVVR são inclusivas, ou seja, a estrutura de vizinhança corrente deve conter os mecanismos da sua antecessora. Um diagrama de blocos da generalização do algoritmo BTVVR é apresentado na Figura 21.

Figura 21 – Algoritmo da BTVVR generalizado.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Em que:

- x^0 : Configuração inicial
- LT : Lista tabu
- i : Número de iteração
- EV : Estrutura de vizinhança
- x^i : Configuração corrente da iteração i
- x^* : Configuração incumbente
- CP : Critério de parada
- n : Número total de estruturas de vizinhança
- EV- k : Estrutura de vizinhança número k
- $V(x^i)$: Vizinhança da configuração corrente da iteração i
- j : Número de vizinho

- x^i_j : Vizinho j pertencente à vizinhança da configuração corrente da iteração i
- $fo(x^i_j)$: Valor da função objetivo do vizinho j pertencente à vizinhança da configuração corrente da iteração i
- CA : Critério de aspiração

Em (MORI; TSUNOKAWA, 2005; BAN; NGUYEN, 2013) propõem-se a combinação das meta-heurísticas BT e a *variable neighborhood search* (VNS) para melhorar a exploração do espaço de busca de um problema, intensificando a busca local com a BT e diversificando a exploração com as mudanças de estruturas de vizinhança da VNS. Embora os trabalhos anteriormente referenciados e o algoritmo proposto são similares, três diferenças podem ser apontadas nestes trabalhos que as tornam não adequadas com o problema de restauração de redes:

- a) No algoritmo proposto a mudança de estrutura de vizinhança ocorre na presença de um movimento tabu (característica reativa do algoritmo), nos trabalhos referenciados um algoritmo BT é iniciado e quando finalizado, a mudança de estrutura de vizinhança é efetuada para novamente iniciar um novo processo de BT, tornando o algoritmo demorado.
- b) As características das estruturas de vizinhança: na BTVVR as estruturas de vizinhança são inclusivas, i.e., os mecanismos básicos de busca da estrutura de vizinhança inicial formam parte da estrutura de vizinhança final, enquanto que nos trabalhos citados as estruturas de vizinhanças têm uma tendência a ser exclusivas entre elas, ou seja, as configurações geradas com uma estrutura de vizinhança são normalmente distintas daquelas geradas com uma estrutura de vizinhança diferente, aumentando a diversificação em estruturas de vizinhança superiores.
 - c) Os trabalhos da literatura referenciados (MORI; TSUNOKAWA, 2005; BAN; NGUYEN, 2013) utilizam a característica da VNS para trocar estruturas de vizinhança finais para iniciais quando uma solução melhor que a incumbente for encontrada, enquanto que no algoritmo proposto a atualização da estrutura de vizinhança não retorna às estruturas anteriores.

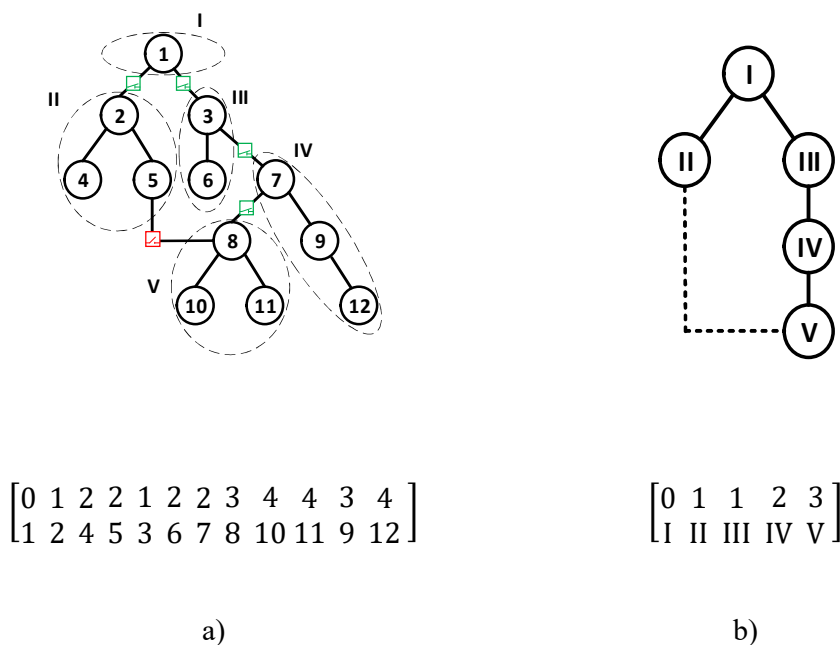
5 METODOLOGIA PROPOSTA

Neste capítulo apresenta-se a metodologia desenvolvida para resolver o modelo de restauração de redes de distribuição do Capítulo 3. Na seção 5.1. é descrita a representação binível para sistemas de distribuição. Na seção 5.2. o algoritmo de Busca Tabu com Vizinhança Variável Reativa para o problema de restauração é apresentado. Na seção 5.3. é abordado o controle centralizado dos *taps* de capacitores chaveados e reguladores de tensão. Na seção 5.4. uma nova heurística para a sequência de chaveamento é introduzida. E, finalmente, em 5.5. é apresentada a formação de microrredes dinâmicas utilizando a função de operação ilhada da GD.

5.1 REPRESENTAÇÃO BINÍVEL PARA SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

Um sistema de distribuição, do ponto de vista da teoria grafo-orientada, pode ser organizado em nós ou em seções. Uma seção é um conjunto de equipamentos limitados por chaves. Um exemplo da formação de seções apresenta-se na Figura 22, em que chaves normalmente fechadas estão na cor verde, e a chave normalmente aberta na cor vermelha.

Figura 22 – Exemplo de formação de seções



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

A representação binível é composta por dois níveis de ordenamento. O primeiro nível é formado por nós, organizados através da representação nó profundidade (Figura 22a). Neste nível básico de ordenamento, as variáveis elétricas são avaliadas através de um programa de cálculo de fluxo de potência por varredura, e nenhum tipo de redução no sistema é considerado.

O segundo nível é formado por seções, organizadas através da representação seção profundidade (Figura 22 b). Neste nível superior de ordenamento, as soluções candidatas do problema de restauração de redes são geradas através dos operadores PAO (*preserve ancestor operator*), CAO (*change ancestor operator*) e o operador de corte de carga e formação de microrredes CUT.

5.2 BUSCA TABU COM VIZINHANÇA VARIÁVEL REATIVA PARA O PROBLEMA DE RESTAURAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO

A BTVVR, apresentada no Capítulo 4, é uma versão modificada do algoritmo de busca tabu clássico e utiliza as suas principais funcionalidades, como a estrutura de vizinhança e a lista tabu.

Para melhorar o seu desempenho na exploração do espaço de busca do problema, a BTVVR atualiza sua vizinhança inicial EV-1 para outra vizinhança final EV-2 quando, no processo de exploração e busca, a melhor configuração vizinha da i -ésima iteração possui um atributo tabu.

Neste trabalho, para propor este algoritmo BTVVR para o problema de restauração, adotou-se como premissa básica as seguintes hipóteses:

- a) Restaurar a maior quantidade de carga possível: na solução do problema de restauração deve-se sempre procurar configurações factíveis que atendam prioritariamente o maior número possível de consumidores.

O desafio na solução do problema é evitar o corte de cargas dos consumidores que estão localizados em seções que não possuam problemas operacionais, ou seja, que estejam em condições normais de operação.

- b) Estrutura de vizinhança inicial sem corte de carga: a EV-1 deve contemplar mecanismos de vizinhança simples que produzam vizinhos factíveis e sem cortes de cargas.
- c) Estrutura de vizinhança final com corte de carga: a EV-2 deve incluir mecanismos de vizinhança simples, que consideram problemas operacionais não desejados como

cortes de carga e operação ilhada da GD, mas que são necessários para a obtenção de soluções factíveis.

Na Figura 23, apresenta-se o processo de exploração do algoritmo BT com estrutura de vizinhança formada pelos operadores PAO e CAO (EV-1), em que o algoritmo falha em encontrar uma resposta, uma vez que é necessário desconectar cargas para atingir valores de operação adequados.

Na Figura 24, apresenta-se o processo de exploração do algoritmo BTVVR em que nas primeiras iterações do algoritmo são usados como mecanismos de exploração os operadores PAO e CAO (EV-1) e, a partir da i -ésima iteração, altera-se a estrutura de vizinhança adicionando o operador CUT (EV-2), pois a partir desta iteração a busca por restaurar todas as cargas interrompidas sem violar as restrições do modelo não é mais possível.

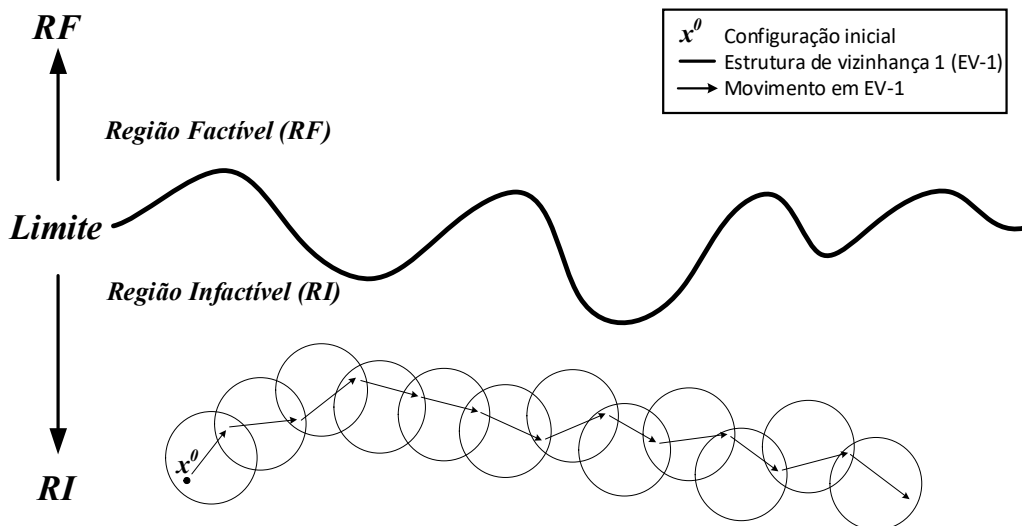
Após verificar todos os vizinhos factíveis da estrutura EV-1, o operador CUT é adicionado à estrutura de vizinhança, passando para configuração relativa à EV-2, permitindo o corte de cargas e a operação ilhada dos GDs.

Diferentemente de (MATHIAS-NETO; MANTOVANI, 2016) onde um percentual preestabelecido de vizinhos é gerado aleatoriamente pelos operadores PAO e CAO, no algoritmo proposto a estrutura de vizinhança é executada exaustivamente através dos operadores PAO, CAO e CUT gerando, assim, todos os vizinhos possíveis do subespaço de busca que estes operadores permitem explorar.

Na lista tabu (LT) são armazenadas as identificações das chaves que são manobradas para gerar a melhor configuração da vizinhança em análise. O tamanho, ou dimensão, da LT é fixo e é um parâmetro que deve ser escolhido de forma adequada. A ativação da característica reativa da busca tabu com vizinhança variável reativa, ocorre no instante que um movimento tabu é realizado, por tanto a dimensão da LT pode evitar a ativação do caráter reativo do algoritmo no cenário em que a LT é de pequeno tamanho ou impedir a exploração de regiões atrativas do problema no cenário em que a LT é de grande dimensão.

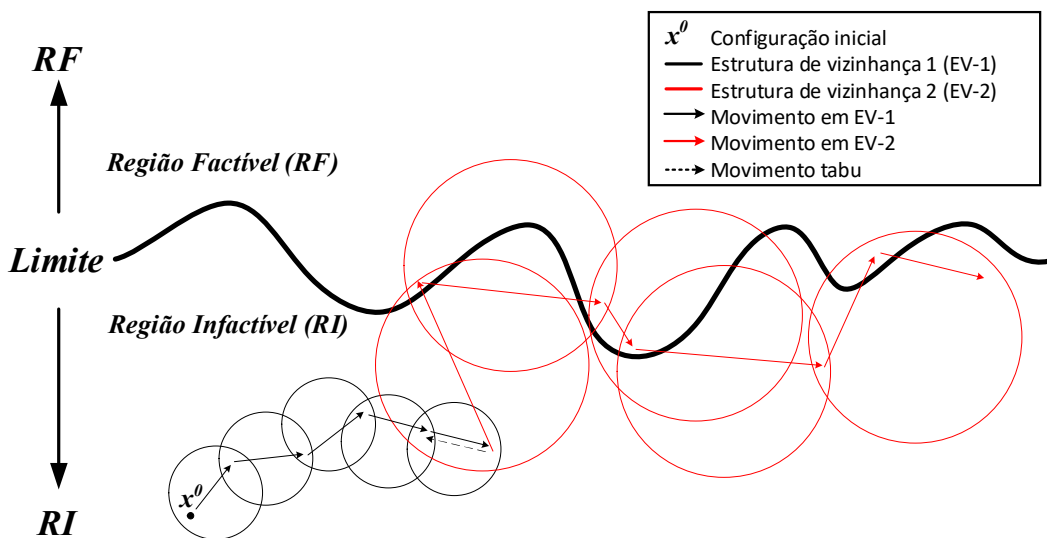
O critério de aspiração (CA) utilizado é o valor da melhor solução incumbente, ou seja, a configuração deixa de ser tabu se o valor de sua função objetivo é melhor que o valor da solução incumbente.

Figura 23 – Processo de exploração da BT



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 24 – Processo de exploração da BTVVR



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

O algoritmo BTVVR para resolver o problema de restauração de rede é composto dos passos estabelecidos no Algoritmo 3.

Algoritmo 3 – BTVVR para o problema de restauração

Passo de iniciação:

- Construir a configuração inicial x^0 através da seguinte heurística:
 - a. Isolar a seção em falta através da abertura de chaves.
 - b. Conectar todas as seções desenergizadas de forma radial às seções energizadas mais próximas sem considerar as restrições do modelo matemático.
- Fazer $LT = \emptyset$.
- Critério de parada: Um dos critérios que for atendido primeiro:
 - a. A solução inicial atende as restrições do modelo
 - b. Número máximo de iterações
 - c. Número máximo de iterações que a solução incumbente permanece inalterada.
- Iteração = 0.

Passo principal:

- i. A solução inicial passa a ser a solução corrente. Neste passo, utiliza-se a estrutura de vizinhança EV-1.
- ii. Se um dos critérios de parada é satisfeito, ir ao passo ix. Caso contrário, ir ao passo iii.
- iii. Aplica-se a EV-1 de forma exaustiva na solução corrente. A cada vizinho gerado, avaliam-se a função objetivo e as restrições do modelo. O melhor vizinho gerado é selecionado e os seus atributos comparados com os atributos armazenados na LT. Ir ao passo iv.
- iv. Se o melhor vizinho não possuir atributos proibidos ou se atender o critério de aspiração a solução corrente e a LT são atualizados. Nesta atualização, a nova solução corrente será a melhor solução vizinha encontrada e os seus atributos são armazenados na LT. Incrementar em uma unidade o número de iteração e voltar ao passo ii. Caso contrário ir ao passo v.
- v. Atualizar a estrutura de vizinhança EV-1 para a estrutura EV-2. Ir ao passo vi.
- vi. Se um dos critérios de parada é satisfeito ir ao passo ix. Caso contrário ir ao passo vii.
- vii. Aplica-se a EV-2 de forma exaustiva na solução corrente. A cada vizinho gerado, avaliam-se a função objetivo e as restrições. O melhor vizinho gerado é selecionado e os seus atributos comparados com os atributos armazenados na LT. Ir ao passo viii.
- viii. Se o melhor vizinho não possuir atributos proibidos ou se atender o critério de aspiração, a solução corrente e a LT são atualizadas. Nesta atualização, a nova solução corrente será a melhor solução vizinha encontrada e os seus atributos são armazenados na LT. Incrementar em uma unidade o número de iteração e voltar ao passo vi. Caso contrário voltar ao passo vii e escolher um vizinho diferente.
- ix. Finalizar a execução do algoritmo

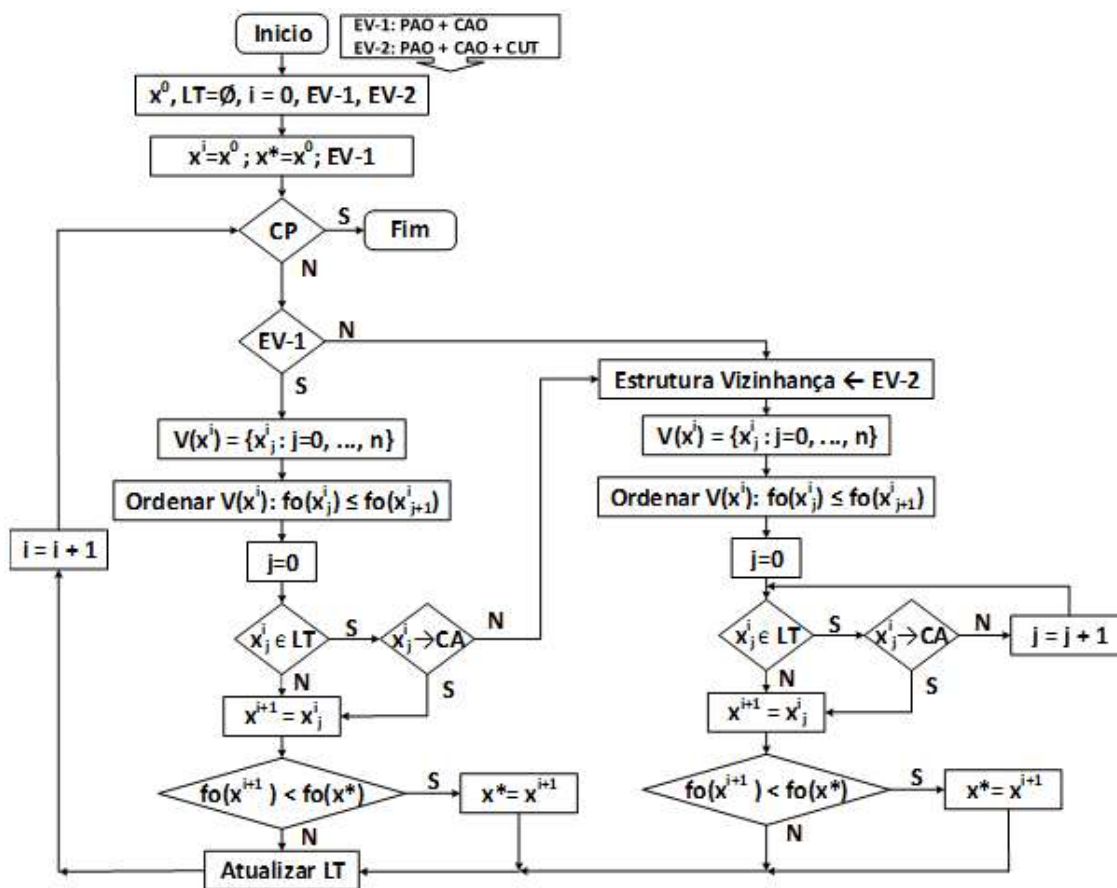
Considerações e observações finais:

- No algoritmo proposto para resolver o problema de restauração, não foi contemplado corte de carga em regiões não afetadas pela falta permanente desde que, mesmo com a possibilidade de melhorar a função objetivo, indicadores de continuidade como o SAIFI seriam degradados.
- Se a estrutura de vizinhança inicial EV-1 gera configurações candidatas que restauram toda a carga sem falha e atingem as restrições de operação, a característica reativa do BTVVR é bloqueada.
- A atualização de vizinhança acontece apenas uma vez no processo iterativo do algoritmo, portanto, a dimensão da LT tem que ser adequadamente escolhida. Uma LT de pequena dimensão pode evitar a ativação do caráter reativo do algoritmo, enquanto que um LT de grande dimensão pode impedir a exploração de regiões atrativas do problema.
- A mudança de vizinhança nem sempre acontece em um ótimo local (mas pode estar tentando voltar a um), desde que a BT aceite soluções de pior qualidade que a solução corrente. Se o algoritmo não consegue restaurar toda a carga que não pertence à região da falta em EV-1, no instante da atualização de vizinhança para EV-2 o algoritmo tem, pelo menos, uma solução de boa qualidade para considerar processos de cortes de cargas e operação ilhada.
- Na etapa de EV-1 do algoritmo, se a condição tabu é ativada, mas o CA é atingido, prioriza-se o CA, adiando o acionar da característica reativa do algoritmo.
- Se na primeira iteração não é possível gerar uma vizinhança utilizando EV-1, a característica reativa é acionada, atualizando a vizinhança EV-1 para EV-2.
- Se alguma configuração candidata consegue restabelecer o fornecimento de toda a carga sem falha utilizando apenas um chaveamento telecomandado atendendo todas as restrições do modelo, a execução do algoritmo termina. Do o ponto de vista da função objetivo não existe melhor solução.
- As escolhas de estruturas de vizinhança foram definidas priorizando a funcionalidade dos mecanismos de exploração (EV-1 diferente de EV-2, não contempla corte de carga) sobre o critério de intensificação/diversificação (o operador CAO gera vizinhos mais diversos que o operador PAO, porém ambos são utilizados exaustivamente em EV-1).

- Resultados apresentados no capítulo 6 utilizando o algoritmo BTVVR proposto mostram que em cenários de faltas permanentes, em que existem configurações que restauram toda a carga sem falha de um sistema, o algoritmo consegue encontrar estas configurações utilizando apenas a EV-1. Porém, a ativação da característica reativa e a inclusão do operador CUT, não impede que o algoritmo possa encontrar configurações com 100% de carga restabelecida, desde que seja contemplada a reenergização das cargas que foram desligadas, ou seja, o operador CUT pode ajudar o algoritmo sair de ótimos locais na exploração de soluções de boa qualidade.

O diagrama de blocos do algoritmo BTVVR para o problema de restauração é apresentado na Figura 25, em que os símbolos são os mesmos da seção 4.2.

Figura 25 – Algoritmo de BTVVR para o problema de restauração



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

5.3 CONTROLE CENTRALIZADO DE EQUIPAMENTOS DE CONTROLE DE TENSÃO

O controle centralizado dos *taps* de capacitores chaveados e reguladores de tensão é proposto neste trabalho para auxiliar o processo de restauração de redes de distribuição.

Como foi abordado no capítulo 2, sistemas com alta penetração de geração distribuída em alimentadores onde existem RTs instalados tem apresentado aumento na frequência de alteração dos *taps* dos RTs, acelerando o desgaste destes equipamentos. Além disto, a condição “*reverse power tap changer run away*” tem aparecido em cenários em que os RTs falham em regular os níveis de tensão em nós predefinidos, atingindo as posições máximas ou mínimas do seus *taps*, devido a uma grande injeção de potência por parte da GD.

Para o problema de restauração propõe-se utilizar o controle centralizado dos *taps* dos RTs e outros equipamentos empregados para efetuar o controle de tensão. Desta forma, a posição final dos *taps* é determinada em função das exigências operacionais do sistema em cada intervalo de tempo preestabelecido. Neste trabalho, a proposta é utilizar o controle de *tap* de capacitores chaveados e reguladores de tensão como parte da técnica de restauração de redes de distribuição.

Para evitar cálculos de fluxo de potência desnecessários durante a execução do algoritmo da BTVVR, e considerando que o problema deve ser resolvido no menor tempo possível, uma análise prévia para cada topologia candidata com limite mínimo de operação violada, é realizada. Nesta análise prévia, os *taps* dos equipamentos de controle de tensão são ajustados nas suas posições máximas e o cálculo de fluxo de potência é executado. Esta análise tem o objetivo de verificar se alguma topologia candidata, embora violando restrições de operação, possa-se tornar factível utilizando o controle dos *taps* dos equipamentos de controle de tensão.

O ajuste na posição máxima dos *taps* de capacitor chaveado e regulador de tensão, embora possa contornar problemas como a violação do limite mínimo da magnitude de tensão em um alimentador, existe cenários em que esta manobra pode elevar os níveis de tensão acima do limite máximo em nós a jusante destes equipamentos. Portanto, uma análise rápida deve ser realizada nos nós de conexão dos BCs chaveados e nos nós finais de RTs que, com grande probabilidade, são os nós com maior tensão nas suas vizinhanças. Nesta análise os *taps* dos equipamentos de controle de tensão serão modificados até atingirem valores adequados de tensão nos nós sob análise, priorizando os RTs em relação aos BCs chaveados, uma vez que os primeiros têm influência sobre uma região maior no alimentador. Além disto, se em um alimentador encontra-se mais de um equipamento de controle de tensão, a análise

priorizará aqueles mais próximos à subestação, uma vez que a influência deles sobre a magnitude de tensão do alimentador é, intuitivamente, maior.

A análise apresentada é focada na tensão, mas se a configuração candidata é armazenada ou não como aspirante à solução do problema, depende de sua factibilidade. Para alimentadores com equipamentos de controle de tensão, o procedimento de análise é o detalhado a seguir.

- i. Se algum dos limites de operação do alimentador é violado, ajustar os *taps* dos equipamentos de controle de tensão nas suas posições máximas. Ir ao passo ii.
- ii. Verificar se o limite mínimo de tensão no alimentador está sendo atendido. Caso este limite seja factível ir ao passo iii, caso contrário descartar a configuração candidata e ir ao passo x.
- iii. Verificar se o limite máximo de tensão no alimentador está sendo atendido. Caso este limite seja factível ao passo ix, caso contrário ir ao passo iv.
- iv. Localizar o RT no alimentador em análise e ir ao passo v. Caso contrário ir ao passo vii.
- v. Verificar se o nó final do RT viola o limite máximo de tensão. Se for o caso, reduzir em uma unidade a posição do seu *tap* de forma contínua até que a tensão no nó final esteja com valores factíveis de operação. Se tiver mais de um regulador de tensão, a análise é realizada começando pelo regulador de tensão mais próximo à subestação. Ir ao passo vi.
- vi. Verificar se os limites mínimo e máximo de tensão são factíveis. Caso sejam factíveis ir ao passo ix. No caso em que o limite mínimo de tensão esteja sendo violado, descartar a configuração candidata e ir ao passo x. No caso que só o limite máximo de tensão esteja sendo violada, ir ao passo vii.
- vii. Localizar o BC chaveado no alimentador em análise e ir ao passo viii. Caso contrário ir ao passo ix.
- viii. Verificar se o nó de instalação do BC chaveado viola o limite máximo de tensão. Se for o caso, reduzir em uma unidade o módulo do BC de forma contínua até que a tensão no nó de instalação esteja com valores adequados de operação. Se tiver mais de um capacitor chaveado, a análise é feita começando pelo capacitor mais próximo da subestação. Ir ao passo ix.
- ix. Verificar se todos os limites de operação estão sendo atendidos e armazenar a configuração candidata, caso contrário, descartar a configuração candidata. Ir ao passo x.
- x. Fim da análise.

5.4 HEURÍSTICA PARA SEQUÊNCIA DE CHAVEAMENTO

Nesta seção, um algoritmo heurístico é proposto para obter a sequência de chaveamentos como parte da metodologia de restauração em redes de distribuição. Em um cenário de falta permanente, a sequência de chaveamentos tem por objetivo minimizar o valor da energia não suprida por meio da reconexão de seções de carga saudáveis no sistema.

A solução que deve fornecer um algoritmo que visa resolver o problema de restauração é a ordem em que as chaves do sistema devem ser manobradas para levar a rede da configuração pós-falta até a configuração final no estado restaurativo. Esta ordem deve cumprir com os seguintes requisitos:

- Evitar a geração de configurações intermediárias ineficazes.
- O tempo total necessário para efetuar todos os chaveamentos deve ser menor que o tempo de reparo.
- Considerar todos os equipamentos de controle existentes no sistema utilizados pelo algoritmo de restauração para minimizar os efeitos da falta permanente.
- Melhorar os índices de continuidade do sistema.
- Nos cenários que seja necessário o remanejamento de cargas energizadas (cargas não afetadas pela falta permanente), o algoritmo que gera a sequência de chaveamento deve considerar a reconexão destas cargas com prioridade.
- A sequência de chaveamento deve ser gerada no menor tempo possível para aplicações em tempo real.

Em um evento de falta permanente, a quantidade de energia não suprida é um dos índices de continuidade que deve ser otimizado pelo algoritmo que gera a sequência de chaveamento. Para atender este requisito, neste trabalho propõe-se utilizar o conceito de grupos de chaveamentos. Um grupo de chaveamento é definido como um conjunto de chaves que são manobradas de forma sequencial e independente, e que restauram ou reconfiguram uma região do sistema.

Esta seção está organizada da seguinte forma: na seção 5.4.1 é apresentada a definição de grupos de chaveamento de restauração e reconfiguração; na seção 5.4.2 apresenta-se a fórmula para calcular a ENS considerando a sua dependência com o tempo de reparo da falha; na seção 5.4.3 analisa-se a influência da ordem em que os grupos de chaveamento são executados no valor da ENS; na seção 5.4.4 propõe-se uma heurística para encontrar a ordem

ótima em que os grupos de chaveamento devem ser executados para minimizar a ENS; na seção 5.4.5 o conceito de super-grupo é apresentado; e, finalmente, na seção 5.4.6 são apresentadas as considerações finais sobre a sequência de chaveamento.

5.4.1 Os grupos de chaveamento

Os grupos de chaveamento são definidos como conjuntos de chaves que restauram ou reconfiguram uma região da rede sem violar a restrição de radialidade do sistema de distribuição.

Existem duas classes de grupos de chaveamento: os grupos de chaveamento de restauração ou simplesmente grupos de restauração (Grupos-R), e os grupos de chaveamento de reconfiguração ou simplesmente grupos de reconfiguração (Grupos-RCF). Os Grupos-R reestabelecem o fornecimento de energia em seções de carga desenergizadas. Os Grupos-RCF realocam seções de cargas energizadas em alimentadores adjacentes. Nesta seção, apresenta-se uma técnica heurística para identificar cada grupo de chaveamento e as chaves que o compõem.

5.4.1.1 Grupos de restauração

Após a identificação e isolamento da falha permanente em um sistema de distribuição, a única forma de restaurar cargas é fechando chaves. Porém, apenas fechar uma chave não garante que as restrições de operação, como a radialidade da rede, serão respeitadas. Normalmente, para manter as restrições de operação factíveis, o fechamento de uma chave deve ser antecedido pela abertura de uma ou várias chaves. O conjunto formado por uma chave que restaura carga e as chaves que devem ser abertas para manter a radialidade no sistema é chamado como grupo de restauração.

O algoritmo para identificar os Grupo-R é composto dos seguintes passos:

- i.* Identificar as chaves que mudam de estado (aberto/fechado) entre a configuração pós-falta (define-se como configuração pós-falta a topologia da rede em que as chaves foram abertas para isolar a falta e manter a integridade física do sistema) e a configuração final. Ir ao passo *ii.*
- ii.* Selecionar uma chave com estado fechado na configuração final e com, pelo menos, um extremo desenergizado na configuração pós-falta. Criar um novo Grupo-R com a chave selecionada e ir ao passo *iii.* Caso contrário ir ao passo *iv.*

iii. Com o sistema na configuração final, montar uma sub-árvore com nó raiz no extremo com maior profundidade (ver capítulo 2: representação nó-profundidade) da chave selecionada no passo *ii*. As chaves que limitam a sub-árvore são as chaves identificadas no passo *i*, porém, apenas as chaves no estado aberto na configuração final são adicionadas ao Grupo-R. Voltar ao passo *ii* e selecionar uma chave diferente.

iv. Fim do algoritmo.

Para implementar os chaveamentos do Grupo-R no sistema de distribuição, as manobras devem começar com a última chave adicionada no grupo, e continuar efetuando os chaveamentos de forma ascendente até finalizar com a primeira chave do grupo.

Para visualizar os passos acima descritos, seja o exemplo 1. O sistema de 53 nós é apresentado na Figura 26 em estado normal, em que as seções em cor azul representam as seções de subestação, as seções em cinza representam seções de carga, as linhas pretas e contínuas representam as chaves normalmente fechadas e, finalmente, as linhas roxas descontínuas representam as chaves normalmente abertas.

Após uma falta permanente na seção 11, as seções 12, 45, 44, 38, 39, 32, 33, 34, 35 e 36, perdem fornecimento de energia. Na Figura 27 apresenta-se o sistema na configuração pós-falta em que as seções afetadas pela falha aparecem na cor vermelha e as linhas vermelhas e descontínuas representam os chaveamentos necessários para isolar a seção em falta. Na Figura 28 é apresentado o sistema na configuração final, em que as seções com cor verde representam as seções de carga restauradas, as linhas vermelhas e descontínuas representam as chaves que são abertas e as linhas azuis e contínuas representam as chaves que são fechadas para colocar o sistema no estado restaurativo.

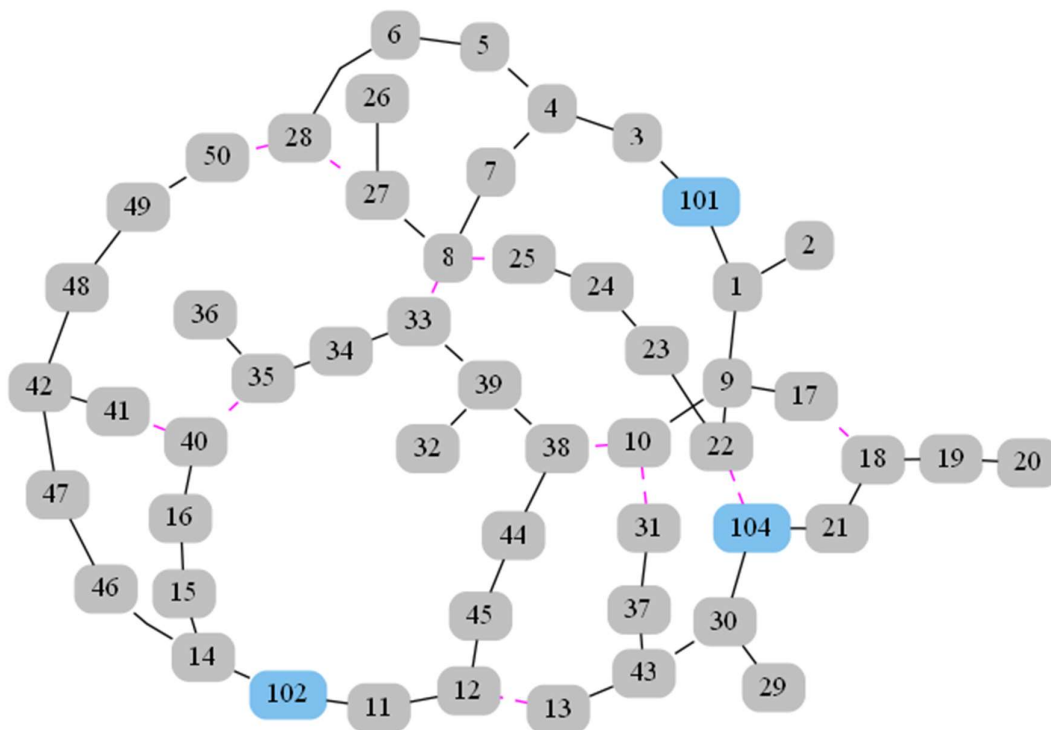
Na Tabela 13 apresentam-se os chaveamentos necessários para obter a configuração final no sistema de 53 nós após a falta permanente na seção 11.

Tabela 13 – Listas de chaveamentos para obter a configuração final no sistema de 53 nós

Estado na configuração final	Extremos da chave
Abrir	35 – 34
	39 – 38
	45 – 12
Fechar	8 – 33
	10 – 38
	13 – 12
	35 – 40

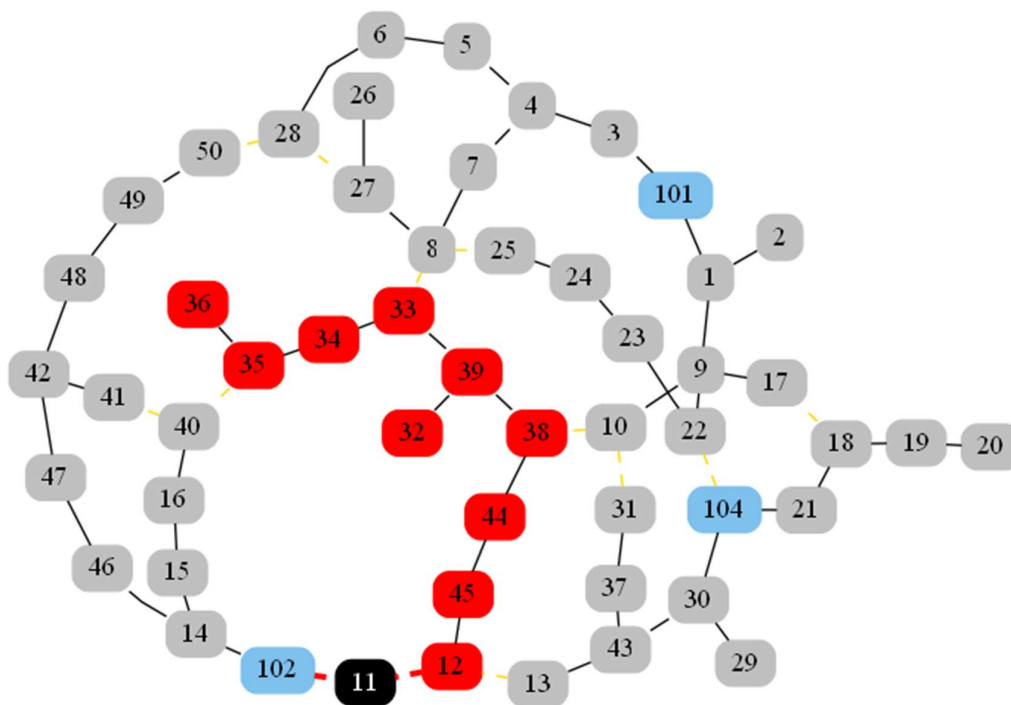
Fonte: próprio autor

Figura 26 – Configuração inicial do sistema de 53 nós



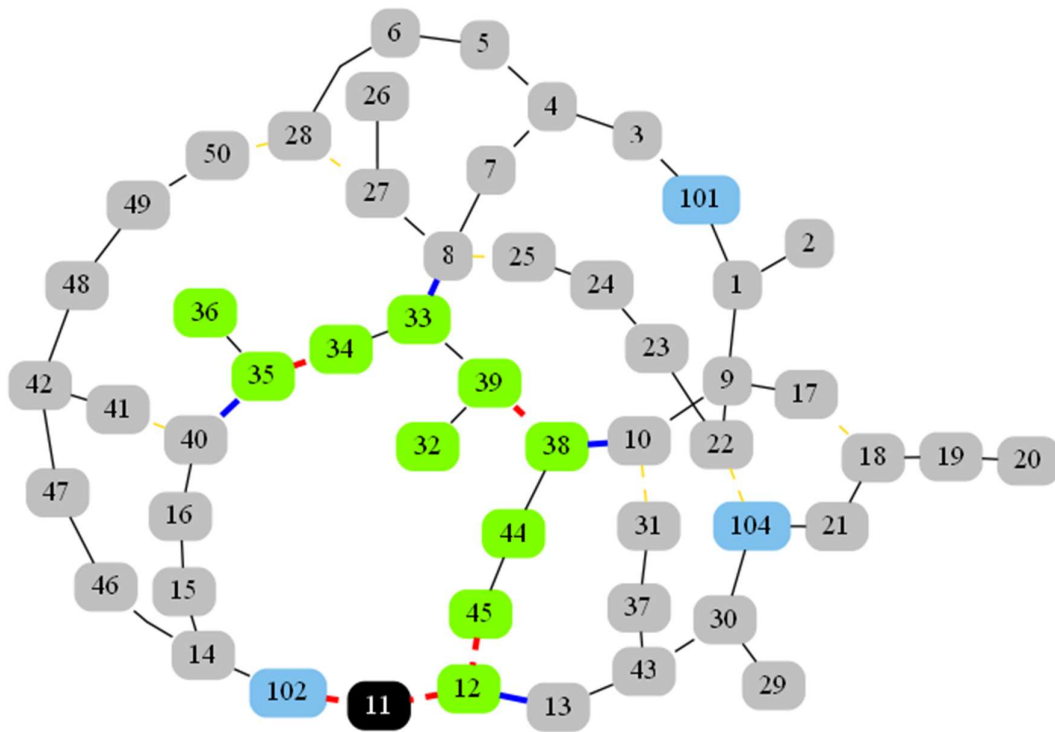
Fonte: próprio autor

Figura 27 – Configuração pós-falta do sistema com falta na seção 11



Fonte: próprio autor

Figura 28 – Configuração final do sistema com falta na seção 11



Fonte: próprio autor

Na Tabela 14, apresentam-se os Grupos-R identificados com os passos descritos nesta seção, em que são definidos quatro Grupos-R

Tabela 14 – Grupos de chaveamento no sistema de 53 nós após uma falta na seção 11

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

Fonte: próprio autor

A chave entre as seções 12 – 11 e a chave entre as seções 11 - 102 isolam a falta permanente na seção 11, e não fazem parte do algoritmo de restabelecimento, uma vez que o problema de restauração começa após a localização e ilhamento da região em falta.

Para implementar o Grupo-R #1 no sistema pós-falta, a sequência de manobras começa com a implementação da última chave adicionada no grupo, a abertura da chave entre as seções 39 – 38. O passo seguinte é a abertura da chave entre as seções 35 – 34 e finaliza com o fechamento da chave entre as seções 8 – 33, reconectando as cargas das seções 32, 33,

34 e 39 no sistema de distribuição. A seguir, os chaveamentos dos Grupo R #2, R #3 e R#4 são implementados seguindo a mesma lógica até finalizar a restauração do sistema. Os Grupos-R são independentes entre si e podem ser executados em qualquer ordem.

Na Tabela 14, verifica-se que cada Grupo-R possui apenas uma chave fechada e uma ou várias chaves abertas. Também é possível observar que todas as chaves fechadas de todos os grupos são diferentes, porém, as chaves abertas podem fazer parte de um ou vários grupos. Esta característica é explicada pelo fato que chaveamentos iguais podem estar compondo grupos de chaveamento diferentes. Além disto, a implementação de um grupo de chaveamento pode reduzir o número de chaveamentos do próximo grupo. No exemplo apresentado, a implementação do Grupo-R #1 reduz o número de chaveamentos do Grupo-R #2 em um chaveamento (chave entre as seções 39 – 38), e da mesma forma para o Grupo-R #4 (chave entre as seções 35 – 34).

Os Grupos-R dividem o processo restaurativo em pequenos grupos e transformam um problema complicado, como é o problema de restabelecimento, em uma análise simples de tomada de decisão. Porém, dentro do processo restaurativo, existem também grupos de chaves que não têm por função reconectar carga, mas sim, realocar carga energizada. Este processo de realocação permite aumentar a possibilidade de reconexão de cargas desligadas e reduzir, conseqüentemente, o valor de energia não suprida. A realocação de carga é realizada pelos grupos de reconfiguração, detalhados na seção 5.4.1.2.

5.4.1.2 Grupos de reconfiguração

Os Grupos-RCF são conjuntos formados por pares de chaves que realocam cargas energizadas em alimentadores adjacentes. Na prática, a transferência de cargas é realizada para liberar capacidade de fornecimento nos alimentadores que não foram afetados pela falta, e desta forma, poder aumentar a quantidade de carga reenergizada após uma falta permanente. Um Grupo-RCF é formado por duas chaves, uma primeira chave que muda seu estado inicial de fechado para aberto, e uma segunda chave que realiza o procedimento contrário.

Usualmente as empresas distribuidoras realizam o processo de transferência de carga energizada de forma imediata, ou seja, os chaveamentos de abertura e fechamento são efetuados de maneira sequencial. Realizar estas manobras de forma consecutiva evita a possibilidade de piorar os valores de indicadores de continuidade vinculados com a frequência de desligamento dos usuários, como, por exemplo, o FEC. O FEC é um indicador de frequência de desligamento vinculado à quantidade de vezes que um usuário experimenta a perda de fornecimento de energia por um período mínimo contínuo em determinada janela de

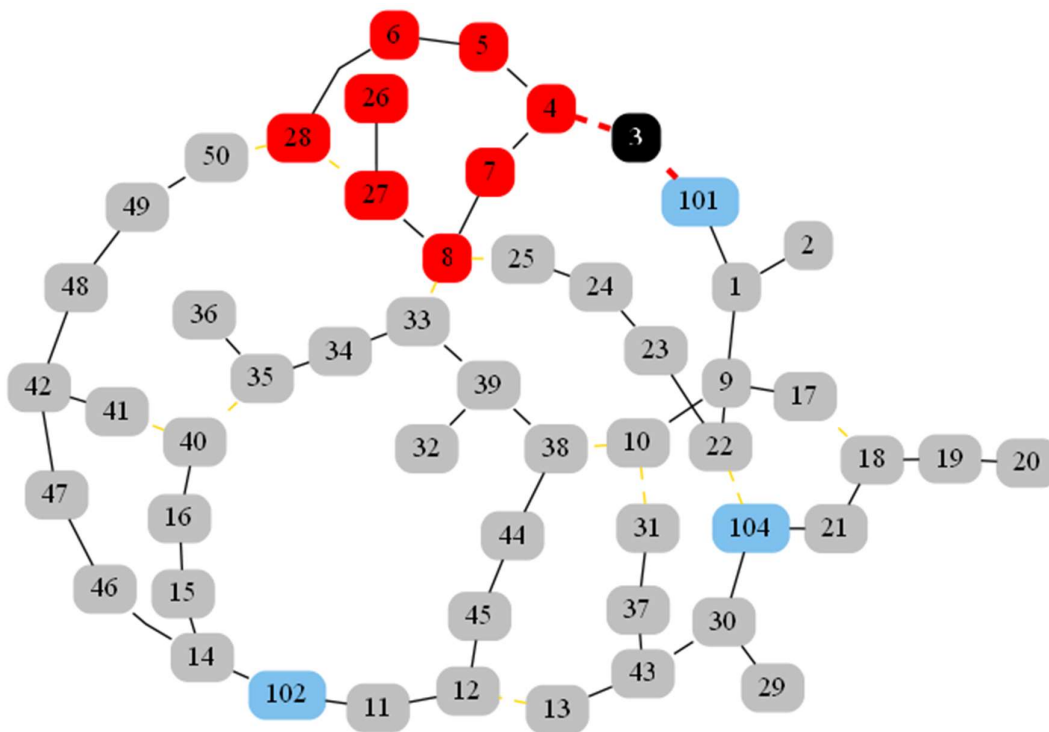
tempo. No Brasil, o valor do FEC aumenta quando os usuários sofrem uma perda de fornecimento de energia elétrica por um intervalo mínimo contínuo superior a 3 minutos (ANEEL, 2010). Neste trabalho, é considerado que a manobra de fechamento da chave é realizada imediatamente à abertura da chave do Grupo-RCF.

O algoritmo para identificar um grupo de chaves de reconfiguração, é composto dos seguintes passos:

- i.* Identificar as chaves que mudam de estado entre a configuração pós-falta e a configuração final. Ir ao passo *ii*.
- ii.* Selecionar uma chave com estado fechado na configuração final com ambos os extremos energizados na configuração pós-falta. Criar um novo Grupo-RCF com a chave selecionada e ir ao passo *iii*. Caso contrário, ou seja, não foi encontrada uma chave no estado fechado com ambos os extremos energizados, ir ao passo *iv*.
- iii.* Com o sistema na configuração final, montar uma sub-árvore com o nó raiz no extremo com maior profundidade da chave selecionada no passo *ii*. As chaves que limitam a sub-árvore são as chaves identificadas no passo *i*, porém, apenas as chaves no estado aberto na configuração final são adicionadas ao Grupo-RCF. Voltar ao passo *ii* e selecionar uma chave diferente.
- iv.* Finalizar o algoritmo.

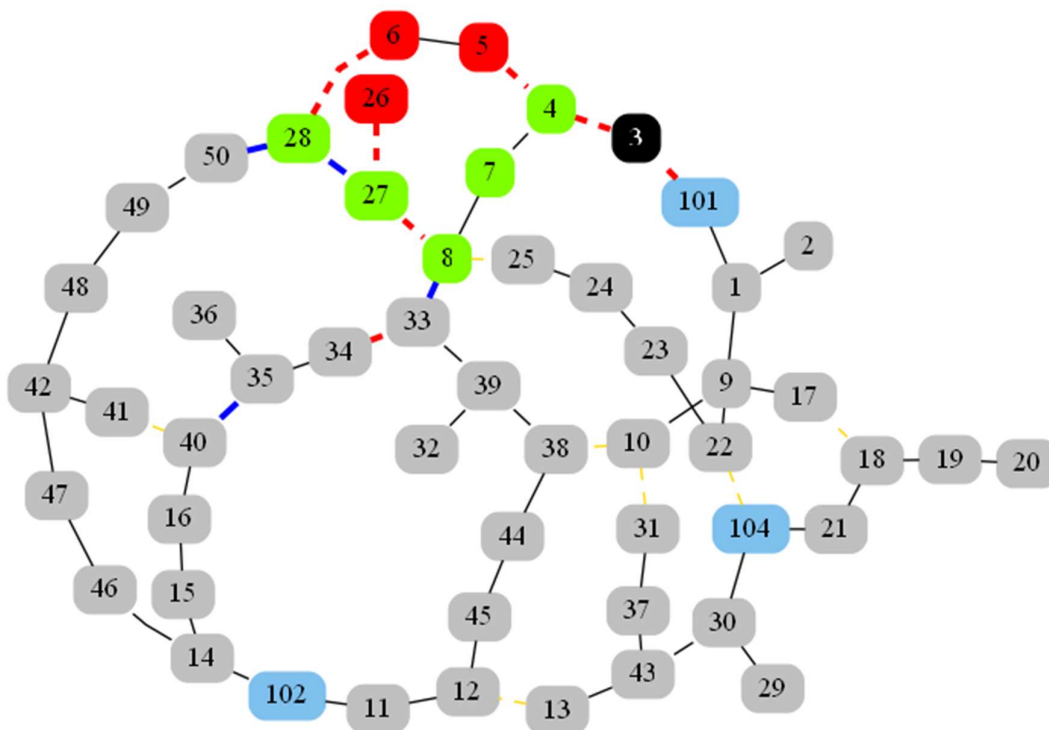
Para ilustrar os passos deste algoritmo, seja o exemplo 2. Na Figura 26 é apresentado o diagrama unifilar do sistema de 53 nós no estado inicial. Uma falta permanente ocorre na seção 3, e as chaves com extremos nas seções 101 – 3 e 4 – 3 são abertas para isolar a seção com falha e gerar a configuração pós-falta do sistema (Figura 29). As seções afetadas diretamente pela falta permanente são as seções 4, 5, 6, 7, 8, 26, 27 e 28, que são representadas na cor vermelha na Figura 29. Na Figura 30, a solução final do algoritmo de restauração é apresentada. As seções em cor verde representam as seções restauradas, enquanto que as seções em cor vermelha representam as seções com corte de carga. As linhas azuis e contínuas representam as chaves fechadas e as linhas vermelhas e descontínuas representam as chaves abertas necessárias para gerar a configuração final no estado restaurativo.

Figura 29 – Configuração pós-falta do sistema com falta na seção 3



Fonte: próprio autor

Figura 30 – Configuração final do sistema com falta na seção 3



Fonte: próprio autor

Na Tabela 15 apresentam-se os chaveamentos necessários para obter a configuração final no sistema de 53 nós após a falta permanente na seção 3. Utilizando os passos descritos nas seções 5.4.1.1 e 5.4.1.2 deste capítulo, é possível formar os Grupos-R e Grupos-RCF que fazem parte da sequência de chaveamento, os quais estão detalhados na Tabela 16.

Tabela 15 – Listas de chaveamentos para obter a configuração final no sistema de 53 nós

Estado na configuração final	Extremos da chave
Abrir	27 – 8
	5 – 4
	28 – 6
	27 – 26
	34 – 33
Fechar	8 – 33
	28 – 50
	28 – 27
	35 – 40

Fonte: próprio autor

Tabela 16 – Grupos de chaveamento no sistema de 53 nós com falta na seção 3

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

Fonte: próprio autor

A aplicação do Grupo-R #1 na rede, permite reenergizar um bloco grande de carga no sistema (2.772 kW). Porém, quando o Grupo-R #1 é implementado, a corrente máxima na chave entre as seções 33 – 39 é violada. A corrente máxima pela chave é 250 A, no entanto, a corrente aumenta para 312,20 A, tornando a configuração ineficaz. Para possibilitar a implementação do Grupo-R #1, o Grupo-RCF #1 deve ser executado com antecedência. Se os chaveamentos do Grupo-RCF #1 e Grupo-R #1 são executados sequencialmente, a corrente pela chave 33 – 39 atinge o valor de 230,01 A, que é inferior à corrente máxima da chave, evitando uma etapa intermediária ineficaz.

Para finalizar a ilustração do conceito de Grupos-RCF, seja o exemplo 3. O diagrama unifilar de um sistema de 10 nós é apresentado na Figura 31, em que cada nó é considerado como sendo uma seção. O sistema contém 4 alimentadores com início nas seções 1, 4, 8 e 10,

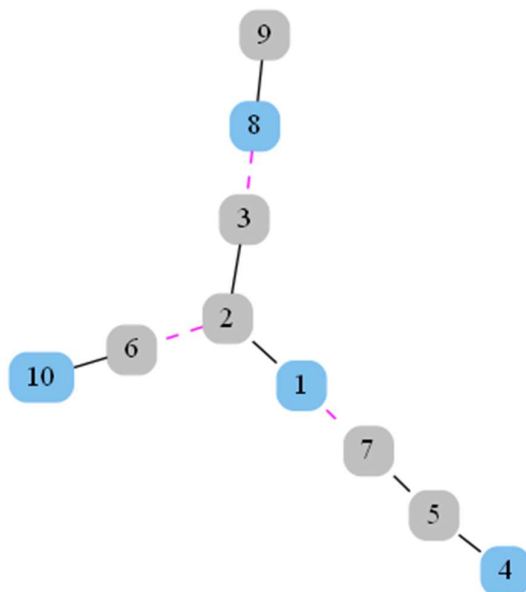
que são representadas na cor azul. As linhas pretas e contínuas são chaves normalmente fechadas e as chaves roxas e descontínuas representam chaves normalmente abertas.

Na Figura 32, considera-se a incidência de uma falta na seção 5, sendo necessários dois chaveamentos para isolar a falta: a abertura das chaves com extremos nas seções 5 – 4 e 5 – 7, resultando na desconexão do nó 7. Na Figura 33 é assumido que para reconectar a seção 7 no sistema, as cargas das seções 2 e 3 devem ser remanejadas para alimentadores adjacentes.

Na Tabela 17 apresentam-se os grupos de chaveamentos, em que o Grupo-RCF #1, apresenta 3 chaveamentos, a abertura das chaves com os extremos nas seções 2 – 3 e 2 – 1, e o fechamento da chave entre as seções 6 – 2.

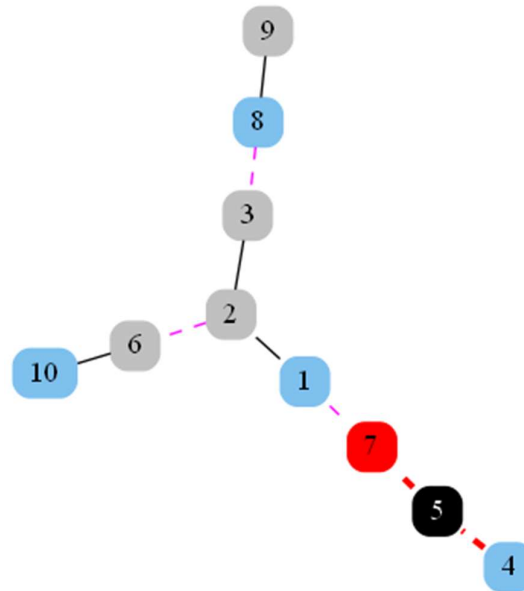
Como ressaltado anteriormente, um Grupo-RCF deve ser formado por apenas duas chaves, uma chave de abertura e uma chave de fechamento. Portanto, se um Grupo-RCF possui mais do que 2 chaves, o grupo original deve ser dividido em grupos menores que possuam apenas duas chaves, das quais uma é a chave de fechamento do grupo original. Na Tabela 18 os novos grupos de chaves são apresentados, em que os Grupos-RCF são compostos por apenas dois chaveamentos.

Figura 31 – Configuração inicial do sistema de 10 nós



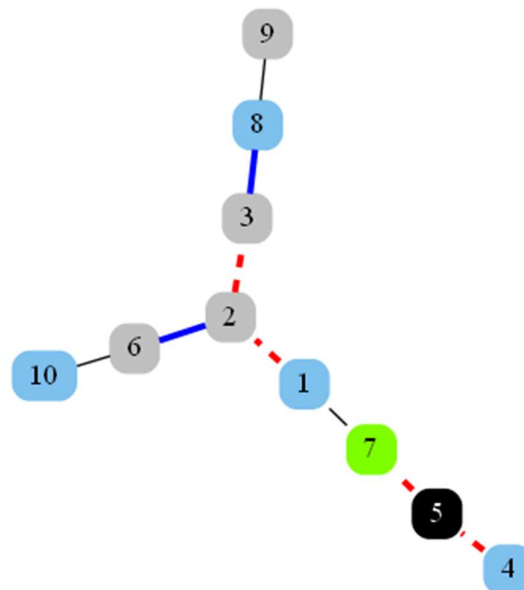
Fonte: próprio autor

Figura 32 – Configuração pós-falta do sistema com falta na seção 5



Fonte: próprio autor

Figura 33 – Configuração final do sistema com falta na seção 5



Fonte: próprio autor

Tabela 17 – Grupos de chaveamento no sistema de 10 nós

Grupo-R #1		Grupo-RCF #1		Grupo-RCF #2	
Estado	Chave	Estado	Chave	Estado	Chave
Fechada	1 – 7	Fechada	6 – 2	Fechada	3 – 8
		Aberta	2 – 3	Aberta	2 – 3
		Aberta	2 – 1		

Fonte: próprio autor

Tabela 18 – Grupos de chaveamento no sistema de 10 nós com falta na seção 5

Grupo-R #1		Grupo-RCF #1		Grupo-RCF #2		Grupo-RCF #3	
Estado	Chave	Estado	Chave	Estado	Chave	Estado	Chave
Fechada	1 – 7	Fechada	6 – 2	Fechada	6 – 2	Fechada	3 – 8
		Aberta	2 – 1	Aberta	2 – 3	Aberta	2 – 3

Fonte: próprio autor

Os Grupos-RCF quando divididos em grupos de chaveamento menores, a combinação de Grupos-RCF deve ser avaliada antes e depois da realização das operações de chaveamentos destes grupos. Esta avaliação consiste em um algoritmo *breadth first search* (busca em largura) para verificar que os mesmos nós permanecem conectados e nenhum laço tenha sido criado. No exemplo 3, a combinação dos Grupo-RCF #1, #2 e #3 é permitida porque os mesmos nós possuem fornecimento de energia antes e depois da execução dos chaveamentos correspondentes na configuração pós-falta. Da mesma forma, a combinação dos Grupo-RCF #1 e #3, ou a aplicação isolada do Grupo-RCF #1 ou #3 é permitida. Porém, a aplicação de combinação entre os Grupos-RCF #1 e #2, Grupos-RCF #2 e #3, ou da aplicação isolada do Grupo-RCF #2, não é permitida porque desenergiza de forma intencional o nó 3, ou cria um laço não desejado entre os nós 10 e 1.

Na prática, muitas empresas distribuidoras efetuam a operação de fechamento antes da operação de abertura dos Grupos-RCF, gerando temporariamente um laço no sistema. Este laço é criado para evitar a desconexão desnecessária de cargas energizadas, ainda que por um período curto de tempo. Para criar este laço temporário é importante o conhecimento e experiência do operador do sistema.

Desta forma existem diferentes condições técnicas que devem ser cumpridas para criar um laço temporário em sistemas de distribuição (CHEN *et al.*, 2004), entre as quais se destacam as seguintes:

- O laço deve ser formado entre os nós do mesmo alimentador.
- O laço deve ser formado entre alimentadores conectados no mesmo transformador da subestação.
- O laço deve ser formado entre alimentadores conectados em transformadores diferentes, contudo, com as mesmas características técnicas e operacionais.

Neste trabalho, considera-se que no momento da aplicação dos Grupos-RCF, o chaveamento de abertura é realizado antes que a operação de fechamento.

Em geral, a execução dos chaveamentos de um Grupos-RCF permite tornar factível a reconexão de grandes grupos de cargas no sistema e, conseqüentemente, minimizar o valor de energia não suprida.

Portanto, a definição de uma seqüência de chaveamento pode ser estabelecida como a ordem ótima em que grupos de chaveamento devem ser executados com a finalidade de minimizar o valor de ENS de um sistema em estado de falta permanente.

Nas próximas seções são apresentados os conceitos necessários para estabelecer a ordem ótima em que os grupos de chaveamentos devem ser realizados para minimizar o valor da ENS. Como primeiro passo, na seção 5.4.2 apresenta-se como calcular o valor da ENS considerando o tempo de reparo de falhas no sistema.

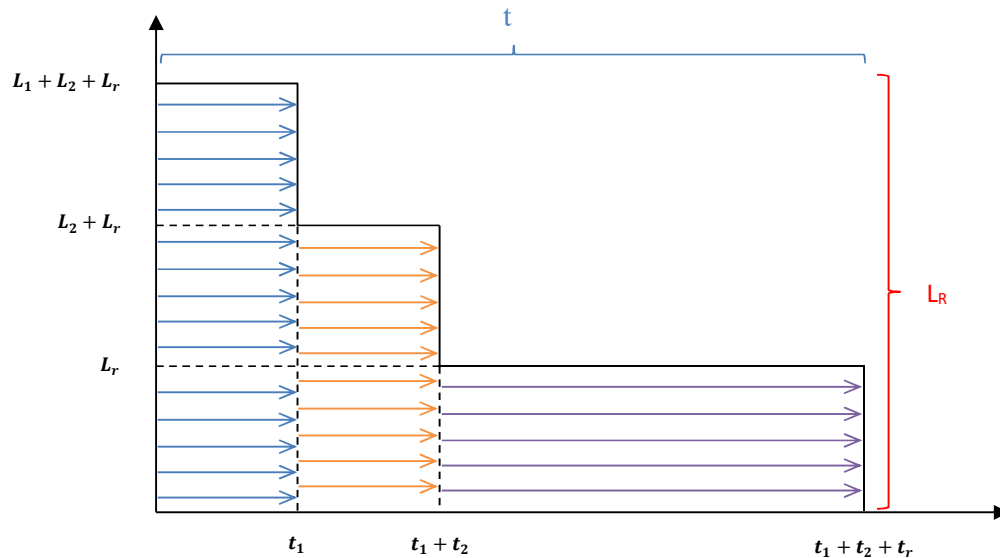
5.4.2 Cálculo da energia não suprida

A ENS pode ser definida como a quantidade de energia que deixou de ser consumida em decorrência de uma interrupção, e calculada como o valor da área sob a curva que descreve a quantidade de carga não suprida pelo tempo, do início do processo restaurativo até o tempo de reparo da falha.

Na Figura 34 apresenta-se o comportamento da energia não fornecida pelo tempo para um determinado cenário de falta permanente. Neste cenário, dois blocos de carga L_1 e L_2 são restaurados utilizando dois Grupos-R, que requerem os tempos t_1 e t_2 para serem implementados, respectivamente.

A equação (25) descreve o cálculo da ENS, enquanto que as equações (26) e (27) descrevem as relações entre os tempos e as cargas, respectivamente.

Figura 34 – Cálculo da energia não suprida



Fonte: próprio autor

$$ENS = \sum_{i=1}^r \left(t_i \cdot \sum_{j=i}^r L_j \right) \quad (25)$$

$$t_R = t_1 + t_2 + t_r = \sum_{i=1}^r t_i \quad (26)$$

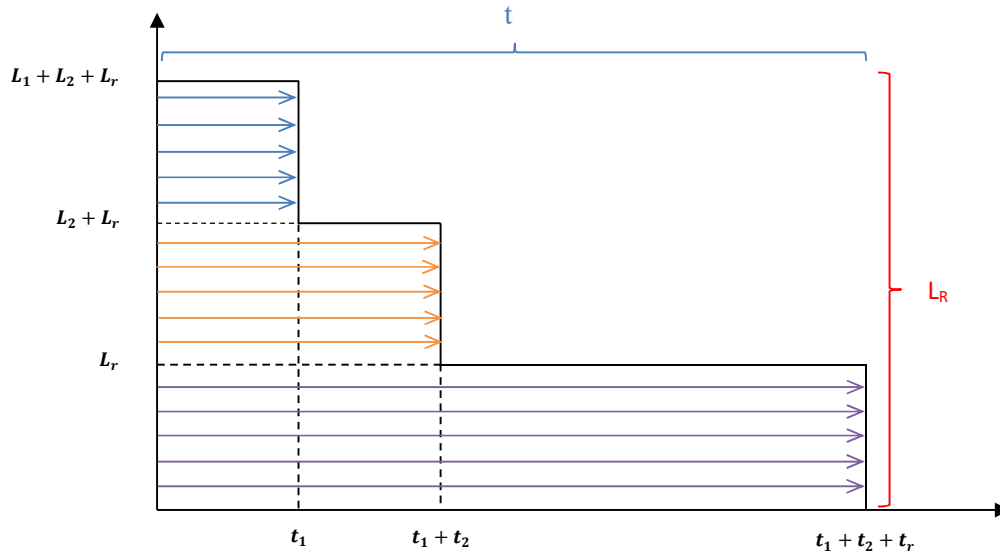
$$L_R = L_1 + L_2 + L_r = \sum_{j=1}^r L_j \quad (27)$$

Em que:

 L_1 : Bloco de carga 1; L_2 : Bloco de carga 2; L_r : Carga não restaurada após realizado o último chaveamento; L_R : Carga total desligada após a falha permanente; t_1 : Tempo necessário para restaurar o bloco de carga L_1 ; t_2 : Tempo necessário para restaurar o bloco de carga L_2 ; t_r : Diferença entre o tempo de reparo da falha e o instante em que o último chaveamento é realizado; t_R : Tempo de reparo da falha.

Uma forma alternativa para calcular a ENS é representada na Figura 35 com a equação (28).

Figura 35 – Cálculo da energia não suprida



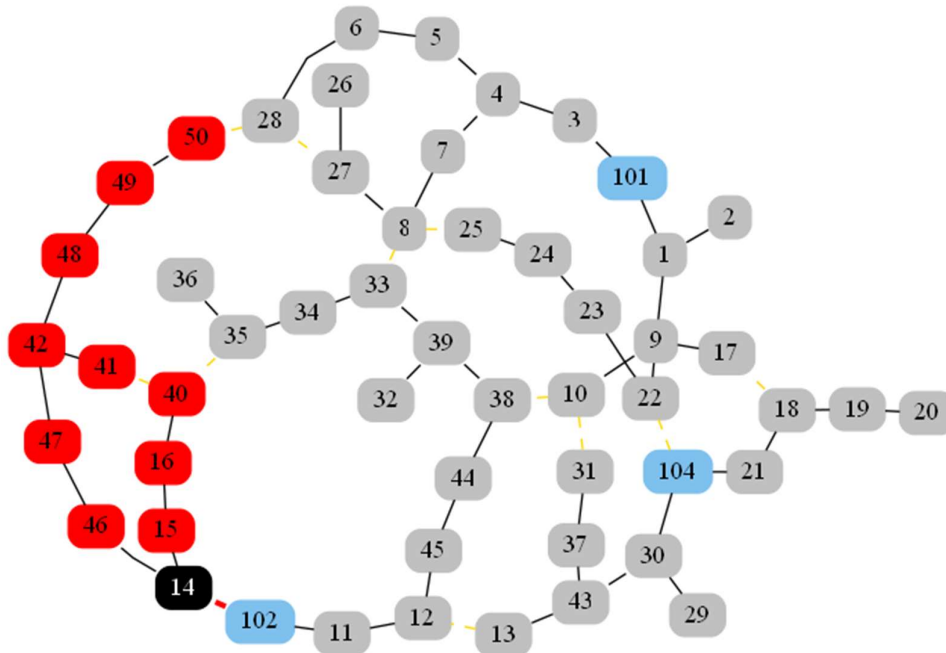
Fonte: próprio autor

$$ENS = \sum_{j=1}^r \left(L_j \cdot \sum_{i=1}^j t_i \right) \quad (28)$$

Quando a função objetivo é dependente da quantidade de carga não fornecida e o número de chaveamentos, e a rede for composta por apenas chaves manuais, ou chaves manuais e chaves telecomandadas (como acontece em muitos sistemas de distribuição atuais), o tempo para realização de todos os chaveamentos pode exceder o tempo de reparo. Para visualizar esta afirmação, seja o exemplo 4 a seguir. Neste exemplo, o sistema de 53 nós possui apenas chaves manuais e está sujeito a uma falta permanente na seção 14. Na Figura 26, o sistema de 53 encontra-se em estado de operação normal, na Figura 36 a falta permanente foi isolada e o sistema encontra-se na configuração pós-falta. Finalmente, na Figura 37 apresenta-se a configuração final, em que o algoritmo de restauração indica cinco chaveamentos. Na Tabela 19 apresenta-se a sequência de chaveamento sem considerar o tempo de reparo na função objetivo. Se for assumido um tempo médio de 35 minutos para cada chaveamento manual e considerando um tempo de reparo médio de duas horas, o tempo de execução de todos os chaveamentos ultrapassa o tempo de reparo em 55 minutos. Baseado

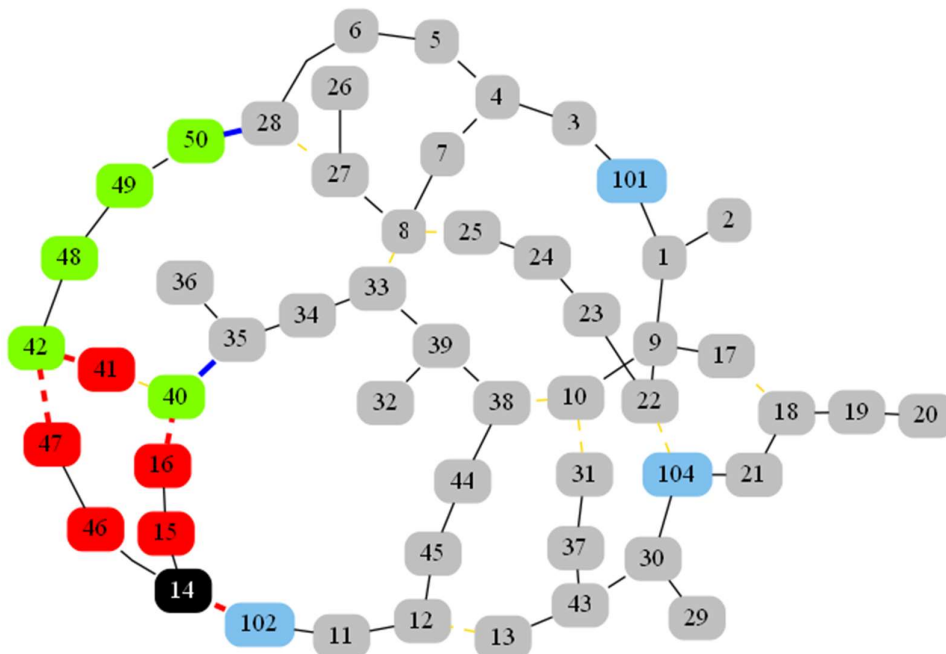
nesta lógica, a formulação do cálculo da energia não suprida deve considerar o tempo de reparo.

Figura 36 – Configuração pós-falta do sistema com falta na seção 14



Fonte: próprio autor

Figura 37 – Configuração final do sistema com falta na seção 14



Fonte: próprio autor

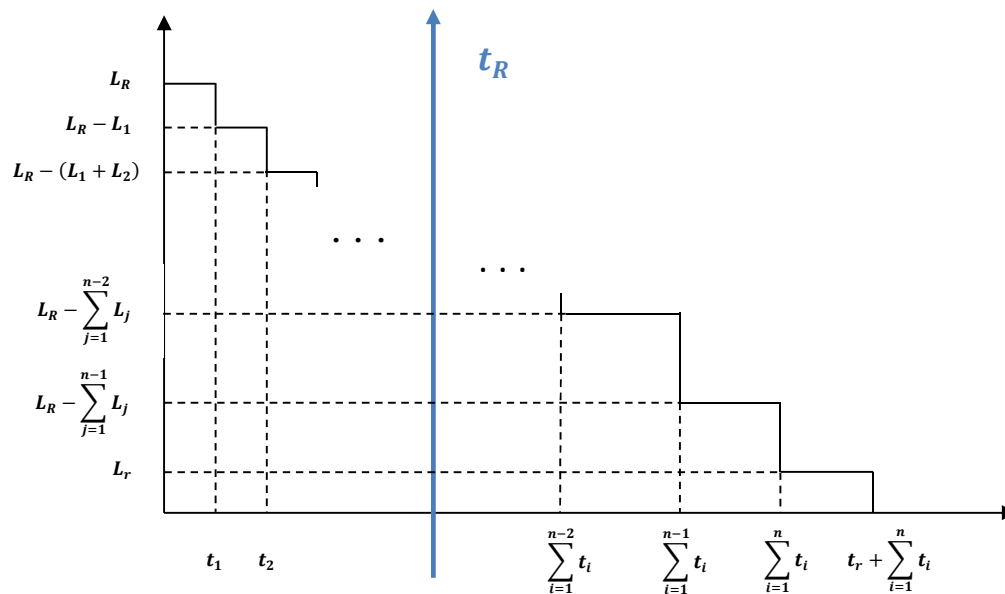
Tabela 19 – Sequência de chaveamento não considerando o tempo de reparo

Estágio	Ação	Chave
1	Abrir	47 – 42
2	Abrir	42 – 41
3	Fechar	28 – 50
4	Abrir	16 – 40
5	Fechar	35 – 40

Fonte: próprio autor

Neste trabalho, propõe-se a equação (29) que descreve o cálculo da ENS da Figura 38, considerando que o tempo total para efetuar os chaveamentos pode ser menor ou maior ao tempo de reparo da falha.

Figura 38 – Representação do cálculo da ENS considerando o tempo de reparo



Fonte: próprio autor

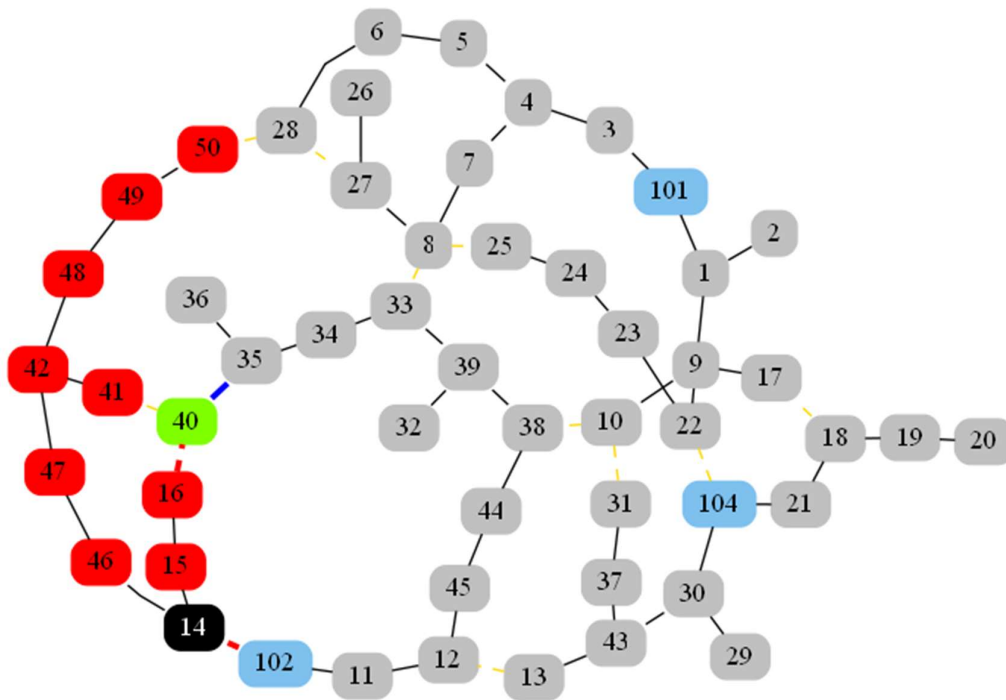
$$ENS = \sum_{j=1}^r \left(L_j \cdot \min \left\{ \left(\sum_{i=1}^j t_i \right), t_R \right\} \right) \quad (29)$$

Em que:

- L_1 : Bloco de carga 1;
 L_2 : Bloco de carga 2;
 L_j : Bloco de carga j;
 L_r : Carga não restaurada após realizado o último chaveamento;
 L_R : Carga total desligada após a falta permanente;
 t_1 : Tempo necessário para restaurar o bloco de carga L_1 ;
 t_2 : Tempo necessário para restaurar o bloco de carga L_2 ;
 t_i : Tempo necessário para restaurar o bloco de carga L_i ;
 t_r : Diferença entre o tempo de reparo da falha e o instante em que o último chaveamento é realizado;
 t_R : Tempo de reparo da falha.

Para o exemplo em análise, considerando a inclusão do tempo de reparo na função objetivo do problema de restauração, a nova configuração final é apresentada na Figura 39 e a sequência de chaveamento é atualizada na Tabela 20.

Figura 39 – Configuração final do sistema com falta na seção 14 considerando tempo de reparo da falha



Fonte: próprio autor

Tabela 20 – Sequência de chaveamento considerando o tempo de reparo da falha

Estagio	Ação	Chave
1	Abrir	16 – 40
2	Fechar	35 – 40

Fonte: próprio autor

Na Tabela 21, apresenta-se o valor de ENS para o exemplo do sistema de 53 nós com falta permanente na seção 14, em que no primeiro caso não foi considerado o tempo de reparo na função objetivo, e no segundo caso o tempo de reparo foi considerado. A partir da Tabela 21, pode-se concluir a importância de considerar o tempo de reparo, principalmente quando no sistema existem chaves manuais.

Tabela 21 – Sequência de chaveamento considerando tempo de reparo

Detalhe da análise	ENS [kWh]
Não considerando tempo de reparo	17030,47
Considerando tempo de reparo	16793,70

Fonte: próprio autor

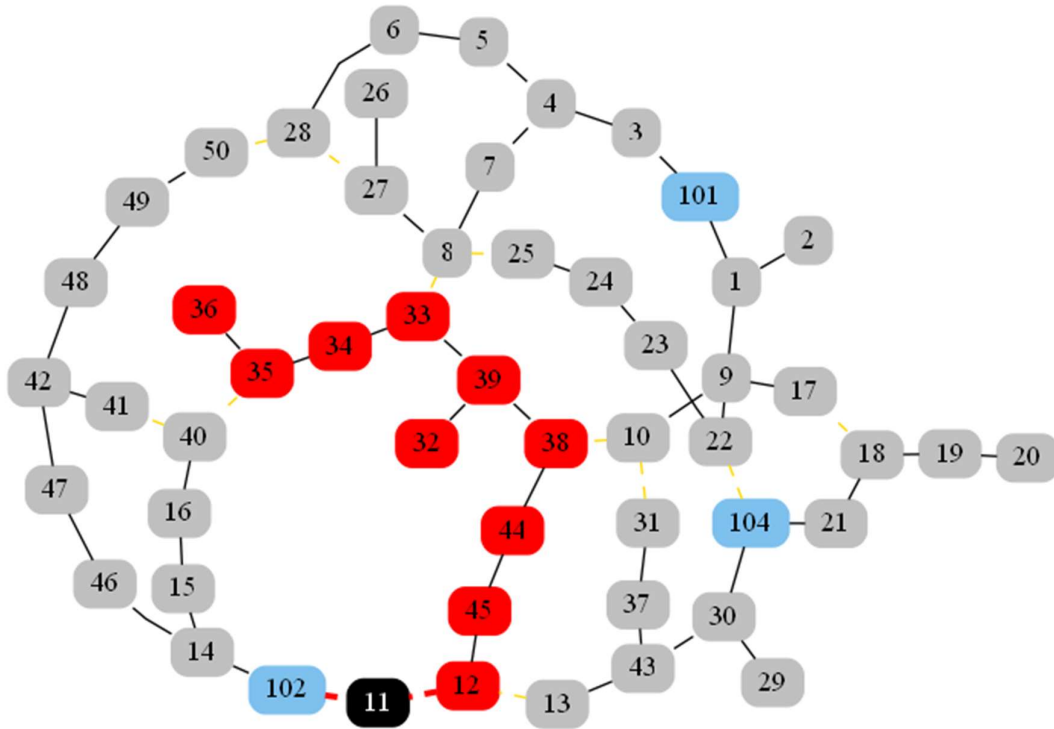
Nesta seção foi formulado um modelo para o cálculo da ENS considerando o tempo de reparo. Porém, o valor da ENS também depende da sequência em que os grupos de chaveamento são efetuados, e que será analisado na seção 5.4.3.

5.4.3 Análise da dependência da energia não suprida com a ordem que são executados os grupos de chaveamentos

Na presença de vários grupos de chaveamentos, a ordem em que são executados no sistema de distribuição altera o valor da ENS calculada.

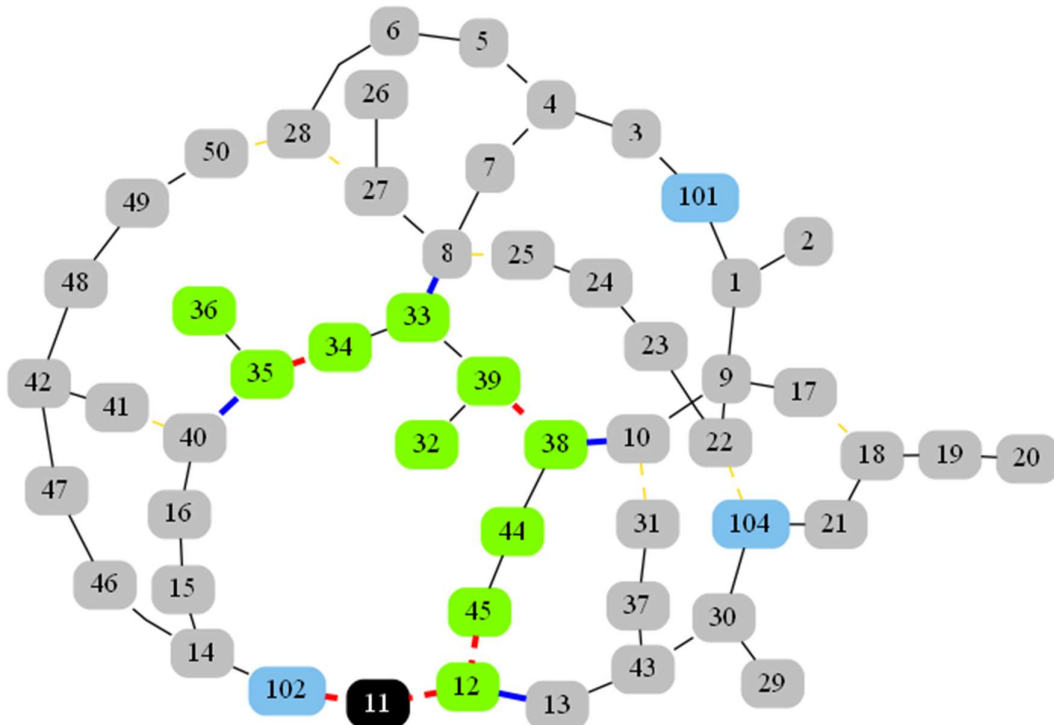
Para visualizar a influência da ordem da execução dos grupos de chaveamentos sobre o valor da ENS, o exemplo 4 é apresentado a seguir. Seja o sistema de 53 nós em estado inicial na Figura 26, com chaves telecomandadas e tempo de chaveamento de 1 minuto. Na Figura 40 apresenta-se a configuração após uma falta na seção 11, considerando um tempo de reparo de três horas. Para gerar a configuração final, (Figura 41), é necessário efetuar sete chaveamentos, os quais são detalhados na Tabela 22. Na Tabela 23 são apresentados os grupos de chaveamentos na configuração final.

Figura 40 – Configuração pós-falta do sistema com falta na seção 11



Fonte: próprio autor

Figura 41 – Configuração final do sistema com falta na seção 11



Fonte: próprio autor

Tabela 22 – Chaveamentos na configuração final do sistema após uma falta na seção 11

Estado na configuração final	Extremos da chave
Abrir	45 – 12
	35 – 34
	39 – 38
Fechar	13 – 12
	8 – 33
	35 – 40
	10 – 38

Fonte: próprio autor

Tabela 23 – Grupos de chaveamento no sistema de 53 nós após uma falta na seção 11

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

Fonte: próprio autor

Para analisar a influência que a ordem de execução dos grupos de chaveamento tem sobre o valor da ENS, na Tabela 24 são apresentadas todas as possíveis ordens candidatas para sequência de chaveamento, dependendo da ordem em que os grupos de chaves são manobrados.

Na Tabela 24, verifica-se que dependendo da ordem em que os grupos de chaveamento são executados, o valor da ENS aumenta ou diminui.

Verifica-se também que ao iniciar a execução de uma sequência de chaveamento com grupos com menos chaveamentos, não necessariamente implica obter um menor valor de ENS. De fato, o grupo candidato 11 com o menor valor de ENS, inicia com a execução do grupo de chaveamento que possui maior número de manobras (grupo de restauração Grupo-R #2).

Tabela 24 – Candidatos a sequência de chaveamento

Candidato	Sequência de execução dos grupos 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: próprio autor

Em geral, se existir n grupos de chaveamento, existem $n!$ possíveis sequências de chaveamentos para o problema. Para encontrar o melhor candidato, cada um destes grupos candidatos a solução deve ter a factibilidade avaliada e seu valor de ENS calculado. Em termos computacionais, analisar cada grupo candidato pode demandar um tempo proibitivo para o problema de restauração, principalmente se existir grupos-RCF como parte da sequência de chaveamento. Se houver grupos-RCF, a factibilidade do sistema deve ser analisada cada vez que um grupo-R é executado, porque a presença de grupos-RCF implica na necessidade de remanejamento de carga energizada entre os alimentadores, para tornar factível a aplicação posterior de um grupo-R. Portanto, fica em evidência a necessidade de uma técnica de decisão para identificar a melhor ordem em que os grupos de chaveamentos devem ser implementados para minimizar o valor da ENS. Para evitar cálculos desnecessários e dar eficiência computacional para o algoritmo de restauração, uma heurística para definir a ordem ótima para realização dos grupos de chaveamento é apresentada na seção 5.4.4.

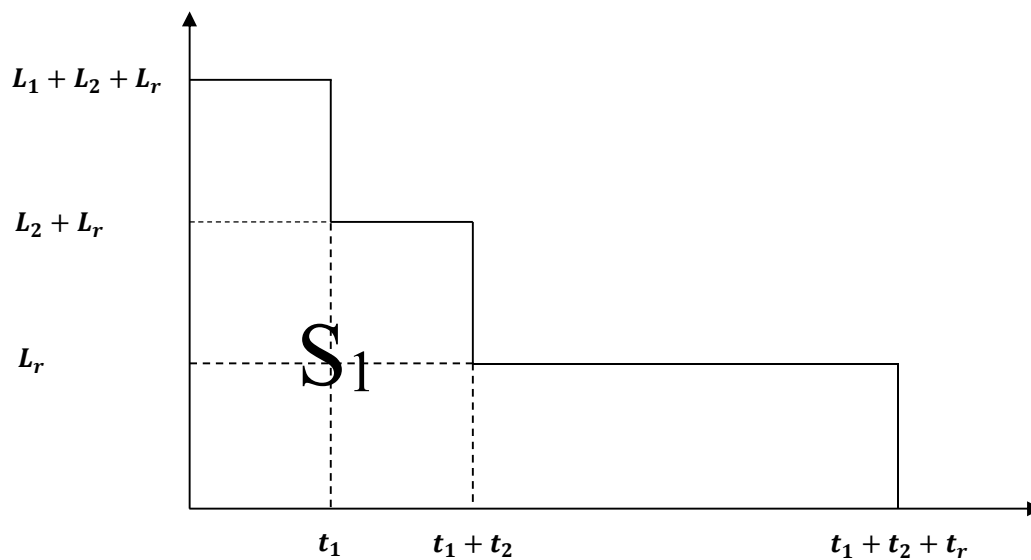
5.4.4 Heurística para determinar a ordem ótima de execução dos grupos de chaveamento para minimizar a energia não suprida: o índice de restauração

Nesta seção, uma heurística para definir a ordem ótima para implementar no algoritmo de restauração os grupos de chaveamentos é apresentada.

Seja um sistema de distribuição sujeito a uma falta permanente. A carga total desligada do sistema é L_R e um algoritmo de restauração é ativado visando minimizar a energia não suprida por meio da reconexão de cargas.

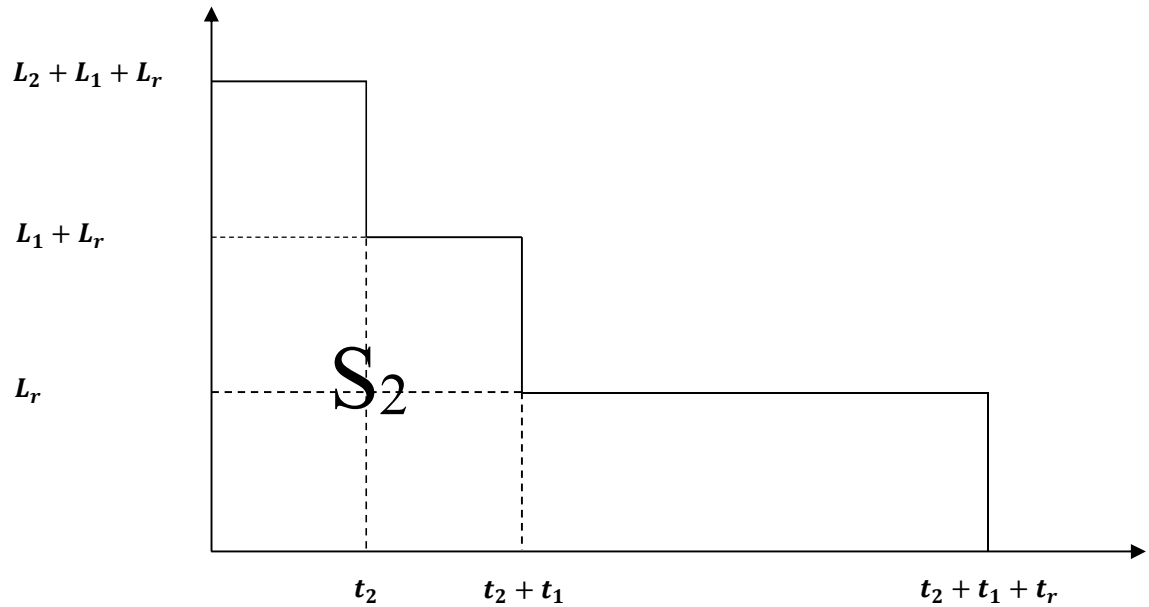
O algoritmo de restauração fornece o seguinte resultado: dois grupos de carga, L_1 e L_2 , precisam de tempos t_1 e t_2 , respectivamente, para serem reconectados no sistema. A carga que não foi possível de reconectar é denominada de L_r , e o tempo total de reparo é t_R . Assumindo que o tempo t_R é muito maior que t_1 e t_2 , as possíveis combinações de reconexão da carga são apresentadas nas Figuras 42 e 43.

Figura 42 – Opção de reconexão 1



Fonte: próprio autor

Figura 43 – Opção de reconexão 2



Fonte: próprio autor

O valor de energia não suprida para o primeiro caso é representado por S_1 , e, é calculado como o valor da área sob a curva da Figura 42, segundo a equação 30:

$$S_1 = t_1 \cdot (L_1 + L_2 + L_r) + t_2 \cdot (L_2 + L_r) + t_r \cdot (L_r) \quad (30)$$

O valor da energia não suprida para o segundo caso é representado por S_2 , e, é calculado como o valor da área sob a curva da Figura 43 segundo a equação 31:

$$S_2 = t_2 \cdot (L_2 + L_1 + L_r) + t_1 \cdot (L_1 + L_r) + t_r \cdot (L_r) \quad (31)$$

A condição que deve ser obedecida para que o valor de S_1 seja menor a S_2 é obtida como:

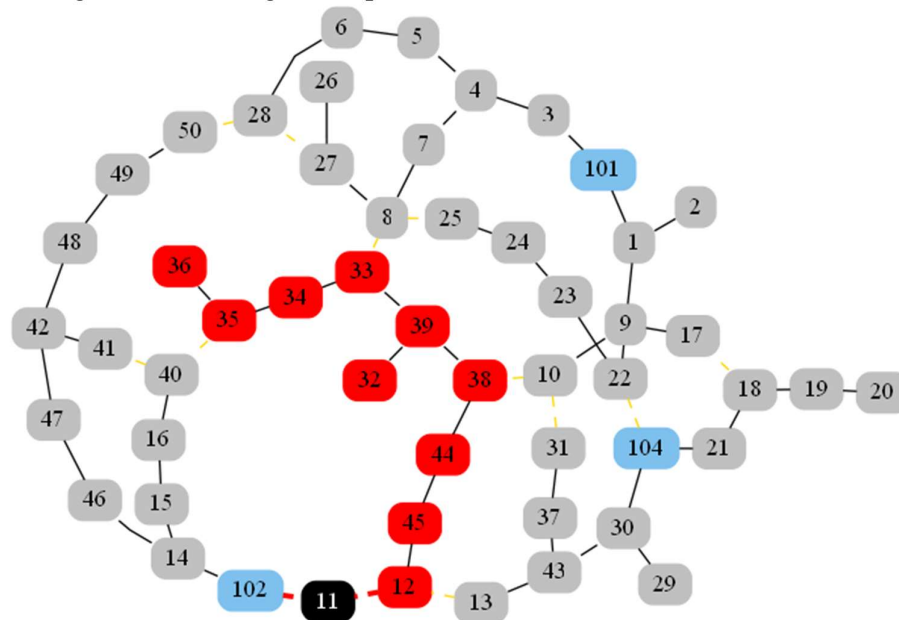
$$\begin{aligned} S_1 &< S_2 \\ t_1(L_1 + L_2 + L_r) + t_2(L_2 + L_r) + t_r(L_r) &< t_2(L_2 + L_1 + L_r) + t_1(L_1 + L_r) + t_r(L_r) \\ \frac{L_1}{t_1} &> \frac{L_2}{t_2} \end{aligned} \quad (32)$$

Concluindo, S_1 é menor que S_2 se a relação entre a carga reenergizada e o tempo necessário de execução do primeiro grupo reconectado L_1/t_1 é maior que a relação de carga e tempo do segundo grupo L_2/t_2 .

Neste trabalho, a relação entre a quantidade de carga reconectada e o tempo necessário para que seja efetuada a reconexão da carga no circuito é definida como Índice de Restauração (I_R). Generalizando, para minimizar o valor da ENS os grupos de chaveamento devem ser executados em ordem decrescente segundo seus índices de restauração. Cada vez que um grupo de chaveamento é escolhido para fazer parte da sequência de chaveamento, os índices de restauração devem ser atualizados. No caso que o tempo necessário para executar um grupo de chaveamento ultrapasse o tempo de reparo, este grupo de chaveamento é desconsiderado.

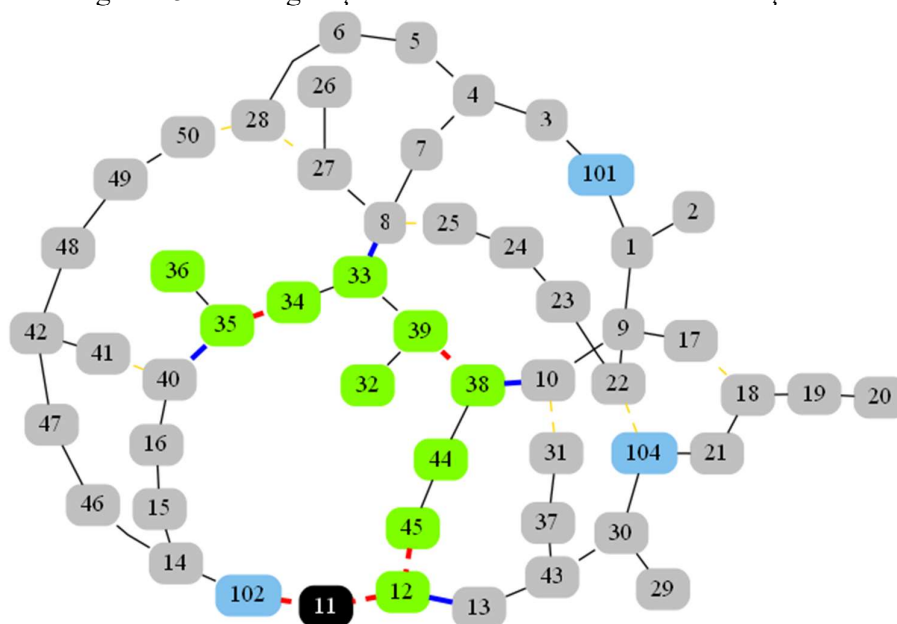
Para visualizar uma aplicação da heurística proposta, seja o exemplo 5 apresentado a seguir. O sistema de 53 nós (Figura 26) com chaves telecomandadas e tempo de manobra de um minuto por chave, está sujeito a uma falta permanente na seção 11 com tempo médio de reparo de três horas (Figura 44). O algoritmo de restauração indica que sete chaveamentos (Tabela 25) são necessários para restaurar as cargas que estão nas seções da rede sem falta (Figura 45). Na Tabela 26 são apresentados os grupos de chaveamentos, a carga restaurada, tempo necessário para realização das manobras por grupo de chaveamento e índice de restauração. Para cada estágio em que um grupo de chaveamento é escolhido para fazer parte da sequência de chaveamento os índices de restauração são atualizados.

Figura 44 – Configuração pós-falta do sistema com falta na seção 11



Fonte: próprio autor

Figura 45 – Configuração final do sistema com falta na seção 11



Fonte: próprio autor

Tabela 25 – Chaveamentos necessários para o processo restaurativo após falta na seção 11

Estado na configuração final	Extremos da chave
Abrir	45 – 12
	35 – 34
	39 – 38
Fechar	13 – 12
	8 – 33
	35 – 40
	10 – 38

Fonte: próprio autor

Tabela 26 – Grupos de chaveamento: Estágio-1. E: estado, F: fechar, A: abrir

	Grupo-R #1		Grupo-R #2		Grupo-R #3		Grupo-R #4	
	E	Chave	E	Chave	E	Chave	E	Chave
	F	13-12	F	8-33	F	35-40	F	10-38
	A	45-12	A	35-34	A	35-34	A	45-12
			A	39-38			A	39-38
Carga Restaurada [p.u.]	0,01247		0,04712		0,00832		0,02287	
Tempo de implementação do grupo [h]	0,03333		0,05000		0,03333		0,05000	
Índice de Restauração [h⁻¹]	0,37421		0,94248		0,24948		0,45737	

Fonte: próprio autor

Uma vez calculadas as características necessárias dos grupos de chaveamentos (Tabela 26), o Estágio-1 inicia com a seleção do primeiro grupo que faz parte da sequência de chaveamento. O grupo de chaves selecionado é o Grupo-R #2 por possuir um valor de índice de restauração superior aos dos outros grupos. Uma vez executado o Grupo-R #2, uma nova análise deve ser realizada com os grupos de chaveamentos restantes. Assim, o primeiro estágio finaliza.

No Estágio-2, um novo grupo de chaveamento deve ser escolhido para fazer parte da sequência de chaveamento final. Na Tabela 27, são atualizados os valores de tempo de execução e índice de restauração para cada grupo de chaveamento.

Na Tabela 27 é possível observar que o grupo de chaveamento selecionado no primeiro estágio, Grupo-R #2, e as chaves que o compõem, são apresentados na cor vermelha e não podem fazer parte da nova análise. O próximo grupo selecionado é o Grupo-R #4, e o segundo estágio finaliza.

Tabela 27 – Grupos de chaveamento: Estágio-2. E: estado, F: fechar, A: abrir

	Grupo-R #1	Grupo-R #2	Grupo-R #3	Grupo-R #4
	E	Chave	E	Chave
	F	13-12	F	8-33
	Abrir	45-12	A	35-34
			A	39-38
Carga Restaurada [p.u.]	0,01247	–	0,00832	0,02287
Tempo de implementação do Grupo [h]	0,03333	–	0,01667	0,03333
Índice de restauração	0,37422	–	0,49896	0,68607

Fonte: próprio autor

O Estágio-3 inicia-se com os dados na Tabela 28, em que os tempos de implementação dos chaveamentos dos grupos e os índices de restauração são atualizados. O Grupo-R #1 é selecionado e o terceiro estágio finaliza.

Tabela 28 – Grupos de chaveamento: Estágio-3. E: estado, F: fechar, A: abrir

	Grupo-R #1		Grupo-R #2		Grupo-R #3		Grupo-R #4	
	E	Chave	E	Chave	E	Chave	E	Chave
	F	13-12	F	8-33	F	35-40	F	10-38
	A	45-12	A	35-34	A	35-34	A	45-12
			A	39-38			A	39-38
Carga Restaurada [p.u.]	0,01247		–		0,00832		–	
Tempo de implementação do Grupo [h]	0,01667		–		0,01667		–	
Índice de restauração	0,74844		–		0,49896		–	

Fonte: próprio autor

No Estágio-4 (Tabela 29), o Grupo-R #3 é selecionado para fazer parte da sequência de chaveamento. Com todos os grupos de chaveamento impressos, a heurística finaliza.

Tabela 29 – Grupos de chaveamento: Estágio-4. E: estado, F: fechar, A: abrir

	Grupo-R #1		Grupo-R #2		Grupo-R #3		Grupo-R #4	
	E	Chave	E	Chave	E	Chave	E	Chave
	F	13-12	F	8-33	F	35-40	F	10-38
	A	45-12	A	35-34	A	35-34	A	45-12
			A	39-38			A	39-38
Carga Restaurada [p.u.]	–				0,00832		–	
Tempo de implementação [h]	–				0,01667		–	
Índice de restauração	–				0,49896		–	

Fonte: próprio autor

A sequência de chaveamento é apresentada na Tabela 30 com um valor de ENS correspondente a 1271,66 kWh.

Tabela 30 – Sequência de chaveamento no sistema de 53 nós, após falta na seção 11

Estagio	Ação	Chaves
Isolamento da falta	Abrir	11 – 102
	Abrir	11 – 12
1	Abrir	35 – 34
2	Abrir	39 – 38
3	Fechar	8 – 33
4	Abrir	45 – 12
5	Fechar	10 – 38
6	Fechar	13 – 12
7	Fechar	35 – 40

Fonte: próprio autor

Pode-se verificar que a sequência obtida fazendo uso do conceito de índice de restauração, é a melhor solução possível como verificado na Tabela 24 da seção 5.4.3, em que todas as possíveis sequências de chaveamento foram analisadas. Esse resultado permite validar a heurística proposta na escolha da melhor ordem de grupos de chaveamento para gerar a sequência de chaveamento final.

Estabelecer a ordem em que as chaves devem ser manobradas, pode ser visto como um problema de sequenciamento de tarefas em que a função a ser minimizada deve ser a quantidade de ENS. Entretanto, dividir a sequência em grupos de chaveamentos e definir uma heurística para ordená-las, apresenta-se como uma ferramenta útil para evitar avaliar todas as possibilidades de ordenamento e, ao mesmo tempo, evitar o possível aumento de tempo computacional necessário para um problema que deve ser resolvido em tempo real como é o problema de restauração. Embora tenha sido definida uma heurística para o ordenamento de grupos de chaveamentos, dependendo da carga que restauram e o tempo necessário de implementação, existem também grupos de chaveamento que não restauram carga, mas tornam possível a reconexão de grandes blocos de cargas: os Grupos-RCF. A presença de Grupos-RCF também deve ser analisada como parte da sequência de chaveamento para evitar configurações intermediárias infactíveis. Para incluir os Grupos-RCF na sequência de chaveamento, na seção 5.4.5 propõe-se a criação dos Super-grupos de chaveamento.

5.4.5 Super-grupos de chaveamento

Os Super-grupos de chaveamento são conjuntos de grupos de chaves que, manobradas de forma sequencial, restauram seções de carga em sistemas de distribuição garantindo etapas intermediárias factíveis. Cada Super-grupo inicia com um Grupo-R e à medida que for necessário, são adicionados Grupos-RCF para tornar factível a implementação dos

chaveamentos do Grupo-R inicial. Como visto nas seções anteriores, um Grupo-R reconecta um conjunto de cargas no sistema, enquanto que um Grupo-RCF realoca um conjunto de cargas em um alimentador adjacente.

Para cada grupo é atribuído um Alimentador Associado (AA). Um Grupo-RCF está associado com o alimentador que o conjunto de cargas realocadas fazem parte na configuração pós-falta, antes da restauração. Enquanto que um Grupo-R está associado com o alimentador que o conjunto de cargas reconectadas fazem parte na configuração final. Um Super-grupo está associado ao mesmo alimentador que seu Grupo-R.

Os passos para gerar os Super-grupos de chaveamento e como estes Super-grupos fazem parte da sequência de chaveamento, são descritos a seguir. Quando um Super-grupo é determinado para fazer parte da sequência final de chaveamentos, os elementos que o compõe, não podem ser mais utilizados. A análise começa com o sistema na configuração pós-falta, e é atualizada quando um Super-grupo é determinado para fazer parte da sequência

- i.* Identificar os Grupos-R (ver seção 5.4.1.1) e Grupos-RCF (ver seção 5.4.1.2). O sistema inicial está na configuração pós-falta. Ir ao passo *ii*.
- ii.* Formar Super-grupos com cada Grupo-R. Ir ao passo *iii*.
- iii.* Calcular o índice de restauração de cada Super-grupo que não foi utilizado, e vá ao passo *iv*.
- iv.* Caso não exista Super-grupo não utilizado, ir ao passo *ix*.
- iv.* Selecionar o Super-grupo com melhor índice de restauração. Ir ao passo *v*.
- v.* Verificar a existência de Grupos-RCF não utilizados e com o mesmo alimentador associado ao Super-grupo em análise ($AA [\text{Grupo-RCF}] = AA [\text{Super-grupo}]$), e ir ao passo *vi*. Caso não exista Grupo-RCF não utilizado, incluir o Super-grupo na sequência final de chaveamentos, atualizar a topologia do sistema com os chaveamentos deste Super-grupo, e voltar ao passo *iii*.
- vi.* Verificar a existência de outros Super-grupos com o mesmo alimentador associado do Super-grupo em análise ($AA [\text{Super-grupo}]$), e ir ao passo *vii*. Caso contrário, adicionar os Grupos-RCF identificados no passo *v* no Super-grupo em análise e voltar ao passo *iii*.
- vii.* Testar a execução dos chaveamentos do Super-grupo em análise no sistema na configuração corrente. Se as restrições de operação são factíveis, incluir o Super-grupo na sequência final de chaveamentos, atualizar a topologia do sistema com os chaveamentos deste Super-grupo, e voltar ao passo *iii*. Caso contrário ir ao passo *viii*.

viii. Adicionar o Grupo-RCF ao Super-grupo em análise. Se existir dois ou mais Grupos-RCF identificados no passo *v*, criar novos Super-grupos com cada Grupo-RCF e o Super-grupo em análise. Voltar ao passo *iii*.

ix. Sair do algoritmo.

Para visualizar os passos acima descritos, o exemplo 6 é apresentado a seguir. No sistema de distribuição real de 7052 nós (Figura 46), uma falta permanente incide na seção no início no alimentador 9. Decorrente da falta, um total de 7.432,90 kW de demanda de potência ativa é desconectada no sistema. Na Figura 47 apresenta-se na condição pós-falta, a região do sistema que deve participar do processo restaurativo que inclui os alimentadores 1, 3,4, 5 e 9, em que as seções desenergizadas, após a falha na rede, são representadas na cor vermelha. O algoritmo de restauração precisa de 30,19 segundos para indicar que 17 chaveamentos são necessários para restaurar 79,08% da demanda desenergizada.

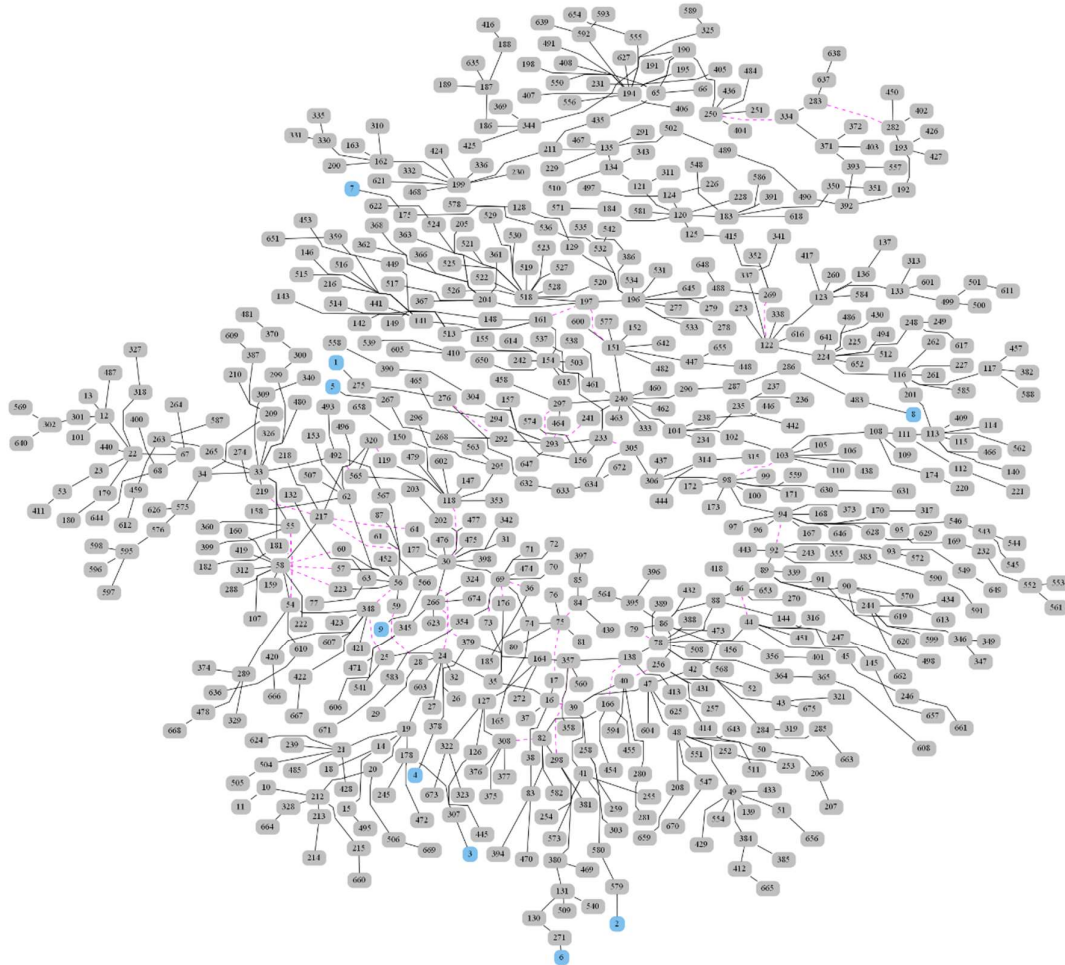
Na Figura 48 apresenta-se a configuração final do sistema, em que as seções em verde representam as seções restauradas, enquanto que as seções em vermelho representam a demanda em condição de corte de carga. Na Tabela 31 são apresentados os chaveamentos fornecidos pelo algoritmo de restauração que são necessários para levar o sistema da configuração pós-falta até a configuração final.

A seguinte nomenclatura é utilizada: G-R é grupo de restauração, G-RCF é grupo de reconfiguração, E é o estado da chave na configuração final, F é estado fechado e A é estado aberto.

Na Tabela 32 apresentam-se os grupos de chaveamentos utilizando os dados da Tabela 31. Na Tabela 33 apresentam-se os valores de cargas restauradas associados a cada grupo de chaveamento (quantidade de demanda reenergizada, caso o grupo fosse efetivado), o tempo de implementação dos chaveamentos e o alimentador associado a cada grupo.

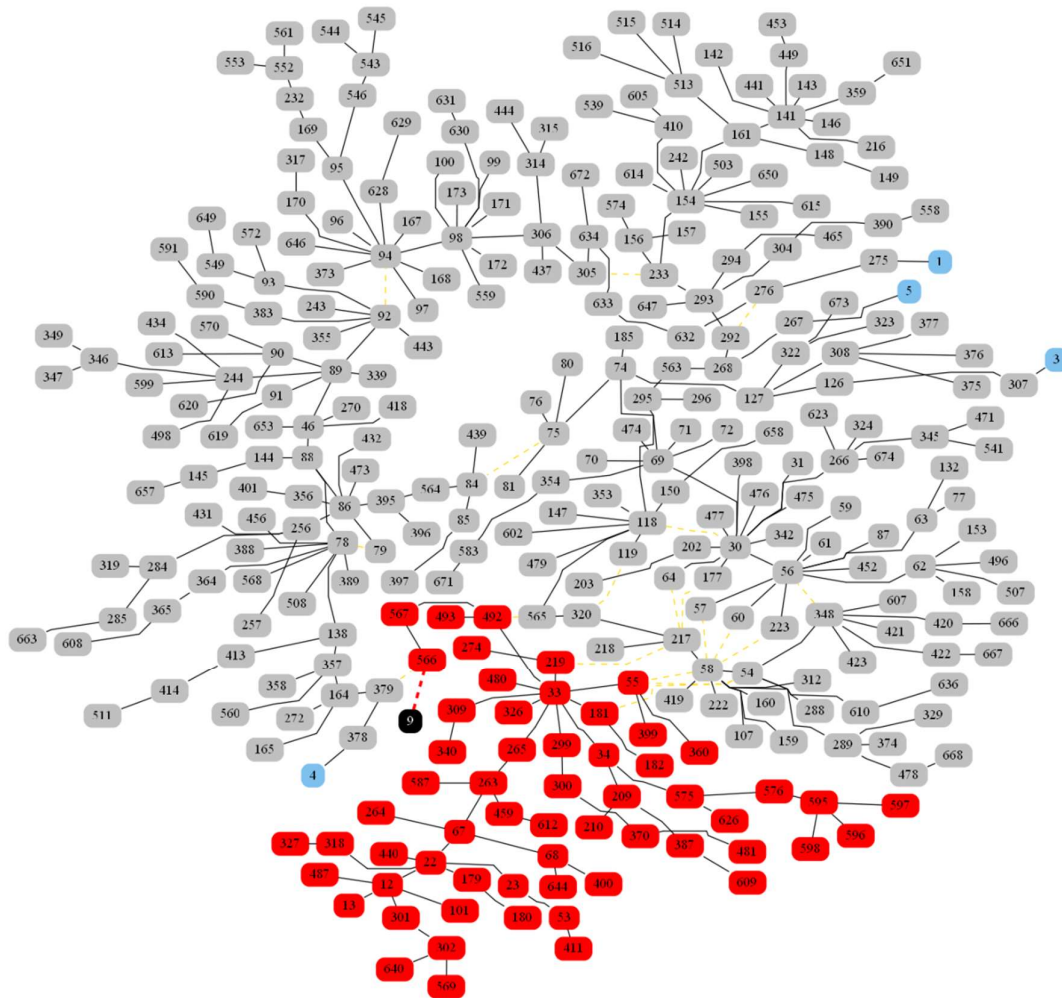
Na Tabela 33, o valor negativo de carga restaurada nos Grupos-RCF indica a quantidade de demanda que é temporalmente desconectada do sistema, para ser realocada em um alimentador adjacente.

Figura 46 – Configuração inicial do sistema real de 7052 nós



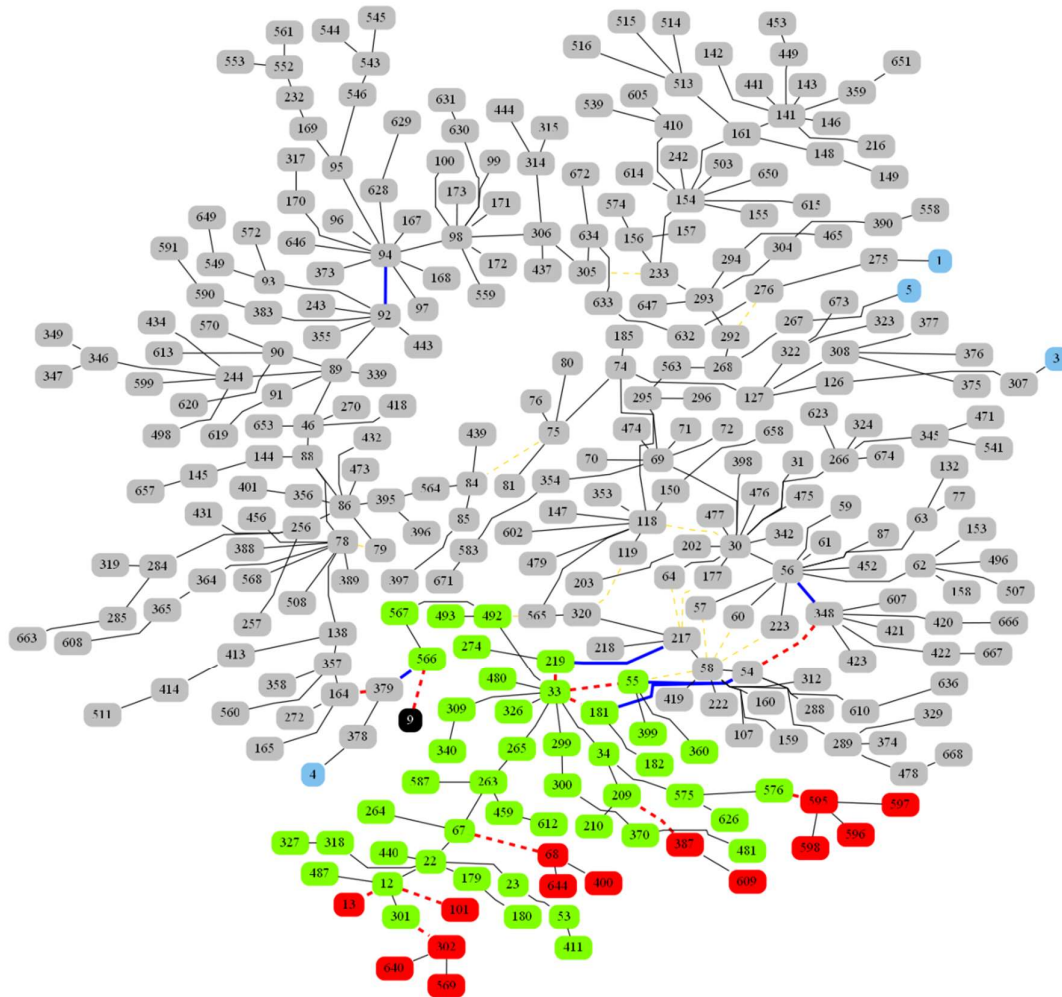
Fonte: próprio autor

Figura 47 – Configuração pós-falta do sistema de 7052 nós com falta no alimentador 9



Fonte: próprio autor

Figura 48 – Configuração final do sistema de 7052 nós com falta no alimentador 9



Fonte: próprio autor

Tabela 31 – Chaveamentos após falta no alimentador 9 no sistema de 7052 nós

Estado na configuração final	Extremos da chave
Abrir	379 – 164
	301 – 302
	12 – 101
	12 – 13
	67 – 68
	209 – 387
	576 – 595
	33 – 55
	33 – 219
	33 – 181
	54 – 348
	92 – 94
Fechar	379 – 566
	54 – 55
	54 – 181
	54 – 348
	348 – 56
	217 – 219

Fonte: próprio autor

Uma vez identificadas as chaves que fazem parte da sequência de chaveamento (Tabela 31), os grupos de chaveamento (Tabela 32) e suas características (Tabela 33), o processo para gerar a sequência de chaveamento inicia-se o Estágio-1 da análise.

No Estágio-1, segundo os passos acima descritos, um Super-grupo de chaveamento é criado para cada Grupo-R que foi determinado. Na Tabela 34, os Super-grupos e os grupos de chaveamento que os compõem são apresentados. Na Tabela 35 são apresentadas as características dos Super-grupos no Estágio-1.

Tabela 32 – Grupos de chaveamento no sistema de 7052 nós após uma falta no alimentador 9

G-R #1		G-R #2		G-R #3		G-R #4		G-RCF #1		G-RCF #2	
E	Chave	E	Chave	E	Chave	E	Chave	E	Chave	E	Chave
F	54-55	F	217-219	F	54-181	F	379-566	F	348-56	F	92-94
A	33-55	A	33-219	A	33-181	A	33-181	A	54-348	A	379-164
						A	33-219				
						A	33-55				
						A	576-595				
						A	209-387				
						A	67-68				
						A	12-13				
						A	12-101				
						A	301-302				

Fonte: próprio autor

Tabela 33 – Características dos grupos de chaveamento

Grupo	Carga Restaurada [p.u.]	Tempo de Implementação [h]	Alimentador Associado
Grupo-R #1	0,00717	0,03333	5
Grupo-R #2	0,00304	0,03333	5
Grupo-R #3	0,00435	0,03333	5
Grupo-R #4	0,04422	0,16667	4
Grupo-RCF #1	- 0,00698	0,03333	5
Grupo-RCF #2	- 0,04608	0,03333	4

Fonte: próprio autor

Tabela 34 – Super-grupos de chaveamentos: Estágio-1

Super-grupo #1	Super-grupo #2	Super-grupo #3	Super-grupo #4
Grupo-R #1	Grupo-R #2	Grupo-R #3	Grupo-R #4

Fonte: próprio autor

Tabela 35 – Características dos Super-grupos de chaveamentos: Estágio-1

Super-grupo	Carga Restaurada [p.u.]	Tempo [h]	IR [h⁻¹]	Alimentador Associado
Super-grupo #1	0,00717	0,03333	0,21501	5
Super-grupo #2	0,00304	0,03333	0,09128	5
Super-grupo #3	0,00435	0,03333	0,13049	5
Super-grupo #4	0,04422	0,16667	0,26531	4

Fonte: próprio autor

Segundo o critério de índice de restauração, o primeiro Super-grupo a ser escolhido para fazer parte da sequência de chaveamento, é o Super-grupo #4. Porém, segundo o passo (vi) do algoritmo anterior, para ser aplicado o Super-grupo #4 é necessário adicionar o Grupo-RCF #2, por ele ter o mesmo alimentador associado 4 (Tabela 33 e Tabela 35), ou seja, em outras palavras, se for executado o Grupo-R #4 pertencente ao Super-Grupo #4, alguma restrição será violada, o que poderia ser evitado se o Grupo-RCF #2 fosse executado com antecedência. Por questões didáticas, o Grupo-R #4 foi executado sem o Grupo-RCF #2, e o resultado obtido foi uma violação do limite de corrente no trecho que une os nós 14260 – 14262 na seção 378 pertencente ao alimentador 4. Portanto, de acordo com o passo (vi) da heurística proposta, o Grupo-RCF #2 é adicionado ao Super-grupo #4, e o Estágio-1 é finalizado.

No Estágio-2 (Tabela 36 e Tabela 37), as características dos Super-grupos são atualizadas. Uma característica importante para destacar é que o valor do índice de restauração do Super-Grupo #4 é atualizado, embora continue mantendo o maior valor em

comparação com os outros Super-grupos. Executando o passo (v) da heurística proposta, o Super-grupo #4 é adotado como parte da sequência de chaveamento e seus elementos proibidos de fazerem parte em uma futura análise. O Estágio-2 finaliza.

Tabela 36 – Super-grupos de chaveamento: Estágio-2

Super-grupo #1	Super-grupo #2	Super-grupo #3	Super-grupo #4
Grupo-R #1	Grupo-R #2	Grupo-R #3	Grupo-R #4
			Grupo-RCF #2

Fonte: próprio autor

Tabela 37 – Características dos Super-grupos de chaveamento: Estágio-2

Super-grupo	Carga Restaurada [p.u.]	Tempo [h]	IR [h⁻¹]	Alimentador Associado
Super-grupo #1	0,00717	0,03333	0,21501	5
Super-grupo #2	0,00304	0,03333	0,09128	5
Super-grupo #3	0,00435	0,03333	0,13049	5
Super-grupo #4	0,04422	0,20000	0,22109	4

Fonte: Próprio autor

No Estágio-3 (Tabelas 38 e 39), as características dos Super-grupos são atualizadas. Os índices de restauração dos Super-grupos #1, #2 e #3 são melhorados, porque para cada Super-grupo foi implementada uma manobra no Estágio-2. Para executar o passo (vii) o cálculo de fluxo de potência é necessário para avaliar a implementação do Super-grupo #1. Verifica-se que nenhuma restrição é violada, portanto o Super-grupo #1 é adotado na sequência de chaveamento. O Estágio-3 finaliza.

Tabela 38 – Super-grupos de chaveamento: Estágio-3

Super-grupo #1	Super-grupo #2	Super-grupo #3	Super-grupo #4
Grupo-R #1	Grupo-R #2	Grupo-R #3	Grupo-R #4
			Grupo-RCF #2

Fonte: próprio autor

Tabela 39 – Características dos Super-grupos de chaveamento: Estágio-3

Super-grupo	Carga Restaurada [p.u.]	Tempo [h]	IR [h⁻¹]	Alimentador Associado
Super-grupo #1	0,00717	0,01667	0,43002	5
Super-grupo #2	0,00304	0,01667	0,18255	5
Super-grupo #3	0,00435	0,01667	0,26099	5
Super-grupo #4	0,04422	0,20000	0,22109	4

Fonte: próprio autor

No Estágio-4 (Tabelas 40 e 41), após a atualização das características dos Super-Grupos e executando o passo (vii) da heurística proposta, o fluxo de potência é calculado para avaliar a implementação do Super-Grupo #3, e é verificado que nenhuma restrição é violada, portanto o Super-grupo #3 é adotado na sequência de chaveamento. O Estágio-4 finaliza.

Tabela 40 – Super-grupos de chaveamentos: Estágio-4

Super-grupo #1	Super-grupo #2	Super-grupo #3	Super-grupo #4
Grupo-R #1	Grupo-R #2	Grupo-R #3	Grupo-R #4
			Grupo-RCF #2

Fonte: próprio autor

Tabela 41 – Características dos Super-grupos de chaveamento: Estágio-4

Super-grupo	Carga Restaurada [p.u.]	Tempo [h]	IR [h⁻¹]	Alimentador Associado
Super-grupo #1	0,00717	0,01667	0,43002	5
Super-grupo #2	0,00304	0,01667	0,18255	5
Super-grupo #3	0,00435	0,01667	0,26099	5
Super-grupo #4	0,04422	0,20000	0,22109	4

Fonte: próprio autor

Tabela 42 – Super-grupos de chaveamento: Estágio-5

Super-grupo #1	Super-grupo #2	Super-grupo #3	Super-grupo #4
Grupo-R #1	Grupo-R #2	Grupo-R #3	Grupo-R #4
			Grupo-RCF #2

Fonte: próprio autor

Tabela 43 – Características dos Super-grupos de chaveamentos: Estágio-5

Super-grupo	Carga Restaurada [p.u.]	Tempo [h]	IR [h⁻¹]	Alimentador Associado
Super-grupo #1	0,00717	0,01667	0,43002	5
Super-grupo #2	0,00304	0,01667	0,18255	5
Super-grupo #3	0,00435	0,01667	0,26099	5
Super-grupo #4	0,04422	0,20000	0,22109	4

Fonte: próprio autor

No Estágio-5 (Tabelas 42 e 43), executando o passo (vi) da heurística, o Grupo-RCF #1 deve ser adicionado no Super-grupo #2. O Estágio-5 finaliza. Finalmente, no Estágio-6 (Tabelas 44 e 45), executando o passo (v) da heurística, o Super-grupo #2 é adotado na sequência de chaveamento. Não existindo mais Super-grupos para análise, e atendendo o

passo (iii), o algoritmo finaliza. A sequência de chaveamento obtida é apresentada na Tabela 46. O valor da ENS é 5.981 kWh e a curva que descreve a potência ativa não energizada durante o processo restaurativo é apresentada na Figura 49. Nesta figura é possível observar o efeito que os Grupos-RCF têm sobre o valor da ENS nos instantes de $t = 1$ min e $t = 15$ min.

Tabela 44 – Super-grupos de chaveamento: Estágio-6

Super-grupo #1	Super-grupo #2	Super-grupo #3	Super-grupo #4
Grupo-R #1	Grupo-R #2	Grupo-R #3	Grupo-R #4
	Grupo-RCF #1		Grupo-RCF #2

Fonte: próprio autor

Tabela 45 – Características dos Super-grupos de chaveamentos: Estágio-6

Super-grupo	Carga Restaurada [p.u.]	Tempo [h]	IR [h⁻¹]	Alimentador Associado
Super-grupo #1	0,00717	0,01667	0,43002	5
Super-grupo #2	0,00304	0,05000	0,06085	5
Super-grupo #3	0,00435	0,01667	0,26099	5
Super-grupo #4	0,04422	0,20000	0,22109	4

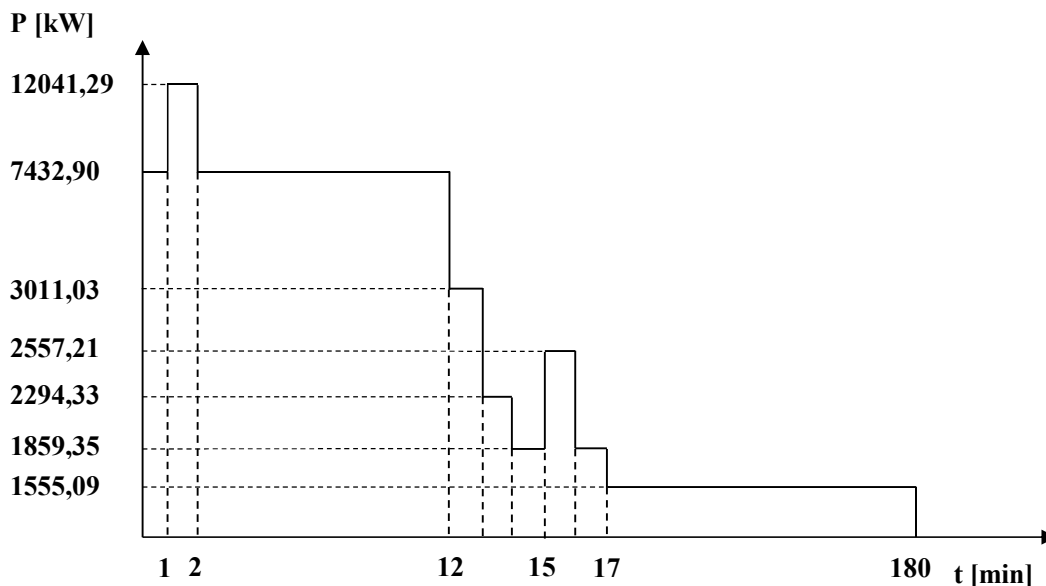
Fonte: próprio autor

Tabela 46 – Sequência de chaveamento

Estagio	Ação	Chaves
Isolamento da falta	Abrir	9 – 566
1	Abrir	379 – 164
2	Fechar	92 – 94
3	Abrir	301 – 302
4	Abrir	12 – 101
5	Abrir	12 – 13
6	Abrir	67 – 68
7	Abrir	209 – 387
8	Abrir	576 – 595
9	Abrir	33 – 55
10	Abrir	33 – 219
11	Abrir	33 – 181
12	Fechar	379 – 566
13	Fechar	54 – 55
14	Fechar	54 – 181
15	Abrir	54 – 348
16	Fechar	348 – 56
17	Fechar	217 – 219

Fonte: próprio autor

Figura 49 – Curva que descreve a potência não fornecida durante o processo restaurativo



Fonte: próprio autor

Concluindo, utilizando a heurística proposta para gerar a sequência de chaveamento em uma situação de falta no início do alimentador 9 no sistema real de 7052 nós, foi apenas necessário o processamento de dois cálculos de fluxo de potência, obtendo uma redução importante em tempo de processamento, comparada com a análise que seria realizada com todas as combinações possíveis. Lembrando que, segundo o cálculo apresentado na seção 5.4.3, o número de possibilidades totais chaveamentos é o fatorial do número de grupos de chaveamentos, ou seja, 720 combinações deveriam ser analisadas.

As chaves de manobra, embora sejam os equipamentos convencionais para reduzir os efeitos dos desligamentos das cargas devido a uma falta permanente em sistemas de distribuição, existem outros equipamentos pertencentes à operação do sistema com a possibilidade de reduzir os impactos das faltas permanentes na rede. Entre estes equipamentos estão os equipamentos de controle de tensão, que podem fazer parte do modelo do problema de restauração e, portanto, da sequência de chaveamento. Na seção 5.4.6 algumas considerações finais sobre a sequência de chaveamento são detalhadas, incluindo a presença de capacitores e reguladores de tensão.

5.4.6 Considerações finais sobre a sequência de chaveamento

5.4.6.1 Sequência de chaveamento considerando equipamentos de controle de tensão

Neste trabalho, equipamentos de controle de tensão, como capacitores e reguladores de tensão, são utilizados para melhorar o perfil de tensão da rede no estado restaurativo e reduzir o valor da ENS através da reenergização de cargas no sistema em eventos de faltas permanente. No capítulo 5.3, foi detalhado como são incluídos os equipamentos de controle de tensão no processo restaurativo.

Na heurística proposta que gera a sequência de chaveamento para o problema de restabelecimento, a mudança de taps de capacitores e reguladores de tensão são considerados como Grupos-RCF, uma vez que a mudança de tap de equipamentos de controle de tensão não tem a possibilidade de restaurar seções de carga, embora tornem possível a aplicação de Grupos-R em estágios posteriores. O alimentador associado a um Grupo-RCF que possui controle de tap, é o alimentador que o equipamento de controle de tensão pertence à configuração final. Se um equipamento de controle de tensão pertence a um Grupo-RCF, este Grupo-RCF deve estar associado aos alimentadores que pertencem às configurações inicial e final.

Para visualizar as considerações acima descritas, o exemplo 7 é apresentado a seguir. Na Figura 26 apresenta-se o sistema de 53 nós no estado pré-falta. Neste exemplo é considerado que todos os trechos são chaves telecomandadas com tempo de manobra de um minuto.

Neste sistema são adicionados três bancos de capacitores chaveados e um regulador de tensão. Todos os equipamentos de controle de tensão são considerados telecomandados e com tempo de alteração do valor do tap de um segundo.

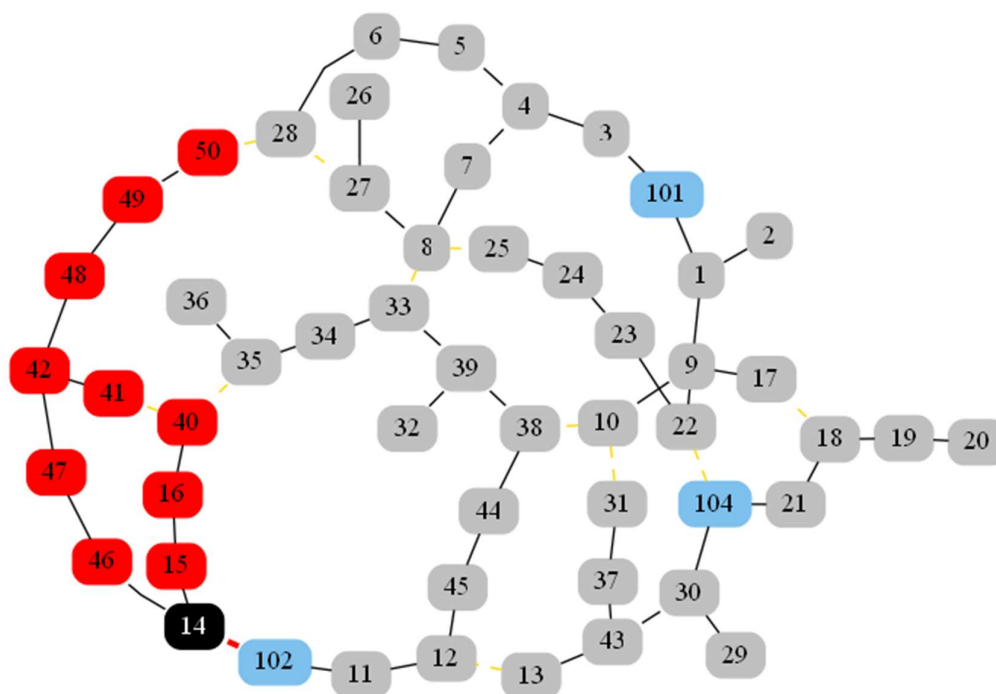
Os três bancos de capacitores são compostos por módulos de 300 kVAr e possuem capacidades máximas de 600 kVAr, 900 kVAr e 600 kVAr, alocados nas seções 7, 8 e 16, respectivamente. A chave entre as seções 44 e 38 é substituída por um regulador de tensão com a possibilidade de regular +/- 10% de tensão de entrada, com uma variação de tap de 0,00625 p.u., tap mínimo = - 16 e tap máximo = +16, a posição do tap inicial é 0. Uma falta permanente atinge a seção 14, e é assumido um tempo médio de reparo de três horas.

Na Figura 50, apresenta-se o sistema na configuração pós-falta, em que a seção em falta é isolada. O algoritmo proposto neste capítulo para obter a sequência de chaveamento indica a necessidade de seis chaveamentos e oito movimentos de taps para restaurar o 47,86% da demanda ativa desligada após a falha na rede.

Na Figura 51, apresenta-se o sistema na configuração final, em que as seções na cor verde representam as seções com demanda restaurada, as seções em vermelho indicam corte de carga e as seções em cor laranja indicam o equipamento de controle de tensão que participa da sequência de chaveamento.

Na Tabela 47 apresentam-se a lista de chaveamentos e a posição final do tap do equipamento de controle de tensão. Na Tabela 48 apresentam-se os grupos de chaveamentos para gerar a sequência de chaveamento final.

Figura 50 – Configuração pós-falta do sistema com falta na seção 14



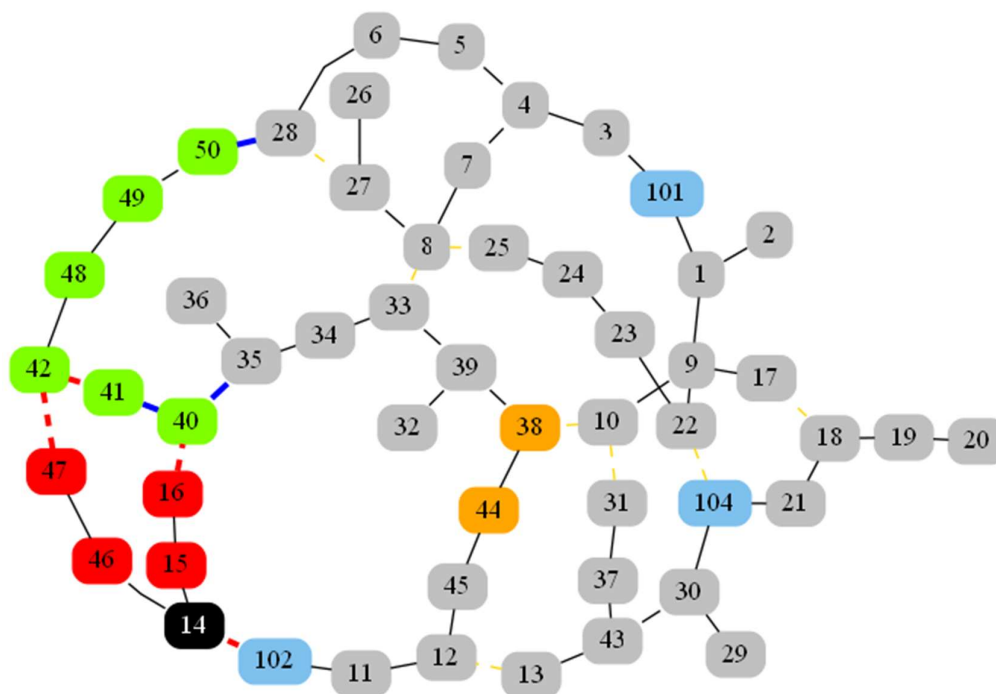
Fonte: próprio autor

Tabela 47 – Chaveamentos após falta

Equipamento	Localização	Posição Inicial	Posição Final
Chave	42 – 41	Fechado	Aberto
	16 – 40	Fechado	Aberto
	47 – 42	Fechado	Aberto
	40 – 41	Aberto	Fechado
	35 – 40	Aberto	Fechado
	28 – 50	Aberto	Fechado
Regulador de tensão	44 – 38	0	8

Fonte: próprio autor

Figura 51 – Configuração final do sistema com falta na seção 14



Fonte: próprio autor

Tabela 48 – Grupos de chaveamentos no sistema de 53 nós

Grupo-R #1		Grupo-R #2		Grupo-R #3		G-RCF #1		
Estado	Chave	Estado	Chave	Estado	Chave	Equipamento	Seção	Tap
Fechar	40–41	Fechar	35–40	Fechar	28–50	RT	44–38	8
Abrir	42–41	Abrir	16–40	Abrir	42–41			
				Abrir	47–42			

Fonte: próprio autor

Na Tabela 49 apresenta-se a sequência final de chaveamento. No cenário em que não é considerada a existência de equipamentos de controle de tensão no sistema, é possível restaurar apenas 40,17% da demanda ativa desenergizada após a falta permanente, utilizando cinco chaveamentos obtendo o valor de ENS igual a 16.827,20 kWh. Enquanto que, com a operação do regulador de tensão, 47,86% da demanda ativa é restaurada, utilizando seis chaveamentos e oito alterações de taps, obtendo um valor de ENS igual a 15.019,85 kW demonstrando a importância dos equipamentos de controle de tensão no processo restaurativo. Note-se que o movimento de tap do RT é considerado como Grupo-RCF, e é implementando quando torna factível a implementação do último chaveamento.

Tabela 49– Sequência de chaveamento final

Estagio	Equipamento	Localização	Ação
Isolamento da falta	Chave	102 – 14	Abrir
1	Chave	47 – 42	Abrir
2	Chave	42 – 41	Abrir
3	Chave	28 – 50	Fechar
4	Chave	16 – 40	Abrir
5	Chave	35 – 40	Fechar
6	Regulador de tensão	44 – 38	Tap: 0 a 8
7	Chave	40 – 41	Fechar

Fonte: Próprio autor

5.4.6.2 Sequência de chaveamento considerando Grupos-R que dependem de outros Grupos-R (Grupos-R em cascata)

Dois Grupos-R estão em cascata se a implementação dos chaveamentos de um primeiro Grupo-R é necessária para implementar os chaveamentos de um segundo Grupo-R. Um Grupo-R em cascata se caracteriza por possuir uma chave fechada em ambos os extremos desenergizados na configuração pós-falta.

Para incluir a dependência entre Grupos-R, modificações são realizadas nos passos (ii), (iv) e (viii) do algoritmo da seção 5.4.5. Os passos para gerar a sequência de chaveamento utilizando Super-grupos considerando a presença de Grupos-R em cascata são detalhados a seguir.

- i. Identificar os Grupos-R e Grupos-RCF. O sistema inicial está na configuração pós-falta. Ir ao passo ii.
- ii. Formar Super-grupos com cada Grupo-R. Verificar a existência de Grupos-R em cascata, caso existam, adicionar os Grupos-R em cascata nos Super-grupos para que seja possível implementar as ações de chaveamentos. Ir ao passo iii.
- iii. Calcular o índice de restauração de cada Super-grupo não utilizado. Ir ao passo iv. Caso não exista Super-grupo que não tenha sido utilizado, ir ao passo ix.
- iv. Selecionar o Super-grupo com melhor índice de restauração. Se o Super-grupo tem mais de um Grupo-R que não foi utilizado para executar as ações de chaveamento, identificar o Grupo-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. Ir ao passo v.
- v. Verificar a existência de Grupos-RCF não utilizados e com o mesmo alimentador associado ao Super-grupo em análise ($AA [\text{Grupo-RCF}] = AA [\text{Super-grupo}]$), e ir ao passo vi. Caso não exista Grupo-RCF não utilizado, incluir o Super-grupo na sequência final de

chaveamento, atualizar a topologia do sistema com os chaveamentos deste Super-grupo, e voltar ao passo *iii*.

vi. Verificar a existência de outros Super-grupos com o mesmo alimentador associado do Super-grupo em análise (AA [Super-grupo]), e ir ao passo *vii*. Caso contrário, adicionar os Grupos-RCF identificados no passo *v* ao Super-grupo em análise e voltar ao passo *iii*.

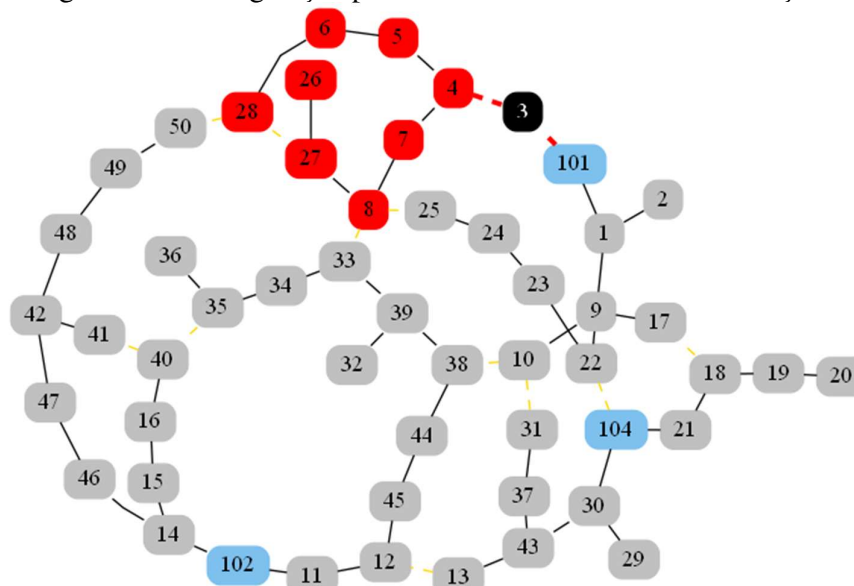
vii. Testar a implementação dos chaveamentos do Super-grupo em análise no sistema na configuração corrente. Se as restrições de operação são factíveis, incluir o Super-grupo na sequência final de chaveamentos, atualizar a topologia do sistema com os chaveamentos deste Super-grupo, e voltar ao passo *iii*. Caso contrário ir ao passo *viii*.

viii. Adicionar o Grupo-RCF ao Super-grupo em análise. No caso existir outros Super-grupos que possuam o Grupo-R em análise, adicionar também o Grupo-RCF nestes Super-grupos. Se existir dois ou mais Grupos-RCF identificados no passo *v*, criar novos Super-grupos com cada Grupo-RCF e os Super-grupos que incluam o Grupo-R em análise. Voltar ao passo *iii*.

ix. Sair do algoritmo.

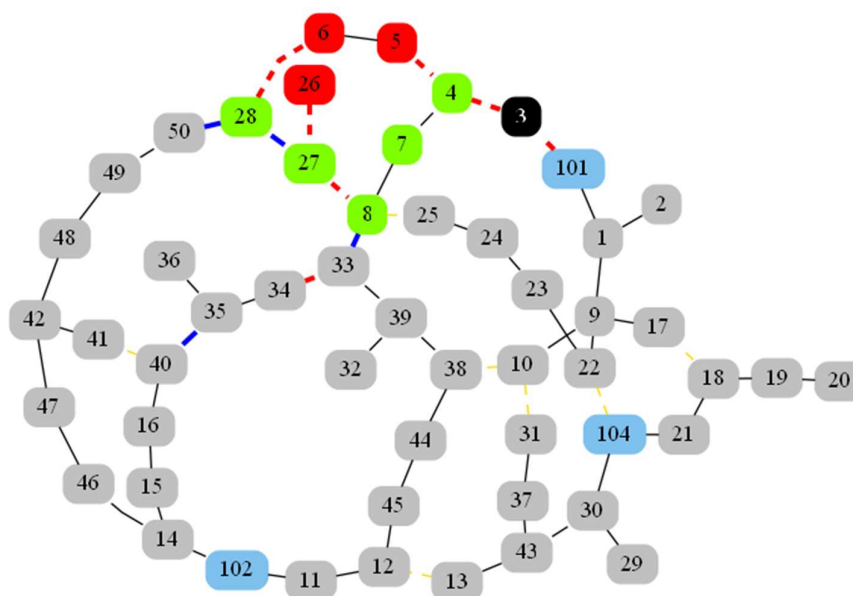
Para visualizar os passos descritos acima, o exemplo 8 é apresentado. No sistema de 53 nós (Figura 26), uma falta permanente ocorre na seção 3. O algoritmo de restauração fornece 9 chaveamentos para levar o sistema da configuração pós-falta (Figura 52) até a configuração final (Figura 53). Consideram-se chaves telecomandadas com tempo de manobra de 1 minuto, e tempo de reparo da falha de três horas.

Figura 52 – Configuração pós-falta do sistema com falta na seção 3



Fonte: próprio autor

Figura 53 – Configuração final do sistema com falta na seção 3



Fonte: próprio autor

Na Tabela 50 apresentam-se os grupos de chaveamentos para o exemplo em análise. Na Tabela 51 apresentam-se as características dos grupos de chaveamento. O sinal negativo da carga do Grupo-RCF #1 restaurada indica o corte de carga temporário que é necessário para realocar as seções de carga energizadas em alimentadores adjacentes.

Tabela 50 – Grupos de chaveamento no sistema de 53 nós após uma falta na seção 3

Grupo-R #1		Grupo-R #2		Grupo-R #3		Grupo-RCF #1	
Estado	Chave	Estado	Chave	Estado	Chave	Estado	Chave
Fechar	28 – 27	Fechar	8 – 33	Fechar	28 – 50	Fechar	35 – 40
Abrir	26 – 27	Abrir	27 – 8	Abrir	28 – 6	Abrir	34 – 33
Abrir	27 – 8	Abrir	5 – 4				

Fonte: próprio autor

Tabela 51 – Características dos grupos de chaveamento

Grupo	Carga Restaurada [p.u.]	Tempo de implementação [h]	Alimentador Associado
Grupo-R #1	0,01039	0,05000	102
Grupo-R #2	0,02772	0,03333	102
Grupo-R #3	0,00485	0,03333	102
Grupo-RCF #1	- 0,01663	0,03333	102

Fonte: próprio autor

Para gerar a sequência de chaveamento do processo restaurativo, no Estágio-1 inicia-se com a Tabela 52 indicando os Super-grupos e a Tabela 53 mostrando as características destes Super-grupos. Executando o passo (ii), o Grupo-R #3 é adicionado no Super-grupo #1, porque a chave do Grupo-R #1 com extremos nas seções 28 – 27 está desenergizada em ambos extremos após a falta permanente, sendo necessária a execução dos chaveamentos do Grupo-R #3 para energizar a seção 28. Em seguida, o Super-grupo #2 é selecionado para fazer parte da sequência de chaveamento e, executando o passo (vii) da heurística proposta, é realizada uma tentativa de implementação dos chaveamentos do Grupo-R #2 no sistema na configuração corrente, em que o limite de corrente é violado no alimentador com raiz na seção 102, e portanto o grupo-RCF #1 é adicionado ao Super-grupo #2. Finaliza-se o Estágio-1.

Tabela 52 – Super-grupos de chaveamento: Estágio-1

Super-grupo #1	Super-grupo #2	Super-grupo #3
Grupo-R #1	Grupo-R #2	Grupo-R #3
Grupo-R #3		

Fonte: próprio autor

Tabela 53 – Características dos Super-grupos de chaveamento: Estágio-1

Super-grupo	Carga Restaurada [p.u.]	Tempo [h]	IR [h⁻¹]	Alimentador Associado
Super-grupo #1	0,01525	0,08333	0,18295	102
Super-grupo #2	0,02772	0,05000	0,55400	102
Super-grupo #3	0,00485	0,03333	0,14553	102

Fonte: Próprio autor

Tabela 54 – Sequência de chaveamento

Estágio	Ação	Chaves
Isolamento da falta	Abrir	101 – 3
	Abrir	4 – 3
1	Abrir	34 – 33
2	Fechar	35 – 40
3	Abrir	5 – 4
4	Abrir	27 – 8
5	Fechar	8 – 33
6	Abrir	28 – 6
7	Fechar	28 – 50
8	Abrir	26 – 27
9	Fechar	28 – 27

Fonte: próprio autor

No Estágio-2, executando o passo (v), o Super-grupo #2 é selecionado para fazer parte da sequência de chaveamento final. No Estágio-3, o Super-grupo #1 é escolhido para fazer parte da sequência de chaveamento e, executando o passo (iv), o Super-grupo em análise é atualizado para o Super-grupo #3 o qual é selecionado para fazer parte da sequência de chaveamento. No Estágio-4, o Super-grupo #1 é selecionado para fazer parte da sequência de chaveamento. Com todos os Super-grupos selecionados, finaliza-se a heurística. A sequência de chaveamento obtida é apresentada na Tabela 54, com um valor de ENS igual a 11.282,04 kWh.

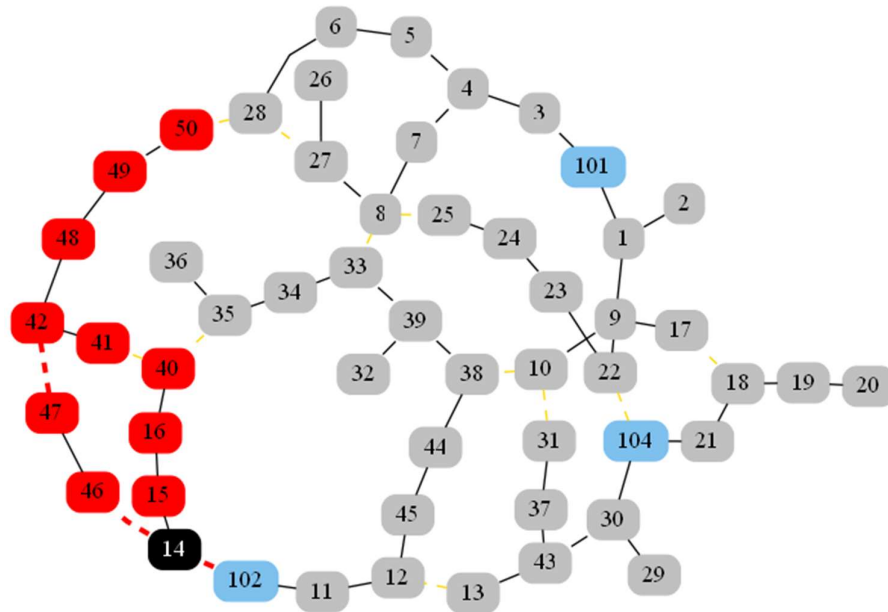
5.4.6.3 Sequência de chaveamento considerando geração distribuída em operação ilhada

Neste trabalho, é considera-se a presença de GD com a característica *black start* que permite a operação ilhada com grupos de cargas desenergizados após uma falha na rede de distribuição.

A quantidade de carga que opera de forma ilhada com um GD é limitada por uma porcentagem de segurança que é função da potência nominal do GD. Esta porcentagem de segurança tem o objetivo de evitar danos nos equipamentos por possíveis flutuações de potência e, normalmente, é uma proporção da potência máxima que o GD é capaz de fornecer. Normalmente esta porcentagem de segurança está no intervalo de 50 % - 70%. Os GDs baseados em tecnologias para operação em emergências podem ser ligados de forma rápida, e conseguem operar com carga máxima em relativos períodos curtos de tempo. Para determinar as regiões de carga que operam de forma ilhada com os GDs, na seção 5.5 é apresentada uma heurística que identifica as seções e os chaveamentos necessários na formação de cada ilha. Neste trabalho os chaveamentos que isolam a região em operação ilhada são considerados anteriores ao processo restaurativo e não fazem parte da sequência final de chaveamento. Para fins de exemplificar este caso, seja o exemplo 9 apresentado a seguir. O sistema de 53 nós encontra-se no estado inicial na Figura 26. Neste exemplo é assumido que todas as chaves são telecomandadas com tempo de operação de 1 minuto. Na seção 47 é instalado um GD de capacidade máxima de 4MW, que possui característica *black start*, com porcentagem de segurança de 50% e com tempo de energização de carga de 10 minutos. Na Figura 54 apresenta-se o sistema na configuração pós-falta após uma falta na seção 14, em que uma vez identificada a falta permanente as aberturas das chaves com extremos 102 – 14, 14 – 46 e 42 – 47 são realizadas para isolar a seção em falta e a região que opera de forma ilhada. Na Figura 55 é apresentado o sistema na configuração final, em que as seções em verde representam as seções com fornecimento restaurado, as seções em vermelho representam as seções com corte

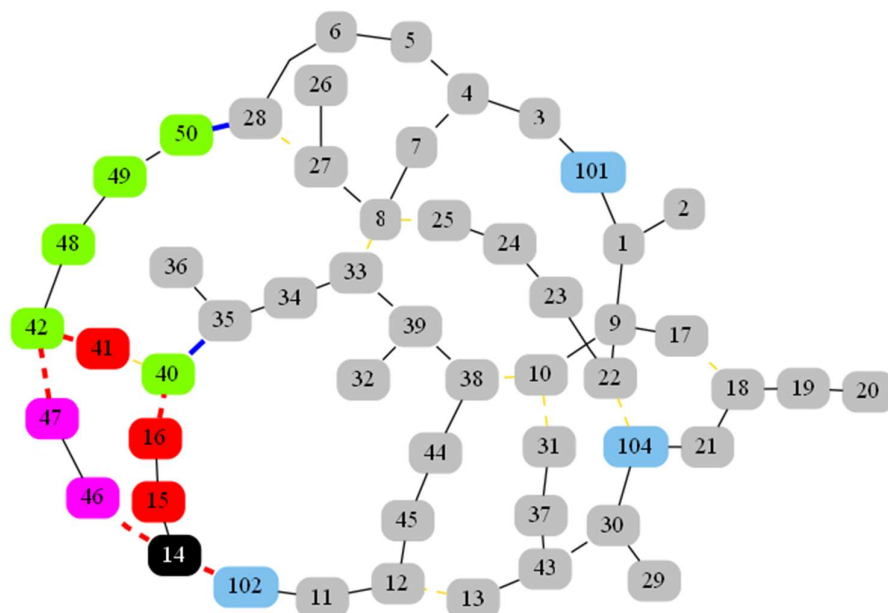
de carga e as seções em roxo representam as seções em operação ilhada. A tensão mínima na região ilhada é 0,998558 p.u. e corresponde ao nó 46. Os trechos contínuos em cor azul representam as chaves fechadas, enquanto que os trechos descontínuos na cor vermelha representam as chaves abertas para gerar a configuração final.

Figura 54 – Configuração pós-falta do sistema com falta na seção 14



Fonte: próprio autor

Figura 55 – Configuração final do sistema com falta na seção 14



Fonte: próprio autor

Na Tabela 55 apresenta-se a lista de chaveamentos necessários para levar o sistema da configuração pós-falta até a configuração final. A sequência de chaveamento final é apresentada na Tabela 56.

Tabela 55 – Listas de chaveamentos

Estado na configuração final	Extremos da chave
Abrir	42 – 41
	16 – 40
Fechar	28 – 50
	35 – 40

Fonte: próprio autor

Tabela 56 – Sequência de chaveamento

Estágio	Ação	Chaves
Isolamento da seção em falta e da região em operação ilhada	Abrir	102 – 14
	Abrir	14 – 46
	Abrir	47 – 42
1	Abrir	42 – 41
2	Fechar	28 – 50
3	Abrir	16 – 40
4	Fechar	35 – 40

Fonte: próprio autor

5.5 FORMAÇÃO DE MICRORREDES DINÂMICAS

A instalação de GD em sistemas de distribuição tem diferentes objetivos, entre os quais se encontra minimizar perdas no sistema, melhorar os perfis de tensão da rede, reduzir emissão de gases de efeito estufa, reduzir os custos de investimentos e operação, etc. Um modo importante de operação da GD é a operação ilhada com um conjunto de cargas em condições em que ocorrem faltas permanentes na rede.

Em cenários de contingências, a operação ilhada da GD fornece energia a um grupo de cargas locais aumentando a confiabilidade do sistema, e ainda, na presença de cargas termicamente controladas, a diversidade destas cargas especiais pode ser mantida evitando valores excessivos iniciais para a energização da rede durante a restauração, ou seja, evitando a condição CLPU.

Neste trabalho, os GDs considerados para o algoritmo de restauração têm capacidade de *black start*, permitindo que os mesmo operem de forma ilhada com um conjunto de cargas. A potência total deste conjunto de cargas não deve ultrapassar o 50% da capacidade de geração

do GD no instante de incidência da falta permanente para manter a margem de segurança frente às oscilações de potência. Em sistemas ilhados com vários GDs a margem de segurança é apenas considerada para o GD com maior capacidade de geração.

A formação de microrredes dinâmicas utilizando a RNP e a capacidade de operação ilhada de GD com *black start*, é realizada através do seguinte procedimento:

- i. Selecionar o GD com maior capacidade nas regiões que foram objeto de corte de carga. Ir ao passo ii. Caso não existir GD nestas regiões ir ao passo v.
- ii. Utilizando a seção do GD selecionado como nova raiz e as seções desenergizadas na sua vizinhança como elementos, organizar o conjunto de seções em uma matriz através da RNP. Ir ao passo iii.
- iii. Mantendo a potência do GD selecionado em 50% como a capacidade máxima da microrrede dinâmica, selecionar as seções em ordem de profundidade para compor o sistema ilhado. Se encontrar algum outro GD dentro da microrrede considerá-lo como carga negativa. Ir ao passo iv.
- iv. Uma vez selecionadas as seções do sistema ilhado, encontrar a operação necessária do grupo de chaves na matriz RNP para formar a microrrede. Voltar ao passo i e selecione um GD não utilizado.
- v. Finalizar o procedimento.

6 TESTES E RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos testes realizados para avaliar o método de solução proposto neste trabalho. Dois sistemas de distribuição foram utilizados, o primeiro é um sistema teste de 53 nós encontrado na literatura, e o segundo é um sistema real de 7052 nós de uma cidade do litoral brasileiro.

Este capítulo está organizado da seguinte forma: na seção 6.1 os parâmetros empregados no algoritmo de restauração são detalhados, na seção 6.2 os dois sistemas de distribuição utilizados para avaliar a metodologia proposta são apresentados, na seção 6.3 apresentam-se os testes utilizados para ambos os sistemas, na seção 6.4 apresentam-se os resultados para o sistema teste de 53 nós e, finalmente, na seção 6.5 os resultados para o sistema real de 7052.

6.1 PARÂMETROS

Nesta seção são apresentados os parâmetros utilizados para o algoritmo de Busca Tabu com Vizinhança Variável Reativa (Tabela 57), o modelo de função exponencial retardada para a condição CLPU (Tabela 58) (ALNUJAIMI; ABIDO; ALMUHAINI, 2018) e o modelo polinomial (ZIP) da carga (Tabela 59) (HAJAGOS; DANAI, 1998). Todos estes parâmetros foram os mesmos para o sistema teste de 53 nós e para o sistema de grande porte de 7052 nós. O algoritmo proposto para restauração de redes foi implementado em linguagem C++ e as simulações foram realizadas em um computador com processador Intel® Core™ i7 e 8GB de RAM.

Tabela 57 – Parâmetros da meta-heurística de Busca Tabu com Vizinhança Variável Reativa

Parâmetro	Valor
Número máximo de iterações	200
Número máximo de iterações sem melhorar a solução incumbente	15
Dimensão da lista tabu	10
Critério de aspiração	Melhorar a solução incumbente
K_V	$4 \cdot 10^6$
K_I	10^7
K_S	10^6

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Tabela 58 – Parâmetros do modelo de função exponencial retardada para a condição CLPU

Parâmetro	Valor
A	0,107
B	1,101
φ	0,7
α	1 hr ⁻¹
$t_2 - t_1$	0,5 hr

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Tabela 59 – Parâmetros para o modelo polinomial (ZIP) da carga

Parâmetro	Valor
γ^Z	0,5
γ^I	0,5
γ^P	0
ϕ^Z	1
ϕ^I	0
ϕ^P	0

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

6.2 SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZADOS

Nesta seção são apresentados os dois sistemas de distribuição utilizados para avaliar o algoritmo de restauração proposto. O primeiro é um sistema teste de pequeno porte de 53 nós, e o segundo é um sistema real de grande porte de uma cidade do litoral brasileiro com 7052 nós.

6.2.1 Sistema de 53 nós

O sistema de 53 nós é um sistema teste de pequeno porte encontrado na literatura (ROMERO *et al.*, 2016). Este sistema é um estágio intermediário da solução fornecida pelo problema de planejamento de sistemas de distribuição e, portanto, apresenta características diferenciadas. Por exemplo, o limite máximo de corrente em alguns trechos é próximo à corrente em operação normal, o que representa ser um dos principais limites físicos para a reconexão de cargas no problema de restauração, principalmente quando cargas termicamente controladas são consideradas na rede.

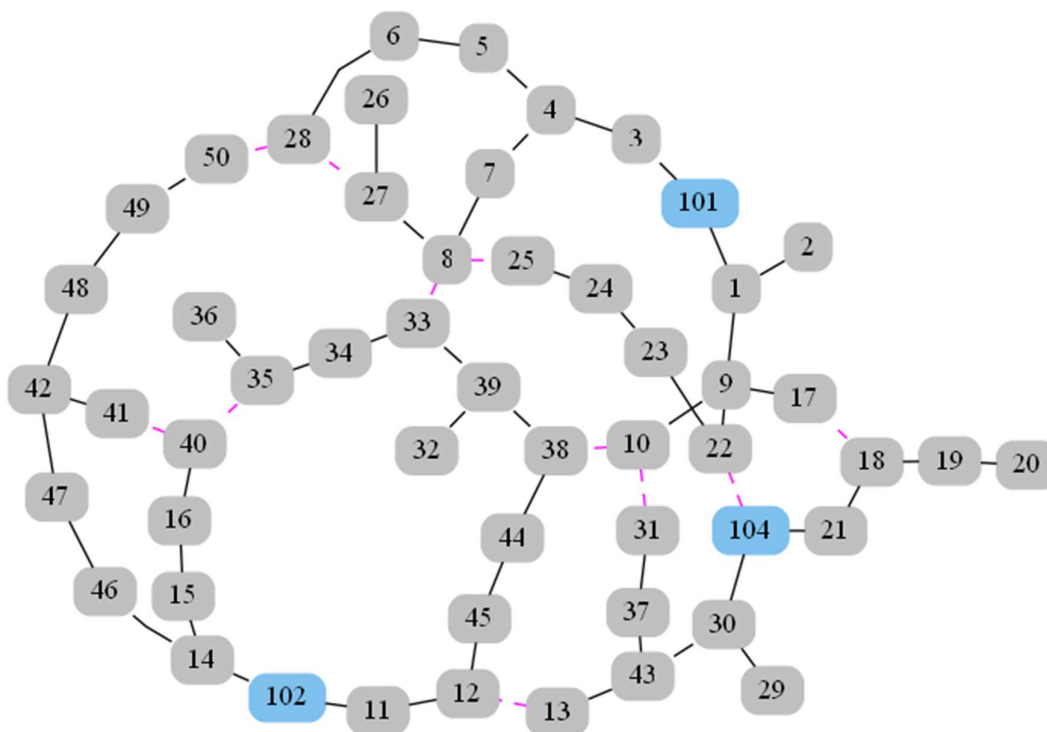
O sistema possui 53 nós, 3 subestações, 61 trechos, demanda ativa de 45.668,70 kW e demanda reativa de 22.118,24 kVAr. A tensão nominal é 13,8 kV com limites de magnitude de tensão definidos em 0,95 p.u. para tensão mínima e 1,05 p.u. para tensão máxima.

Neste sistema, cada nó é considerado como uma seção e cada trecho como uma chave. O diagrama unifilar deste sistema está representado na Figura 56, em que as linhas pretas e contínuas representam chaves normalmente fechadas, enquanto que as linhas roxas e descontínuas representam chaves normalmente abertas. Os nós 101, 102 e 104 na cor azul representam os nós de subestação, enquanto que os nós na cor cinza são nós pertencentes ao sistema de distribuição.

Neste sistema são adicionados três bancos de capacitores chaveados e um regulador de tensão. Os três bancos de capacitores são compostos por módulos de 300 kVAr e possuem capacidades máximas de 600 kVAr, 900 kVAr e 600 kVAr, alocados nas seções 7, 8 e 16, respectivamente. A chave entre as seções 44 e 38 é substituída por um regulador de tensão com a possibilidade de regular +/- 10% de tensão de entrada, com uma variação de tap de 0,00625 p.u., tap mínimo = - 16 e tap máximo = +16, a posição do tap inicial é 0.

Um gerador distribuído é instalado em uma barra de tensão controlada na seção 47 com tensão de referência de 1 p.u., possui capacidade de *black start* e tem capacidade de 4.000 kW de capacidade de geração ativa máxima e limite de fator de potência 0,9 capacitivo/indutivo.

Figura 56 – Sistema teste de 53 nós



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

6.2.2 Sistema de 7052 nós

O sistema de 7052 nós é um sistema real de grande porte de uma cidade do litoral brasileiro, e contém 7084 trechos, 707 chaves, 2 reguladores de tensão e 9 bancos de capacitores fixos com capacidades de 900 kVAr, 700 kVAr, 600 kVAr, 2000 kVAr, 600 kVAr, 1000 kVAr, 600 kVAr, 600 kVAr e 600 kVAr distribuídos entre cada um dos 9 alimentadores .

A rede tem uma demanda ativa total de 46.083,96 kW e demanda reativa total de 15.346,25 kVAr. A tensão nominal do sistema é 13,6 kV, e os limites de tensão no estado restaurativo são definidos em 0,92 p.u. para tensão mínima e 1,05 p.u. para tensão máxima.

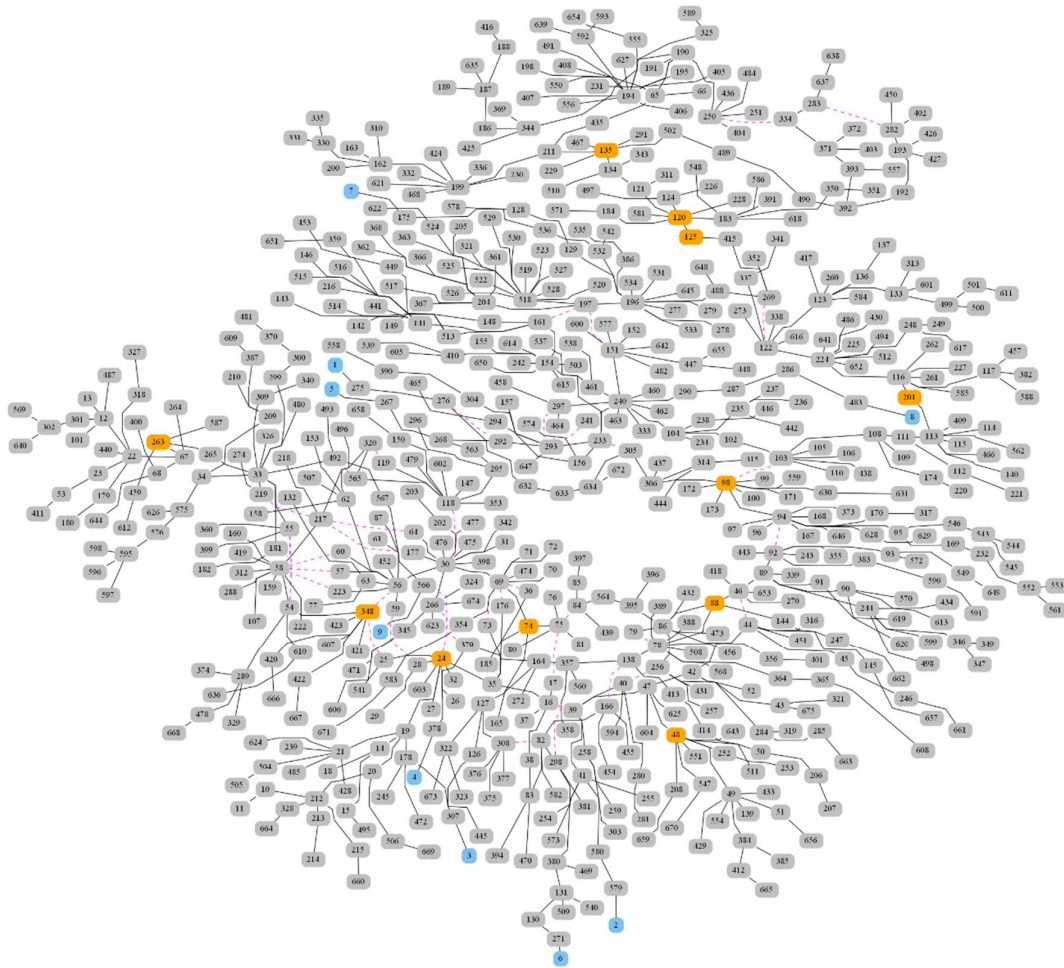
O diagrama unifilar deste sistema está representado na Figura 57, em que as linhas pretas e contínuas representam chaves normalmente fechadas, as linhas roxas e descontínuas representam chaves normalmente abertas. As seções 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9, em cor azul, representam as seções de início de cada alimentador, enquanto que as seções na cor cinza são seções de carga pertencentes ao sistema de distribuição.

As seções na cor laranja indicam a presença de equipamentos de controle de tensão: capacitores ou reguladores de tensão. Os capacitores da rede encontram-se instalados nas seções 24, 48, 74, 88, 98, 120, 201, 263 e 348; enquanto que os dois reguladores de tensão do sistema estão localizados nas seções 125 e 135.

Para fins do problema em análise os bancos de capacitores fixos são trocados por bancos de capacitores chaveados da seguinte forma: os bancos de capacitores com capacidades máximas de 900 kVAr, 700 kVAr, 600 kVAr, 2000 kVAr, 600 kVAr, 1000 kVAr, 600 kVAr, 600 kVAr e 600 kVAr, são trocados por bancos de capacitores chaveados com 3, 2, 2, 8, 2, 4, 2, 2 e 2 módulos, respectivamente, sendo que as suas capacidades máximas são mantidas.

Três geradores distribuídos estão conectados nas barras de tensão controlada com tensão de referência de 1 p.u., têm capacidade de *black start* e possuem limites de 800 kW, 200 kW e 700 kW de capacidade de geração ativa máxima e limite de fator de potência 0,9 capacitivo/indutivo, sendo instalados nas seções 669, 118 e 302, respectivamente.

Figura 57 – Sistema real de 7052 nós



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

6.3 TESTES UTILIZADOS PARA AVALIAR A METODOLOGIA PROPOSTA PARA AMBOS OS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

O algoritmo de restauração é validado mostrando os resultados obtidos para os testes da Tabela 60.

Tabela 60 – Descrição dos testes realizados para o sistema teste de 53 nós

Teste	Descrição
1	Resultados dos problemas de restauração e sequenciamento de chaves de forma integrada e separadamente.
2	Restauração utilizando as meta-heurísticas de Busca Tabu com Vizinhança Variável Reativa e Busca Tabu.
3	Restauração utilizando o modelo de carga dependente da tensão.
4	Restauração considerando que capacitores chaveados estão instalados na rede.
5	Restauração considerando a existência de capacitores chaveados, utilizando o modelo de carga dependente da tensão.
6	Restauração considerando a existência de capacitores chaveados, em que a injeção de potência reativa pelo capacitor é dependente da tensão.
7	Restauração considerando a existência de capacitores chaveados, utilizando o modelo de carga dependente da tensão e a injeção de potência reativa pelo capacitor dependente da tensão.
8	Restauração considerando a existência de regulador de tensão na rede, utilizando o modelo de carga dependente da tensão.
9	Restauração considerando a existência de capacitores chaveados e reguladores de tensão na rede, utilizando o modelo de carga dependente da tensão e a injeção de potência reativa pelo capacitor dependente da tensão.
10	Restauração considerando a existência de geração distribuída na rede, utilizando o modelo de carga dependente da tensão.
11	Restauração considerando a existência de geração distribuída, capacitores e reguladores de tensão na rede, utilizando o modelo de carga dependente da tensão e a injeção de potência reativa pelo capacitor dependente da tensão.
12	Restauração considerando a condição CLPU.
13	Restauração considerando a condição CLPU, utilizando o modelo de carga dependente da tensão.
14	Restauração considerando a condição CLPU e a existência de capacitores chaveados na rede, utilizando o modelo de carga dependente da tensão e a injeção de potência reativa pelo capacitor dependente da tensão.
15	Restauração considerando a condição CLPU e a existência de reguladores de tensão na rede, utilizando o modelo de carga dependente da tensão.
16	Restauração considerando a condição CLPU e a existência de capacitores chaveados e reguladores de tensão na rede, utilizando o modelo de carga dependente da tensão e a injeção de potência reativa pelo capacitor dependente da tensão.
17	Restauração considerando a condição CLPU e a existência de geração distribuída na rede, utilizando o modelo de carga dependente da tensão.
18	Restauração considerando a condição CLPU e a existência de geração distribuída, capacitores chaveados e reguladores de tensão na rede, utilizando o modelo de carga dependente da tensão e a injeção de potência reativa pelo capacitor dependente da tensão.

Fonte: Próprio autor

Para todos os testes, consideram-se chaves telecomandadas com tempo de manobra de um minuto, equipamentos de controle de tensão, também, telecomandados com tempo de movimento de tap de um segundo, e o controle centralizado da geração distribuída com capacidade de recuperar carga em operação ilhada em dez minutos com a característica *black start*. Para todos os testes adota-se a seguinte nomenclatura para analisar os resultados: R – porcentagem de carga restaurada, N – número de chaveamentos, P – número de movimentos de tap do equipamento de controle de tensão, T – tempo computacional, ENS – energia não suprida.

6.4 RESULTADOS PARA O SISTEMA DE 53 NÓS

O cenário considerado é uma falta permanente com tempo de reparo de 3 horas após a localização da falta. Para o grupo de resultados fornecidos pelos Testes 1-12, um esquema FLISR (*fault location, isolation and service restoration*) com chaves automáticas é considerado. Para o segundo grupo de resultados fornecidos pelos Testes 13-20, também com chaves automáticas, o processo de localização de falta não é automatizado, ou o algoritmo de localização de falta fracassa em encontrar uma resposta, aparecendo a condição CLPU pelo atraso (trinta minutos) no início do processo de restauração. Os cenários de faltas analisados são os seguintes: falta simples nos nós 3, 11, 14, 1, 21 e 30, e faltas múltiplas e simultâneas nos nós 1 e 21, e 1, 14 e 21.

6.4.1 Teste 1

Nesta seção são apresentados os resultados para os problemas de restauração e sequenciamento de chaves quando eles são considerados de forma integrada e de forma separada, utilizando a meta-heurística de Busca Tabu com Vizinhança Variável Reativa. A abordagem separada de ambos os problemas é denominada de Estratégia-1, enquanto que a abordagem integrada é chamada de Estratégia-2, na Tabela 61 estão resumidas ambas as abordagens. Neste teste os controles de bancos de capacitores e reguladores de tensão instalados no sistema não são considerados, e apenas operações de chaveamentos são permitidas na restauração. A presença de geração distribuída também é desconsiderada. Na Tabela 62 e 63 são apresentados os resultados utilizando a Estratégia-1 e Estratégia-2, respectivamente.

Tabela 61 – Estratégias de solução

Estratégia	Descrição	Função objetivo do problema de restauração
Estratégia-1	Resolver sequencialmente os problemas de restauração e sequenciamento de chaves	Carga não restaurada + Número de chaveamentos
Estratégia-2	Integração dos problemas de restauração e sequenciamento de chaves	Energia não suprida

Fonte: próprio autor

Tabela 62 – Resultados do Teste 1 utilizando a Estratégia-1.

Falta	R [%]	N	T [s]	ENS [kWh]
3	57,94	9	0,04	11282,04
11	100	7	0,01	1271,66
14	40,17	5	0,08	16827,20
01	84,69	3	0,01	12050,12
21	100	1	0,01	3781,47
30	78,79	3	0,01	8444,21
1, 21	88,64	6	0,01	16152,68
1, 14, 21	65,86	11	0,04	33305,58

Fonte: Próprio autor

Tabela 63 – Resultados do Teste 1 utilizando a Estratégia-2.

Falta	R [%]	N	T [s]	ENS [kWh]
3	57,94	9	0,21	11282,04
11	100	7	0,03	1271,66
14	40,17	5	0,11	16827,20
01	84,69	3	0,01	12050,12
21	100	1	0,01	3781,47
30	78,79	3	0,01	8444,21
1, 21	88,64	6	0,01	16152,68
1, 14, 21	65,86	11	0,08	33305,58

Fonte: Próprio autor

Analisando os resultados obtidos para ambas as estratégias, observa-se que as respostas são da mesma qualidade em relação a cada cenário de falta. Esta característica é porque se trata de um sistema de pequeno porte com poucas variáveis de decisão e que está sendo considerada apenas a existência de chaves telecomandadas na rede. Quando utilizado o sistema de grande porte para realizar a mesma análise na seção 12.4.1, a Estratégia-2 apresenta soluções de melhor qualidade.

6.4.2 Teste 2

Para o segundo teste, os resultados utilizando a meta-heurística de Busca Tabu clássica (Tabela 64) e a meta-heurística proposta, a Busca Tabu com Vizinhança Variável Reativa (Tabela 65), são apresentados. Neste teste foi utilizada a Estratégia-2 detalhada na seção anterior. Os controles de bancos de capacitores e reguladores de tensão instalados no sistema não são considerados, e apenas operações de chaveamentos são permitidas na restauração. A existência de geração distribuída na rede também é desconsiderada.

Tabela 64 – Resultados do Teste 2 utilizando a meta-heurística Busca Tabu.

Falta	R [%]	N	T [s]	ENS [kWh]
3	38,32	7	0,06	15404,24
11	100	9	0,05	1431,05
14	40,17	5	0,03	16827,20
01	84,69	3	0,01	12050,12
21	100	1	0,01	3781,47
30	78,79	3	0,01	8444,21
1, 21	88,64	6	0,02	16187,33
1, 14, 21	65,86	11	0,05	33340,23

Fonte: Próprio autor

Tabela 65 – Resultados do Teste 2 com a meta-heurística Busca Tabu com Vizinhança Variável Reativa.

Falta	Iteração em que a característica reativa é ativada	R [%]	N	T [s]	ENS [kWh]
3	5	57,94	9	0,21	11282,04
11	–	100	7	0,03	1271,66
14	6	40,17	5	0,11	16827,20
01	–	84,69	3	0,01	12050,12
21	–	100	1	0,01	3781,47
30	–	78,79	3	0,01	8444,21
1, 21	–	88,64	6	0,01	16152,68
1, 14, 21	7	65,86	11	0,08	33305,58

Fonte: Próprio autor

Conclui-se a partir resultados apresentados nas Tabelas 64 e 65, que a meta-heurística proposta neste trabalho oferece soluções de igual ou melhor qualidade que a meta-heurística de Busca Tabu clássica. Para os cenários de faltas simples nos nós 3 e 11, e falta múltipla nos nós 1 e 21, e 1, 14 e 21, o algoritmo proposto fornece melhores resultados. No cenário de falta permanente no nó 11, o algoritmo de Busca Tabu clássica precisa de mais chaveamentos e mais tempo computacional para encontrar uma solução que restaure a totalidade das cargas

desligadas. Este comportamento pode ser explicado porque a Busca Tabu clássica considera como parte da sua estrutura de vizinhança inicial o operador CUT, que permite realizar a operação de corte de carga a partir da primeira iteração. Logo, a exploração do espaço de busca está orientado, inicialmente, na região com corte de carga, mas com as variáveis de operação (tensão nos nós ou corrente pelos ramos) dentro dos limites preestabelecidos. Embora soluções de boa qualidade possam ser encontradas utilizando a Busca Tabu clássica, o algoritmo falha em encontrar um ótimo de melhor qualidade para este cenário de falta. Uma análise semelhante pode ser realizada para o cenário de falta no nó 3, em que o algoritmo proposto consegue um melhor valor numérico de ENS quando comparado com os resultados da Tabelas 64 e 65, restaurando mais carga com mais chaveamentos.

Uma das principais motivações para propor a meta-heurística de Busca Tabu com Vizinhança Variável Reativa, é poder encontrar os mesmos ótimos globais obtidos utilizando otimização clássica (ROMERO *et al.*, 2016). Neste sentido, é possível afirmar que, para o problema de restauração, as abordagens baseadas em meta-heurísticas e as abordagens baseadas em otimização clássica podem ser complementares entre si. A principal desvantagem da otimização clássica está na dificuldade de encontrar soluções para sistemas com um grande número de variáveis de decisão ao mesmo tempo que precisa de tempos computacionais elevados para um problema que deve ser resolvido em tempo real, como é o problema de restauração, enquanto que técnicas baseadas em meta-heurísticas encontram soluções de boa qualidade para sistemas de grande porte, em tempos computacionais relativamente baixos. Porém duas dificuldades são encontradas ao se utilizar meta-heurísticas, a primeira é que não é possível saber se a solução encontrada é ótima para o problema em análise, e a segunda é a quantidade de parâmetros que devem ser calibrados. Portanto, pode-se concluir que a melhor estratégia para resolver o problema de restauração para sistemas de grande porte deve ser baseada em técnicas meta-heurísticas, utilizando as soluções fornecidas pela otimização clássica como *benchmarking*, para calibrar os parâmetros necessários das meta-heurísticas.

Em relação à característica reativa do algoritmo proposto, na Tabela 65 pode ser verificado que quando é necessário corte de carga para obter uma solução factível, a característica reativa é ativada entre as iterações 5 e 7 para os cenários de falta apresentados. Com relação ao tempo computacional, a estratégia proposta necessita, normalmente, de um maior tempo computacional em contraste com a abordagem baseada na Busca Tabu clássica.

6.4.3 Teste 3

Neste teste é analisada a influência do modelo polinomial, ou ZIP, da carga no sistema teste em análise. Este modelo de carga é utilizado com o objetivo de aproximar o comportamento da demanda com a realidade. Nesta seção os controles de bancos de capacitores e reguladores de tensão instalados no sistema não são considerados, e apenas operações de chaveamentos são permitidas na restauração. A presença de geração distribuída também é desconsiderada. Os resultados deste teste são apresentados na Tabela 66.

Tabela 66 – Resultados do Teste 3.

Falta	R [%]	N	T [s]	ENS [kWh]
3	57,94	9	0,19	11282,04
11	100	7	0,03	1271,66
14	47,86	6	0,08	15018,47
01	84,69	3	0,01	12050,12
21	100	1	0,01	3781,47
30	78,79	3	0,01	8444,21
1, 21	88,64	6	0,01	16152,68
1, 14, 21	69,48	12	0,13	31559,22

Fonte: Próprio autor

De acordo com a Tabela 66, os resultados para falta simples no nó 14 e falta múltipla nos nós 1, 14 e 21, são melhorados ao considerar o modelo de carga polinomial. No cenário de falta no nó 14 o valor da ENS foi reduzido, aumentando a quantidade de carga restaurada utilizando um chaveamento a mais. De forma análoga, no cenário de falta múltipla nos nós 1, 14 e 21, o valor da ENS foi reduzido, restaurando mais carga utilizando doze chaveamentos. O tempo computacional, em média, se manteve próximo quando comparado com os resultados da Tabela 65. A melhora nos resultados pode ser explicada em que o comportamento da dependência da carga com relação à tensão, reduz o montante de demanda no sistema, o que permite a reenergização de mais consumidores.

6.4.4 Teste 4

Neste teste é analisada a influência nos resultados quando considerada o controle de capacitores chaveados no processo de restauração em uma rede de distribuição. Na Tabela 67 são apresentados os resultados obtidos para o sistema em análise, em que é utilizado o modelo de carga de potência constante e a injeção de potência reativa pelos capacitores é considerada, também, constante. Neste teste a presença da geração distribuída é desconsiderada.

Tabela 67 – Resultados do Teste 4.

Falta	R [%]	N	P	T [s]	ENS [kWh]
3	57,94	9	5	0,25	11274,15
11	100	7	0	0,05	1271,66
14	40,17	5	0	0,11	16827,20
01	84,69	3	0	0,01	12050,12
21	100	1	0	0,01	3781,47
30	78,79	3	0	0,01	8444,21
1, 21	88,64	6	0	0,01	16152,68
1, 14, 21	65,86	11	0	0,11	33305,58

Fonte: Próprio autor

Os resultados obtidos considerando a presença de capacitores chaveados são de igual, ou melhor qualidade quando comparados com as soluções obtidas na Tabela 65. No cenário de falta permanente no nó 3 é possível observar que o valor da ENS diminui utilizando nove chaveamentos e cinco movimentos de taps. Este resultado de melhor qualidade é porque o controle dos capacitores chaveados permite a reconexão rápida de cargas no sistema, reduzindo o valor da ENS.

6.4.5 Teste 5

Neste teste é analisada a influência do modelo de carga polinomial, quando considerado o controle de capacitores chaveados como parte do processo restaurativo. Nesta análise é considerada a injeção de potência reativa dos capacitores como sendo constante. Na Tabela 68 são apresentados os resultados obtidos para o sistema em análise, em que a existência da geração distribuída é desconsiderada.

Tabela 68 – Resultados do Teste 5.

Falta	R [%]	N	P	T [s]	ENS [kWh]
3	65,42	6	5	0,34	9537,80
11	100	7	0	0,05	1271,66
14	47,86	6	0	0,13	15018,47
01	84,69	3	0	0,01	12050,12
21	100	1	0	0,01	3781,47
30	78,79	3	0	0,02	8444,21
1, 21	88,64	6	0	0,01	16152,68
1, 14, 21	69,48	12	0	0,13	31559,22

Fonte: Próprio autor

Quando comparados os resultados das Tabelas 66 e 68 (ambos consideram o modelo polinomial da carga), verifica-se que os resultados obtidos nesta seção são de igual, ou de melhor qualidade. No cenário de falta no nó 3, o valor da ENS diminui utilizando seis chaveamentos e cinco movimentos de tap, porém o valor de injeção de potência reativa pelos capacitores é considerado constante, embora deva ser considerada como dependente da tensão no nó de instalação. Esta análise é realizada nas seções posteriores.

6.4.6 Teste 6

Para este teste analisa-se a influência do controle de capacitores chaveados no processo de restauração, considerando o modelo de carga constante e a injeção de potência reativa dos capacitores dependente da tensão. Neste teste a presença de geração distribuída é desconsiderada.

Tabela 69 – Resultados do Teste 6.

Falta	R [%]	N	P	T [s]	ENS [kWh]
3	57,94	9	5	0,29	11274,15
11	100	7	0	0,03	1271,66
14	40,17	5	0	0,12	16827,20
01	84,69	3	0	0,01	12050,12
21	100	1	0	0,03	3781,47
30	78,79	3	0	0,01	8444,21
1, 21	88,64	6	0	0,02	16152,68
1, 14, 21	65,86	11	0	0,12	33305,58

Fonte: Próprio autor

Nos resultados apresentados na Tabela 69, é possível verificar que para uma falta no nó 3, o controle dos capacitores chaveados melhora o resultado do valor numérico da ENS quando comparado com o resultado da Tabela 65.

Verifica-se que se a solução do Teste 5 para o cenário de falta no nó 3 é utilizado nesta seção, a solução é infactível devido ao modelo de carga considerado, uma vez que no Teste 5 é utilizado um modelo de carga dependente da tensão, que resulta em uma redução do montante de demanda no sistema.

Para finalizar a análise da influência dos capacitores no processo restaurativo, na seguinte seção são apresentados os resultados quando a carga e os capacitores são considerados como dependentes da tensão.

6.4.7 Teste 7

Neste teste analisa-se a influência do controle de capacitores chaveados no processo de restauração. Nesta análise utiliza-se o modelo de carga depende da tensão e a injeção de potência reativa dos capacitores, também, depende da tensão. Na Tabela 70 são apresentados os resultados obtidos para o sistema em análise. Neste teste a presença de geração distribuída é desconsiderada.

Tabela 70 – Resultados do Teste 7.

Falta	R [%]	N	P	T [s]	ENS [kWh]
3	65,42	6	5	0,31	9537,80
11	100	7	0	0,05	1271,66
14	47,86	6	0	0,12	15018,47
01	84,69	3	0	0,01	12050,12
21	100	1	0	0,04	3781,47
30	78,79	3	0	0,01	8444,21
1, 21	88,64	6	0	0,01	16152,68
1, 14, 21	69,48	12	0	0,12	31559,22

Fonte: Próprio autor

Nos resultados obtidos da Tabela 70, verifica-se que é possível melhorar os resultados da restauração quando são considerados os controles dos capacitores chaveados no sistema. Particularmente, a solução quando assumida uma falta no nó 3 é melhorado utilizando cinco movimentos de tap junto com seis chaveamentos na sequência de chaveamento.

6.4.8 Teste 8

Neste teste analisa-se a influência do controle de um regulador de tensão como parte do processo restaurativo. Nesta análise é utilizado o modelo de carga dependente da tensão. Na Tabela 71 são apresentados os resultados para o sistema em análise, em que a presença de geração distribuída é desconsiderada.

Tabela 71 – Resultados do Teste 8.

Falta	R [%]	N	P	T [s]	ENS [kWh]
3	57,94	9	0	0,25	11282,04
11	100	7	0	0,04	1271,66
14	47,86	6	0	0,11	15018,47
01	84,69	3	0	0,01	12050,12
21	100	1	0	0,01	3781,47
30	78,79	3	0	0,02	8444,21
1, 21	88,64	6	0	0,01	16152,68
1, 14, 21	69,48	12	0	0,12	31559,22

Fonte: Próprio autor

Analisando os resultados da Tabela 71, o controle do regulador de tensão não influencia significativamente nos resultados do problema de restauração, uma vez que o sistema em análise é limitado mais significativamente pelos valores de corrente nos trechos do que pela magnitude de tensão nos nós.

6.4.9 Teste 9

Para este teste analisa-se a influência do controle de capacitores chaveados e um regulador de tensão como parte do processo restaurativo no sistema de distribuição. Nesta análise utiliza-se um modelo de carga depende da tensão e a injeção de potência reativa dos capacitores, também, dependente da tensão. Na Tabela 72 são apresentados os resultados para o sistema em análise, em que a presença de geração distribuída é desconsiderada.

Tabela 72 – Resultados do Teste 9.

Falta	R [%]	N	P	T [s]	ENS [kWh]
3	65,42	6	5	0,37	9537,80
11	100	7	0	0,04	1271,66
14	47,86	6	0	0,11	15018,47
01	84,69	3	0	0,01	12050,12
21	100	1	0	0,01	3781,47
30	78,79	3	0	0,03	8444,21
1, 21	88,64	6	0	0,01	16152,68
1, 14, 21	69,48	12	0	0,15	31559,22

Fonte: Próprio autor

Nos resultados apresentados na Tabela 72, é possível verificar a melhora da qualidade da resposta do problema de restauração quando considerados os equipamentos de controle de tensão como parte do algoritmo de solução. No cenário de falta no nó 3 o valor da ENS diminui de 11.282,04 kWh (Tabela 66), para 9.537,80 kWh. Em geral, o tempo computacional é maior que nos testes anteriores porque mais variáveis de controle são consideradas, e uma maior quantidade de soluções candidatas deve ser avaliada.

6.4.10 Teste 10

Neste teste analisa-se a influência do controle de geração distribuída, com característica *black start* no processo restaurativo. Nesta análise utiliza-se um modelo de carga depende da tensão. Na Tabela 73 são apresentados os resultados para o sistema em

análise, em que os controles de bancos de capacitores e reguladores de tensão instalados no sistema não são considerados.

Tabela 73 – Resultados do Teste 10.

Falta	R [%]	N	T [s]	ENS [kWh]
3	57,94	9	0,27	11282,04
11	100	7	0,02	1271,66
14	71,79	5	0,07	9455,98
01	84,69	3	0,01	12050,12
21	100	1	0,01	3781,47
30	78,79	3	0,01	8444,21
1, 21	88,64	6	0,01	16152,68
1, 14, 21	80,72	11	0,11	25990,97

Fonte: Próprio autor

Dos resultados apresentados na Tabela 73, é possível verificar a influência que a geração distribuída tem no problema de restauração. No caso de falta simples no nó 14, e faltas múltiplas nos nós 1, 14 e 21, os valores da ENS e carga restaurada são melhorados, porque um grupo de cargas opera de forma ilhada com o gerador distribuído localizado no nó 47.

6.4.11 Teste 11

Neste teste analisa-se a influência que o controle de geração distribuída, capacitores chaveados e um regulador de tensão têm no processo restaurativo, utilizando um modelo de carga dependente da tensão e a injeção de potência reativa pelos capacitores, também, dependente da tensão. Os resultados são apresentados na Tabela 74.

Tabela 74 – Resultados do Teste 11.

Falta	R [%]	N	P	T [s]	ENS [kWh]
3	65,42	6	5	0,55	9537,80
11	100	7	0	0,04	1271,66
14	71,79	5	0	0,11	9455,98
01	84,69	3	0	0,01	12050,12
21	100	1	0	0,01	3781,47
30	78,79	3	0	0,02	8444,21
1, 21	88,64	6	0	0,01	16152,68
1, 14, 21	80,72	11	0	0,13	25990,97

Fonte: Próprio autor

Na Tabela 74 verifica-se a melhor qualidade da função objetivo que resulta em considerar geração distribuída e equipamentos de controle de tensão como parte do procedimento de restauração. No caso de falta simples no nó 3 o valor da ENS é reduzido quando utilizado movimentos de tap dos equipamentos de controle de tensão, e nos cenários de falta no nó 14 e falta múltipla nos nós 1, 14 e 21, os valores de ENS são melhorados quando é considerada a operação ilhada dos geradores distribuídos. Porém o tempo computacional é maior em comparação com os testes anteriores, embora nenhum deles ultrapasse um segundo, comportamento que está dentro do esperado desde que se trata de um sistema teste de pequeno porte.

6.4.12 Teste 12

Para este teste é observada a influência que a condição CLPU tem no processo restaurativo. Como estratégia de solução é utilizada a restauração passo-a-passo (*step-by-step restoration*) com o objetivo de minimizar os efeitos da falta permanente no sistema. Nesta análise o modelo de carga constante é utilizado e os resultados obtidos são apresentados na Tabela 75. Neste teste os controles de bancos de capacitores e reguladores de tensão instalados no sistema não são considerados, e apenas operações de chaveamentos são permitidas na restauração. A presença da geração distribuída também é desconsiderada.

Tabela 75 – Resultados do Teste 12.

Falta	Step 1			Step 2			Step 3			ENS [kWh]
	N	R (%)	T [s]	N	R (%)	T [s]	N	R (%)	T [s]	
3	7	44,86	0,24	0	44,86	0,14	0	44,86	0,14	14056,35
11	10	97,71	0,06	1	100	0,19	0	100	0,01	1647,03
14	4	29,91	0,07	0	29,91	0,07	0	29,91	0,07	19239,99
01	3	84,69	0,01	0	84,69	0,01	0	84,69	0,01	12069,75
21	1	100	0,01	0	100	0,02	0	100	0,01	3781,47
30	3	78,79	0,01	0	78,79	0,01	0	78,79	0,01	8463,84
1, 21	9	82,58	0,04	0	82,58	0,04	0	82,58	0,06	17878,25
1, 14, 21	9	52,21	0,08	0	52,21	0,06	0	52,21	0,06	40065,80

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

A ativação da condição CLPU resulta em cargas iniciais excessivas para a reenergização da rede durante a restauração. Como verificado na Tabela 75, o montante de carga que pode ser reconectado é menor em comparação com os testes anteriores e, como consequência, o valor numérico da ENS é incrementado. Na Tabela 75, cada *step* ou passo, indica a tentativa de reenergização das cargas no sistema, separados por intervalos de tempo

de uma hora. Devido ao limite de corrente nos ramos do sistema, em muitos cenários de faltas o valor de carga que é possível reconectar não se altera a partir do primeiro *step*.

Um caso especial acontece quando é simulada uma falta permanente no nó 11, em que no primeiro *step*, é possível restaurar o 97,71 % da carga desconectada utilizando dez chaveamentos, de tal forma que a carga reconectada consegue recuperar diversidade, tornando possível que na segunda tentativa de reconexão, *step 2*, a totalidade da carga seja reconectada. Por outro lado, o tempo computacional necessário para a maioria dos testes é incrementado pela necessidade de corte de carga.

6.4.13 Teste 13

Neste teste verifica-se como variam os resultados de restauração quando considerado o modelo polinomial da carga para um sistema de distribuição em condição CLPU. Na Tabela 76 são apresentados os resultados obtidos em que apenas operações de chaveamentos são permitidas na restauração.

Tabela 76 – Resultados do Teste 13.

Falta	Step 1			Step 2			Step 3			ENS [kWh]
	N	R (%)	T [s]	N	R (%)	T [s]	N	R (%)	T [s]	
3	7	44,86	0,46	0	44,86	0,17	0	44,86	0,17	14056,35
11	7	100	0,03	0	100	0,01	0	100	0,01	1302,84
14	4	29,91	0,07	0	29,91	0,09	0	29,91	0,24	19239,99
01	3	84,69	0,01	0	84,69	0,01	0	84,69	0,01	12069,75
21	1	100	0,01	0	100	0,01	0	100	0,01	3781,47
30	3	78,79	0,02	0	78,79	0,01	0	78,79	0,01	8463,84
1, 21	7	82,58	0,03	0	82,58	0,04	1	88,64	0,01	17264,94
1, 14, 21	11	57,83	0,12	0	57,83	0,04	1	61,04	0,03	36787,91

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Quando comparado os resultados das Tabelas 75 e 76, é possível verificar uma melhoria nos valores da ENS, nos cenários de falta simples no nó 11, e faltas múltiplas nos nós 1, 14 e 21.

Nos próximos testes, a influência dos equipamentos de controle de tensão nos resultados do problema de restauração em redes distribuição com condição CLPU é analisada.

6.4.14 Teste 14

Neste teste é observada a influência que o controle de capacitores chaveados exerce no processo restaurativo em um sistema de distribuição em condição CLPU. Para esta análise é utilizado o modelo de carga dependente da tensão e a injeção de potência reativa dos capacitores, também, dependente da tensão. Os resultados são apresentados na Tabela 77. Neste teste a presença de geração distribuída é desconsiderada.

Tabela 77 – Resultados do Teste 14.

Falta	Step 1				Step 2				Step 3				ENS [kWh]
	N	P	R (%)	T [s]	N	P	R (%)	T [s]	N	P	R (%)	T [s]	
3	7	5	54,21	0,70	0	0	54,21	0,25	0	0	54,21	0,25	12042,99
11	7	0	100	0,04	0	0	100	0,01	0	0	100	0,01	1302,84
14	4	0	29,91	0,10	0	0	29,91	0,12	0	0	29,91	0,30	19239,99
01	3	0	84,69	0,01	0	0	84,69	0,01	0	0	84,69	0,01	12069,75
21	1	0	100	0,01	0	0	100	0,01	0	0	100	0,01	3781,47
30	3	0	78,79	0,02	0	0	78,79	0,01	0	0	78,79	0,01	8463,84
1, 21	7	0	82,58	0,05	0	0	82,58	0,09	1	0	88,64	0,01	17264,94
1, 14, 21	11	0	57,83	0,17	0	0	57,83	0,07	1	0	61,04	0,06	36787,91

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Ao comparar os resultados das Tabelas 76 e 77 verifica-se que os resultados obtidos neste teste são de igual, ou melhor, qualidade. No cenário de falta no nó 3, o controle dos capacitores chaveados permite melhorar o valor da ENS utilizando sete chaveamentos e cinco movimentos de tap.

O tempo computacional aumenta em relação aos testes anteriores devido ao aumento das variáveis de controle.

6.4.15 Teste 15

Neste teste observa-se a influência que o controle do regulador de tensão tem no processo restaurativo em um sistema de distribuição em condição CLPU. Para esta análise, é utilizado o modelo de carga dependente da tensão e a presença de geração distribuída é desconsiderada. Os resultados são apresentados na Tabela 78.

Tabela 78 – Resultados do Teste 15.

Falta	Step 1				Step 2				Step 3				ENS [kWh]
	N	P	R (%)	T [s]	N	P	R (%)	T [s]	N	P	R (%)	T [s]	
3	7	0	44,86	0,53	0	0	44,86	0,26	0	0	44,86	0,24	14056,35
11	7	0	100	0,05	0	0	100	0,01	0	0	100	0,01	1302,84
14	4	0	29,91	0,09	0	0	29,91	0,10	0	0	29,91	0,25	19239,99
01	3	0	84,69	0,14	0	0	84,69	0,01	0	0	84,69	0,01	12069,75
21	1	0	100	0,01	0	0	100	0,01	0	0	100	0,01	3781,47
30	3	0	78,79	0,18	0	0	78,79	0,01	0	0	78,79	0,01	8463,84
1, 21	7	0	82,58	0,04	0	0	82,58	0,07	1	0	88,64	0,01	17264,94
1, 14, 21	11	0	57,83	0,14	0	0	57,83	0,06	1	0	61,04	0,05	36787,91

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Como pode ser observado na Tabela 78 o controle do regulador de tensão não proporciona melhorias significativas no processo de restauração, porque o principal limitante na restauração do sistema é a corrente nos trechos e não as magnitudes de tensões nos nós da rede.

6.4.16 Teste 16

Para este teste observa-se a influência que o controle de capacitores chaveados e de um regulador de tensão têm no processo restaurativo em um sistema de distribuição em condição CLPU. Para esta análise utiliza-se o modelo de carga dependente da tensão, a injeção de potência reativa pelos capacitores, também, dependente da tensão e a presença de geração distribuída é desconsiderada. Os resultados são apresentados na Tabela 79.

Tabela 79 – Resultados do Teste 16.

Falta	Step 1				Step 2				Step 3				ENS [kWh]
	N	P	R (%)	T [s]	N	P	R (%)	T [s]	N	P	R (%)	T [s]	
3	7	5	54,21	0,68	0	0	54,21	0,22	0	0	54,21	0,22	12042,99
11	7	0	100	0,05	0	0	100	0,01	0	0	100	0,01	1302,84
14	4	0	29,91	0,01	0	0	29,91	0,12	0	0	29,91	0,29	19239,99
01	3	0	84,69	0,06	0	0	84,69	0,01	0	0	84,69	0,01	12069,75
21	1	0	100	0,01	0	0	100	0,01	0	0	100	0,01	3781,47
30	3	0	78,79	0,02	0	0	78,79	0,01	0	0	78,79	0,01	8463,84
1, 21	7	0	82,58	0,05	0	0	82,58	0,07	1	0	88,64	0,01	17264,94
1, 14, 21	11	0	57,83	0,14	0	0	57,83	0,06	1	0	61,04	0,06	36787,91

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Quando comparados os resultados das Tabelas 76 e 79, verifica-se que os resultados obtidos neste teste são de igual, ou melhor, qualidade. Particularmente, no cenário de falta no nó 3 o valor da ENS é melhorado com o controle de equipamentos de controle de tensão. Em relação ao tempo computacional, este é incrementado ao considerar mais variáveis de decisão.

6.4.17 Teste 17

Neste teste é analisada a influência da geração distribuída no processo restaurativo em uma rede de distribuição em condição CLPU. Nesta análise, o modelo de carga dependente da tensão é utilizado, porém, os controles de bancos de capacitores e reguladores de tensão instalados no sistema não são considerados. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 80.

Tabela 80 – Resultados do Teste 17.

Falta	Step 1			Step 2			Step 3			ENS [kWh]
	N	R (%)	T [s]	N	R (%)	T [s]	N	R (%)	T [s]	
3	7	44,86	0,39	0	44,86	0,18	0	44,86	0,19	14056,35
11	7	100	0,03	0	100	0,01	0	100	0,01	1302,84
14	3	48,72	0,07	2	48,72	0,15	0	48,72	0,10	14893,72
01	3	84,69	0,11	0	84,69	0,01	0	84,69	0,01	12069,75
21	1	100	0,01	0	100	0,01	0	100	0,01	3781,47
30	3	78,79	0,01	0	78,79	0,01	0	78,79	0,01	8463,84
1, 21	7	82,58	0,03	0	82,58	0,05	1	88,64	0,01	17264,94
1, 14, 21	10	66,67	0,11	2	66,67	0,05	1	69,88	0,04	32397,75

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Nos resultados obtidos da Tabela 80, pode ser verificada que a geração distribuída melhora o valor da função objetivo do problema. No caso de falta simples no nó 14 e faltas múltiplas nos nós 1, 14 e 21, a característica *black start* permite a operação ilhada do gerador distribuído com um grupo de cargas desconectadas após a falta, o qual proporciona a redução do valor da ENS final. Em ambos os casos ocorre um resultado interessante no *step 2*, em que o montante de carga reenergizada não aumenta, mas dois chaveamentos são utilizados. Este comportamento é explicado pela transferência de carga da seção 42, de um sistema ilhado no *step 1*, até o sistema de distribuição primário no *step 2*. Normalmente a operação ilhada não é um tipo de operação padrão nos sistemas de distribuição, e é utilizado apenas em situações de contingências. Portanto, neste trabalho foi considerado que quando for possível, a carga alimentada de forma ilhada deve retornar à rede principal de distribuição.

6.4.18 Teste 18

Neste teste, é analisada a influência nos resultados do problema da presença e controle de geração distribuída, capacitores chaveados e um regulador de tensão, na rede em condição CLPU. Nesta análise considera-se o modelo de carga dependente da tensão, e a injeção de potência reativa dos capacitores, também, dependente da tensão. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 81.

Tabela 81 – Resultados do Teste 18.

Falta	Step 1				Step 2				Step 3				ENS [kWh]
	N	P	R (%)	T [s]	N	P	R (%)	T [s]	N	P	R (%)	T [s]	
3	7	5	54,21	0,70	0	0	54,21	0,22	0	0	54,21	0,22	12042,99
11	7	0	100	0,05	0	0	100	0,01	0	0	100	0,01	1302,84
14	3	0	48,72	0,13	2	0	48,72	0,20	0	0	48,72	0,13	14893,72
01	3	0	84,69	0,01	0	0	84,69	0,01	0	0	84,69	0,01	12069,75
21	1	0	100	0,01	0	0	100	0,01	0	0	100	0,01	3781,47
30	3	0	78,79	0,02	0	0	78,79	0,01	0	0	78,79	0,01	8463,84
1, 21	7	0	82,58	0,05	0	0	82,58	0,07	1	0	88,64	0,01	17264,94
1, 14, 21	10	0	66,67	0,15	2	0	66,67	0,08	1	0	69,88	0,07	32397,75

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Os resultados obtidos, em geral, são de melhor qualidade quando considerada a geração distribuída e os equipamentos de controle de tensão como parte dos procedimentos de restauração. No cenário de falta no nó 3, o valor da ENS é melhorado pela presença de equipamentos de controle de tensão. Nos cenários de falta no nó 14 e faltas múltiplas nos nós 1, 14 e 21, o valor da ENS é reduzido pela presença de geração distribuída e a capacidade de fornecimento ilhado com um grupo de cargas desenergizadas após a falta. Por outro lado, o tempo computacional aumenta pela quantidade de variáveis de controle que o algoritmo deve considerar na busca por soluções de boa qualidade.

6.5 RESULTADOS PARA O SISTEMA REAL DE 7052 NÓS

O cenário considerado é uma falta permanente com tempo de reparo de 3 horas após a localização da falta, em uma quarta-feira às 18 horas. Nesse intervalo de tempo, segundo a curva de carga do sistema, o horário com maior carregamento é às 20h, o qual será adotado como dado de entrada para o algoritmo de restauração. Para o grupo de resultados formado pelos Testes 1 – 12, um esquema FLISR (*fault location, isolation and service restoration*) com chaves automáticas é considerado. Para o segundo grupo de resultados formado pelos Testes 13 – 20, também com chaves automáticas, o processo de localização de faltas não é

automatizado ou falha em encontrar uma resposta, aparecendo a condição CLPU pelo atraso (trinta minutos) no início do processo de restauração. Os cenários de falta analisados são os seguintes: uma falta no começo de cada um dos nove alimentadores, desconectando a totalidade das cargas no alimentador em análise.

6.5.1 Teste 1

Nesta seção são apresentados os resultados para os problemas de restauração e sequenciamento de chaves quando abordados de forma separada e de forma integrada utilizando a meta-heurística de Busca Tabu com Vizinhança Variável Reativa. A abordagem separada de ambos os problemas é denominada de Estratégia-1, enquanto que a abordagem integrada é referenciada como Estratégia-2, na Tabela 82 são resumidas ambas as abordagens. Neste teste os controles de bancos de capacitores e reguladores de tensão instalados no sistema não são considerados, e apenas operações de chaveamentos são permitidas na restauração. A presença de geração distribuída também é desconsiderada.

Tabela 82 – Estratégias de solução

Estratégia	Descrição	Função objetivo do problema de restauração
Estratégia-1	Resolver separada e sequencialmente os problemas de restauração e sequenciamento de chaves	Carga não restaurada + Número de chaveamentos
Estratégia-2	Integração dos problemas de restauração e sequenciamento de chaves	Energia não suprida

Fonte: próprio autor

Nas Tabelas 83 e 84 são apresentados os resultados utilizando a Estratégia-1 e Estratégia-2, respectivamente.

Tabela 83 – Resultados do Teste 1 utilizando a Estratégia-1.

Falta	R [%]	N	T [s]	ENS [kWh]
1	100	1	1,09	76,81
2	100	5	2,51	339,58
3	100	1	2,71	76,81
4	100	1	2,12	76,81
5	100	1	4,11	76,81
6	100	3	4,97	437,36
7	100	1	0,24	12,39
8	100	3	12,57	280,05
9	79,08	17	28,94	5981,08

Fonte: Próprio autor

Tabela 84 – Resultados do Teste 1 utilizando a Estratégia–2.

Falta	R [%]	N	T [s]	ENS [kWh]
1	100	1	1,20	76,81
2	100	5	8,72	196,38
3	100	1	2,76	76,81
4	100	1	2,15	76,81
5	100	1	4,19	76,81
6	100	3	4,85	437,36
7	100	1	0,23	12,39
8	100	3	12,74	280,05
9	78,90	14	172,32	5725,73

Fonte: Próprio autor

Como pode ser verificado nas Tabelas 83 e 84, os resultados utilizando a Estratégia–2 são de igual, ou melhor, qualidade que os obtidos utilizando a Estratégia–1, porém o tempo computacional exigido pela Estratégia–2 é maior principalmente quando um corte de carga é necessário no sistema. Dos nove casos de faltas permanentes, em oito casos é possível reconectar o 100% dos usuários utilizando entre 1 a 5 chaveamentos. Porém, para o último alimentador não é possível restaurar a totalidade dos consumidores, sendo necessário um corte de carga para manter as variáveis de operação nos limites permitidos. Um caso interessante aparece quando é considerada uma falta permanente no começo do Alimentador 9. Utilizando a Estratégia–1 é possível restaurar mais carga que utilizando a Estratégia–2, porém o valor da ENS é menor utilizando a segunda estratégia. Este fato é explicado porque na segunda estratégia procura-se minimizar o valor de ENS durante toda a exploração do espaço de busca, procurando reenergizar a maior quantidade de cargas no menor tempo possível. Outro caso interessante acontece quando é considerada uma falta permanente no início do Alimentador 2. Neste cenário, ambas as estratégias restauram a totalidade de consumidores utilizando cinco chaveamentos, porém o valor da ENS utilizando a segunda estratégia é menor. Para entender este resultado no cenário de falta no Alimentador 2, é necessário visualizar ambas as soluções do ponto de vista da Estratégia–1. Para a primeira estratégia, os resultados obtidos nas Tabelas 83 e 84 têm o mesmo valor de função objetivo, porque ambas restauram a mesma quantidade de consumidores utilizando o mesmo número de chaveamentos, porém na segunda estratégia analisam-se ambas as soluções de forma diferente, porque no resultado apresentado na Tabela 84 reconecta-se um grupo de consumidores de forma rápida com o intuito de minimizar o valor da ENS, diferente da primeira estratégia que deixa a reconexão destas cargas para estágios posteriores.

6.5.2 Teste 2

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos com as meta-heurísticas de Busca Tabu e Busca Tabu com Vizinhança Variável Reativa, para o sistema sob análise, utilizando-se a Estratégia-2 detalhada na seção anterior. Os resultados para uma falta no começo de cada alimentador do sistema utilizando a meta-heurística de Busca Tabu são apresentados na Tabela 85, enquanto que os resultados utilizando a meta-heurística de Busca Tabu com Vizinhança Variável Reativa são apresentados na Tabela 86. Neste teste os controles de bancos de capacitores e reguladores de tensão instalados no sistema não são considerados, e apenas operações de chaveamentos são permitidas na restauração. A presença de geração distribuída também é desconsiderada.

Tabela 85 – Resultados do Teste 2 utilizando a meta-heurística Busca Tabu.

Falta	R [%]	N	T [s]	ENS [kWh]
1	100 %	1	4,24	76,81
2	100 %	9	34,15	223,24
3	100 %	1	7,24	76,81
4	100 %	1	4,95	76,81
5	100 %	1	8,03	76,81
6	100 %	3	6,05	437,36
7	100 %	1	0,24	12,39
8	100 %	3	17,42	280,05
9	73,98 %	6	21,23	6194,23

Fonte: Próprio autor

Tabela 86 – Resultados do Teste 2 utilizando a meta-heurística Busca Tabu com Vizinhança Variável Reativa.

Falta	Iteração em que a característica reativa é ativada	R [%]	N	T [s]	ENS [kWh]
1	–	100	1	1,20	76,81
2	–	100	5	8,72	196,38
3	–	100	1	2,76	76,81
4	–	100	1	2,15	76,81
5	–	100	1	4,19	76,81
6	–	100	3	4,85	437,36
7	–	100	1	0,23	12,39
8	–	100	3	12,74	280,05
9	7	78,90	14	172,32	5725,73

Fonte: Próprio autor

Analisando-se as Tabelas 85 e 86, é possível concluir que a meta-heurística de Busca Tabu com Vizinhança Variável Reativa fornece resultados de igual, ou melhor, qualidade que a meta-heurística de Busca Tabu clássica, porém, o tempo computacional exigido é maior, principalmente, se um corte de carga é necessário (Alimentador 9). Este aumento no tempo computacional pode ser explicado na demora na ativação da característica reativa do algoritmo, a qual permite a inclusão do operador CUT na estrutura de vizinhança, permitindo o corte de carga necessário no sistema. Por outro lado, quando é possível reconectar a totalidade dos consumidores na rede (Alimentadores 1 – 8), a meta-heurística de Busca Tabu clássica precisa de maior tempo computacional ou um número maior de chaveamentos. Isto devido que o operador CUT faz parte da estrutura de vizinhança desde o começo da exploração do espaço de busca, orientando a busca de soluções candidatas em regiões em que as variáveis de operação são factíveis ainda que algum corte de carga seja necessário.

6.5.3 Teste 3

Nos testes apresentados nesta seção, o modelo ZIP da carga é utilizado com o intuito de simular o comportamento da demanda no sistema de forma mais realista. Neste teste os controles de bancos de capacitores e reguladores de tensão instalados no sistema não são considerados, e apenas operações de chaveamentos são permitidas na restauração. A presença de geração distribuída também é desconsiderada.

Tabela 87 – Resultados do Teste 3.

Falta	R [%]	N	T [s]	ENS [kWh]
1	100 %	1	0,26	76,81
2	100 %	1	0,74	76,81
3	100 %	1	2,95	76,81
4	100 %	1	2,26	76,81
5	100 %	1	0,31	76,81
6	100 %	3	8,67	421,74
7	100 %	1	0,26	12,39
8	100 %	3	11,59	264,43
9	80,99 %	10	29,33	4983,29

Fonte: Próprio autor

Nos resultados apresentados na Tabela 87, verifica-se que quando é utilizado o modelo de carga dependente da tensão a qualidade das respostas melhora. No cenário de falta permanente no começo do Alimentador 2 é necessário apenas um chaveamento para restaurar a totalidade da carga, enquanto que para o cenário de falta no começo do Alimentador 9, o

número de chaveamentos foi reduzido e os valores de ENS e carga restaurada foram melhorados quando comparados com os resultados da Tabela 86. A melhoria nos resultados se explica no fato que a dependência da carga com a tensão reduz a montante de demanda no sistema, permitindo reconectar mais consumidores em um menor tempo, minimizando o valor da ENS.

6.5.4 Teste 4

Nesta seção, considera-se o controle de capacitores chaveados como parte do algoritmo de restauração. Na Tabela 88 são apresentados os resultados obtidos para o sistema em análise, em que é utilizado o modelo de carga de potência constante e a injeção de potência reativa constante pelos capacitores. Neste teste a presença de geração distribuída é desconsiderada.

Tabela 88 – Resultados do Teste 4

Falta	R [%]	N	P	T [s]	ENS [kWh]
1	100	1	0	1,91	76,81
2	100	1	9	12,70	88,33
3	100	1	0	4,63	76,81
4	100	1	0	3,73	76,81
5	100	1	0	7,07	76,81
6	100	3	0	9,14	437,36
7	100	1	0	0,45	12,39
8	100	3	0	22,61	280,05
9	80,90	15	2	207,56	5405,35

Fonte: Próprio autor

Quando comparados os resultados da Tabela 88 com os resultados da Tabela 86 (cargas com potência constante), é possível verificar a melhoria na qualidade das soluções ao considerar o controle de capacitores chaveados como parte da estratégia de restauração. No cenário de falta permanente no Alimentador 2 o valor da ENS é reduzido à metade, e uma operação de chaveamento e nove movimentos de tap são necessários para reconectar a totalidade de da demanda no sistema, a diferença em relação ao resultado na Tabela 86 em que cinco chaveamentos são utilizados no processo de reenergização. No cenário de falta permanente no Alimentador 9, uma melhoria nos valores de ENS e porcentagem de carga restaurada é conseguida utilizando quinze chaveamentos e dois movimentos de tap, em contraste com os 14 chaveamentos necessários do teste da Tabela 86. Por outro lado, o tempo computacional necessário em todos os casos aumentou como pode ser verificado na Tabela

88. Este aumento no tempo de processamento é congruente com o fato de que um maior espaço de busca é explorado, porque a existência de mais variáveis de controle fornece mais alternativas de soluções.

6.5.5 Teste 5

Nesta seção são apresentados os resultados do algoritmo de restauração considerando o controle de capacitores chaveados, utilizando o modelo de carga dependente da tensão e a injeção constante de potência reativa pelos capacitores. Na Tabela 89 são apresentados os resultados obtidos para o sistema em análise. Neste teste a presença de geração distribuída é desconsiderada.

Tabela 89 – Resultados do Teste 5

Falta	R [%]	N	P	T [s]	ENS [kWh]
1	100	1	0	0,45	76,81
2	100	1	0	1,19	76,81
3	100	1	0	5,01	76,81
4	100	1	0	3,90	76,81
5	100	1	0	0,45	76,81
6	100	3	0	13,96	421,74
7	100	1	0	0,45	12,39
8	100	3	0	21,88	264,43
9	81,99	10	1	53,43	4770,53

Fonte: Próprio autor

Os resultados obtidos na Tabela 89 são, em geral, de igual, ou melhor, qualidade que os resultados apresentados na Tabela 87 (modelo de carga dependente da tensão). No cenário de falta no início do Alimentador 9, um movimento de tap de capacitor chaveado permite uma melhoria no montante de carga restaurada e no valor da ENS, quando comparado com o resultado obtido na Tabela 87 para o mesmo cenário de falta. Porém, o tempo computacional aumenta devido que mais variáveis de controle devem ser levadas em consideração pelo algoritmo de restauração.

Nesta seção foi considerado um modelo de carga dependente da tensão, porém a potência reativa fornecida pelos capacitores é também dependente do valor da tensão. Esta dependência com a tensão é analisada em testes posteriores.

6.5.6 Teste 6

Nos testes apresentados nesta seção considera-se o controle de capacitores chaveados como parte das variáveis de controle do algoritmo de restauração, em que é considerado o modelo de carga constante, e a injeção de potência reativa por parte dos capacitores como dependente da tensão no nó de instalação. Neste teste a presença de geração distribuída é desconsiderada.

Tabela 90 – Resultados do Teste 6

Falta	R [%]	N	P	T [s]	ENS [kWh]
1	100	1	0	1,96	76,81
2	100	1	10	13,10	89,61
3	100	1	0	4,85	76,81
4	100	1	0	3,67	76,81
5	100	1	0	7,12	76,81
6	100	3	0	9,14	437,36
7	100	1	0	0,45	12,39
8	100	3	0	22,87	280,05
9	79,90	13	1	209,17	5416,43

Fonte: Próprio autor

Comparando os resultados da Tabela 90 com os resultados da Tabela 88, os valores de ENS são de pior qualidade, porque a injeção de potência reativa do capacitor depende do valor de tensão no nó instalação. No cenário de falta no Alimentador 2, dez movimentos de tap são necessários para reconectar o 100% da carga da rede.

Nos resultados da Tabela 88, a posição final dos taps nos capacitores instalados nos nós 12652 e 14682 são 2 e 7, fornecendo um montante de potência reativa no sistema de 700 kVAr e 1750 kVAr, respectivamente. No entanto, nos resultados da Tabela 90 a posição final dos taps dos capacitores instalados nos mesmos nós é de 2 e 8, fornecendo 640 kVAr e 1845 kVAr, respectivamente, porque a potência reativa fornecida depende da magnitude da tensão no nó de instalação. Por outro lado, para o cenário de falta no Alimentador 9 menos chaveamentos e menos movimentos de tap são necessários (Tabela 90), obtendo um maior valor numérico de ENS. Este comportamento do algoritmo está dentro do esperado porque a injeção de potência reativa é dependente da tensão, portanto, a montante de potência reativa fornecida por parte dos capacitores deve ser menor em nós com magnitudes de tensão menores a 1 p.u.

6.5.7 Teste 7

Nesta seção, com o intuito de obter um modelo mais próximo na realidade, um modelo de carga dependente da tensão e injeção de potência reativa dos capacitores é utilizado quando considerado o controle de capacitores chaveados como parte do algoritmo de restauração em sistemas de distribuição. Na Tabela 91 são apresentados os resultados obtidos para o sistema em análise. Neste teste a presença de geração distribuída é desconsiderada.

Tabela 91 – Resultados do Teste 7

Falta	R [%]	N	P	T [s]	ENS [kWh]
1	100	1	0	0,47	76,81
2	100	1	0	1,23	76,81
3	100	1	0	4,77	76,81
4	100	1	0	3,73	76,81
5	100	1	0	0,45	76,81
6	100	3	0	14,11	421,74
7	100	1	0	0,46	12,39
8	100	3	0	21,92	264,43
9	81,99	10	1	52,53	4770,53

Fonte: Próprio autor

Nos resultados obtidos na Tabela 91 é possível observar que uma melhoria no valor da ENS é encontrada para o cenário de falta no Alimentador 9, utilizando um movimento de tap e dez chaveamentos. Os resultados da Tabela 91 são semelhantes aos resultados apresentados na Tabela 89, porém o valor de injeção de potência reativa pelo capacitor muda para o cenário de falta no Alimentador 9. Na Tabela 91, o montante de potência reativa injetada pelo capacitor no nó 24938 é 286,98 kVAr devido à dependência da injeção de reativos com a magnitude de tensão no nó de instalação, diferente com o valor de 300 kVAr no resultado da Tabela 89.

6.5.8 Teste 8

Nesta seção são apresentados os resultados para o problema de restauração considerando o controle de reguladores de tensão, utilizando o modelo de carga dependente da tensão. Na Tabela 92 são apresentados os resultados para o sistema em análise. Neste teste a presença de geração distribuída é desconsiderada.

Tabela 92 – Resultados do Teste 8

Falta	R [%]	N	P	T [s]	ENS [kWh]
1	100	1	0	0,44	76,81
2	100	1	0	0,74	76,81
3	100	1	0	2,79	76,81
4	100	1	0	2,20	76,81
5	100	1	0	0,45	76,81
6	100	3	0	8,76	421,74
7	100	1	0	0,42	12,39
8	100	3	0	20,15	264,43
9	80,99	10	0	28,92	4983,29

Fonte: Próprio autor

Dos resultados apresentados na Tabela 92, observa-se que a presença de reguladores de tensão não influencia significativamente nos resultados quando comparado com os resultados na Tabela 87.

6.5.9 Teste 9

Nesta seção apresentam-se os resultados obtidos para o problema de restauração considerando o controle de capacitores chaveados e reguladores de tensão, utilizando o modelo de carga dependente da tensão e a injeção de potência reativa pelo capacitor dependente da tensão. Os resultados são apresentados na Tabela 93 para o sistema em análise. Neste teste a presença de geração distribuída é desconsiderada.

Tabela 93 – Resultados do Teste 9

Falta	R [%]	N	P	T [s]	ENS [kWh]
1	100	1	0	0,46	76,81
2	100	1	0	2,07	76,81
3	100	1	0	12,15	76,81
4	100	1	0	7,52	76,81
5	100	1	0	0,43	76,81
6	100	3	0	14,02	421,74
7	100	1	0	0,45	12,39
8	100	3	0	25,57	264,43
9	81,99	10	1	54,13	4770,53

Fonte: Próprio autor

Nos resultados apresentados, verifica-se uma melhoria dos resultados no cenário de falta permanente no Alimentador 9, em que um movimento de tap de capacitor é utilizado para reduzir o valor da função objetivo. O tempo computacional é incrementado porque uma

maior quantidade de variáveis de controle é considerada na execução do algoritmo de restabelecimento.

6.5.10 Teste 10

Nesta seção são apresentados os resultados dos testes com o algoritmo de restauração quando considerada a presença de geração distribuída, utilizando o modelo de carga dependente da tensão. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 94. Neste teste os controles de bancos de capacitores e reguladores de tensão instalados no sistema não são considerados.

Tabela 94 – Resultados do Teste 10

Falta	R [%]	N	T [s]	ENS [kWh]
1	100	1	0,29	76,81
2	100	1	1,12	76,81
3	100	1	6,27	76,81
4	100	1	4,24	76,81
5	100	1	0,34	76,81
6	100	3	13,61	421,74
7	100	1	0,34	12,39
8	100	3	15,29	264,43
9	85,45	9	39,11	3944,27

Fonte: Próprio autor

Para o cenário de falta permanente no Alimentador 9, a presença de geração distribuída melhora o valor da ENS e a porcentagem de carga restaurada, devido à possibilidade de operação ilhada com um grupo de usuários desenergizados da rede. Desta forma, a característica *black start* da geração distribuída permite melhorar os índices de continuidade no sistema, particularmente o valor da ENS.

6.5.11 Teste 11

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos para o algoritmo de restauração considerando a presença de geração distribuída, controle de capacitores chaveados e reguladores de tensão, utilizando um modelo de carga dependente da tensão e a injeção de potência reativa pelos capacitores, dependente da tensão. Os resultados são apresentados na Tabela 95.

Tabela 95 – Resultados do Teste 11

Falta	R [%]	N	P	T [s]	ENS [kWh]
1	100	1	0	0,53	76,81
2	100	1	0	1,82	76,81
3	100	1	0	12,03	76,81
4	100	1	0	7,60	76,81
5	100	1	0	0,51	76,81
6	100	3	0	23,10	421,74
7	100	1	0	0,58	12,39
8	100	3	0	32,42	264,43
9	86,45	9	1	73,89	3730,27

Fonte: Próprio autor

Os resultados obtidos na Tabela 95 e comparados com a Tabela 94, permitem concluir que são de igual, ou melhor, qualidade. No cenário de falta no Alimentador 9, a presença de geração distribuída permite a operação ilhada com um grupo de cargas locais, melhorando o valor da ENS. Enquanto que o tempo computacional aumenta devido à presença e a necessidade de controle de mais equipamentos como parte da estratégia de solução.

6.5.12 Teste 12

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos com o algoritmo de restauração quando ativada a característica CLPU no sistema de distribuição, o modelo de carga constante é utilizado neste teste. Na Tabela 96 são apresentados os resultados obtidos. Neste teste os controles de bancos de capacitores e reguladores de tensão instalados no sistema não são considerados, e apenas operações de chaveamentos são permitidas na restauração. A presença de geração distribuída também é desconsiderada.

Tabela 96 – Resultados do Teste 12

Falta	Step 1			Step 2			Step 3			ENS [kWh]
	N	R (%)	T [s]	N	R (%)	T [s]	N	R (%)	T [s]	
01	1	100	4,03	0	100	0,22	0	100	0,21	76,81
02	6	91,36	8,73	4	95,39	4,03	0	95,39	13,95	1231,43
03	3	100	9,46	0	100	0,26	0	100	0,21	156,40
04	3	100	5,92	0	100	0,22	0	100	0,21	172,68
05	1	100	7,47	0	100	0,22	0	100	0,21	76,81
06	5	100	7,51	0	100	0,22	0	100	0,20	580,22
07	3	100	25,06	0	100	0,21	0	100	0,21	28,11
08	9	100	25,01	0	100	0,22	0	100	0,20	630,87
09	11	65,71	223,34	5	68,16	90,96	4	70,89	167,13	7742,95

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

A presença de cargas termicamente controladas e sua perda de diversidade após uma desconexão prolongada, e ativa a condição CLPU dificultando o processo restaurativo. Na Tabela 96 são apresentados os resultados quando é considerada uma falta no início de cada alimentador, em que cada *step* indica a tentativa de reenergização das cargas, separados por intervalos de uma hora. Para os cenários de falta nos Alimentadores 1, 3, 4, 5, 6, 7 e 8, é possível restaurar a totalidade da carga utilizando entre um a nove chaveamentos. Para os cenários de falta nos Alimentadores 2 e 9, não é possível restaurar 100% das cargas. Nas próximas seções do texto são considerados diferentes equipamentos para auxiliar o processo de restauração, considerando a condição CLPU.

6.5.13 Teste 13

Nesta seção são apresentados os resultados para o sistema de distribuição em condição CLPU utilizando o modelo de carga dependente da tensão. Na Tabela 97 são apresentados os resultados obtidos. Neste teste os controles de bancos de capacitores e reguladores de tensão instalados no sistema não são considerados, e apenas operações de chaveamentos são permitidas na restauração. A presença de geração distribuída também é desconsiderada.

Tabela 97 – Resultados do Teste 13

Falta	Step 1			Step 2			Step 3			ENS [kWh]
	N	R (%)	T [s]	N	R (%)	T [s]	N	R (%)	T [s]	
01	1	100	4,04	0	100	0,21	0	100	0,21	76,81
02	7	97,88	10,08	2	100	0,21	0	100	0,22	570,88
03	1	100	6,88	0	100	0,22	0	100	0,21	76,81
04	3	100	6,29	0	100	0,22	0	100	0,21	161,36
05	1	100	7,69	0	100	0,21	0	100	0,21	76,81
06	5	100	7,64	0	100	0,21	0	100	0,20	574,73
07	3	100	26,06	0	100	0,23	0	100	0,21	25,37
08	5	100	13,53	0	100	0,22	0	100	0,21	378,26
09	12	67,53	294,96	10	69,98	460,83	3	72,80	378,09	7341,87

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

O modelo de carga dependente da tensão é utilizado com o objetivo de realizar a análise de acordo com a realidade do comportamento da rede. Nos resultados obtidos verificam-se que os valores na Tabela 97 são de igual, ou melhor, qualidade que os das soluções obtidas na Tabela 96. Os resultados para os cenários de falta nos Alimentadores 2, 3, 4, 6, 7, 8 e 9, são de melhor qualidade ao diminuir o valor numérico da ENS correspondente.

No caso do Alimentador 2, o algoritmo de restauração utiliza menos *steps* e chaveamentos para restaurar a totalidade das cargas.

6.5.14 Teste 14

Nesta seção são obtidos resultados para o sistema de distribuição em análise considerando a ativação da condição CLPU, o controle de capacitores chaveados, utilizando o modelo de carga dependente da tensão e a injeção de potência reativa pelos capacitores, dependente da tensão. Os resultados são apresentados na Tabela 98. Neste teste a presença de geração distribuída é desconsiderada.

Tabela 98 – Resultados do Teste 14

Falta	Step 1				Step 2				Step 3				ENS [kWh]
	N	P	R (%)	T [s]	N	P	R (%)	T [s]	N	P	R (%)	T [s]	
01	1	0	100	2,09	0	0	100	0,22	0	0	100	0,22	76,81
02	3	3	100	18,45	0	0	100	0,22	0	0	100	0,21	168,55
03	1	0	100	4,95	0	0	100	0,22	0	0	100	0,21	76,81
04	1	2	100	12,37	0	0	100	0,22	0	0	100	0,22	79,37
05	1	0	100	7,16	0	0	100	0,22	0	0	100	0,21	76,81
06	5	0	100	12,34	0	0	100	0,22	0	0	100	0,22	574,73
07	1	1	100	0,61	0	0	100	0,22	0	0	100	0,25	12,59
08	3	1	100	22,90	0	0	100	0,21	0	0	100	0,21	291,79
09	12	2	68,44	338,05	1	0	71,26	201,51	1	0	73,98	98,20	7083,03

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Como pode ser observado na Tabela 98, no caso de falta no Alimentador 2 é possível restaurar a totalidade da carga ainda no primeiro *step*, utilizando 3 chaveamentos e 3 movimentos de taps. No caso do Alimentador 4 os três chaveamentos iniciais são reduzidos para um chaveamento e dois movimentos de taps para restaurar o 100% da carga. Da mesma forma, no Alimentador 7 são necessários um chaveamento e um movimento de tap para restaurar a carga desconectada no primeiro *step*. No Alimentador 8 foram reduzidos os 5 chaveamentos da Tabela 97, para 3 chaveamentos e um movimento de tap. Finalmente no Alimentador 9 doze chaveamentos e dois movimentos de tap de capacitor são utilizados para melhorar o valor da ENS e o montante de carga restaurado. Como pode ser verificado nos resultados da Tabela 98, comparado com os resultados da Tabela 97, o controle dos capacitores chaveados melhora a qualidade das respostas no processo restaurativo no sistema em condição CLPU.

6.5.15 Teste 15

Nesta seção é considerada a ativação da condição CLPU no sistema de distribuição. Para auxiliar o processo de restauração, o controle dos reguladores de tensão é utilizado como parte do algoritmo de restabelecimento. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 99. Neste teste a presença de geração distribuída é desconsiderada.

Tabela 99 – Resultados do Teste 15

Falta	Step 1				Step 2				Step 3				ENS [kWh]
	N	P	R (%)	T [s]	N	P	R (%)	T [s]	N	P	R (%)	T [s]	
01	1	0	100	1,21	0	0	100	0,21	0	0	100	0,22	76,81
02	7	0	97,88	10,14	2	0	100	0,39	0	0	100	0,22	570,88
03	1	0	100	2,79	0	0	100	0,21	0	0	100	0,21	76,81
04	3	0	100	6,14	0	0	100	0,22	0	0	100	0,21	161,36
05	1	0	100	4,53	0	0	100	0,24	0	0	100	0,21	76,81
06	5	0	100	7,72	0	0	100	0,21	0	0	100	0,21	574,73
07	1	1	100	0,54	0	0	100	0,23	0	0	100	0,27	12,59
08	3	1	100	21,87	0	0	100	0,21	0	0	100	0,21	291,79
09	12	0	67,53	297,33	10	0	69,98	467,87	3	0	72,80	384,95	7341,87

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Comparando os resultados obtidos na Tabela 99 com as soluções da Tabela 97, o controle dos reguladores de tensão favorece o processo restaurativo. No caso de falta permanente no Alimentador 7, os três chaveamentos originais são reduzidos para um chaveamento e um movimento de tap, melhorando o valor numérico da ENS. Por outro lado, no cenário de falta no início do Alimentador 8, o valor da função objetivo é reduzido ao considerar os movimentos de tap do regulador de tensão como parte da sistemática de restabelecimento.

6.5.16 Teste 16

Nesta seção são apresentados resultados para o sistema de distribuição em condição CLPU, considerando o controle de capacitores chaveados e reguladores de tensão, utilizando o modelo de carga dependente da tensão e a injeção de potência reativa por parte dos capacitores como dependente da tensão. Os resultados são apresentados na Tabela 100. Neste teste a presença de geração distribuída é desconsiderada.

Tabela 100 – Resultados do Teste 16

Falta	Step 1				Step 2				Step 3				ENS [kWh]
	N	P	R (%)	T [s]	N	P	R (%)	T [s]	N	P	R (%)	T [s]	
01	1	0	100	2,09	0	0	100	0,22	0	0	100	0,23	76,81
02	3	3	100	18,49	0	0	100	0,22	0	0	100	0,22	168,55
03	1	0	100	4,97	0	0	100	0,22	0	0	100	0,21	76,81
04	1	2	100	11,82	0	0	100	0,22	0	0	100	0,21	79,37
05	1	0	100	7,17	0	0	100	0,22	0	0	100	0,22	76,81
06	5	0	100	12,30	0	0	100	0,22	0	0	100	0,21	574,73
07	1	1	100	0,57	0	0	100	0,25	0	0	100	0,23	12,59
08	3	1	100	23,20	0	0	100	0,22	0	0	100	0,21	291,79
09	12	2	68,44	337,20	1	0	71,26	202,63	1	0	73,98	96,19	7083,03

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Como pode ser observado na Tabela 100 os resultados considerando os equipamentos de controle de tensão melhoram a qualidade das soluções nos Alimentadores 2, 4, 7, 8 e 9, quando comparados com os resultados da Tabela 97.

6.5.17 Teste 17

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos para o sistema de distribuição em condição CLPU, considerando a presença de geração distribuída, utilizando o modelo de carga dependente da tensão. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 101. Neste teste os controles de bancos de capacitores e reguladores de tensão instalados no sistema não são considerados.

Tabela 101 – Resultados do Teste 17

Falta	Step 1			Step 2			Step 3			ENS [kWh]
	N	R (%)	T [s]	N	R (%)	T [s]	N	R (%)	T [s]	
01	1	100	1,83	0	100	0,29	0	100	0,28	76,81
02	7	97,88	15,68	2	100	0,26	0	100	0,26	570,88
03	1	100	6,36	0	100	0,27	0	100	0,27	76,81
04	3	100	11,69	0	100	0,26	0	100	0,27	161,36
05	1	100	6,85	0	100	0,26	0	100	0,26	76,81
06	5	100	9,24	0	100	0,26	0	100	0,25	574,73
07	3	100	42,24	0	100	0,30	0	100	0,28	25,37
08	5	100	16,36	0	100	0,26	0	100	0,26	378,26
09	12	71,07	322,88	10	73,53	428,67	3	76,35	361,25	6594,75

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Dos resultados obtidos na Tabela 101, conclui-se que os resultados considerando geração distribuída são de igual ou melhor qualidade quando comparado com os resultados obtidos na Tabela 97. Particularmente, o cenário de falta permanente no começo do Alimentador 9 é melhorado com a presença de geração distribuída. Neste cenário o valor 7.341,87 kWh de ENS da Tabela 97 é reduzido para 6.594,75, o que equivale a uma redução do 10,18% do valor de ENS.

6.5.18 Teste 18

Nesta seção são apresentados os resultados para um sistema de distribuição em condição CLPU, considerando a presença de geração distribuída, controle de capacitores chaveados e reguladores de tensão, utilizando o modelo de carga dependente da tensão e a injeção de potência reativa dos capacitores dependentes da tensão. Os resultados são apresentados na Tabela 102.

Tabela 102 – Resultados do Teste 18

Falta	Step 1				Step 2				Step 3				ENS [kWh]
	N	P	R (%)	T [s]	N	P	R (%)	T [s]	N	P	R (%)	T [s]	
01	1	0	100	2,88	0	0	100	0,26	0	0	100	0,27	76,81
02	3	3	100	29,88	0	0	100	0,26	0	0	100	0,26	168,55
03	1	0	100	12,35	0	0	100	0,25	0	0	100	0,27	76,81
04	1	2	100	22,42	0	0	100	0,25	0	0	100	0,25	79,37
05	1	0	100	12,41	0	0	100	0,24	0	0	100	0,24	76,81
06	5	0	100	15,73	0	0	100	0,25	0	0	100	0,25	574,73
07	1	1	100	0,88	0	0	100	0,30	0	0	100	0,33	12,59
08	3	1	100	28,75	0	0	100	0,26	0	0	100	0,25	291,79
09	12	2	71,98	378,96	1	0	74,80	225,64	1	0	77,53	105,44	6335,91

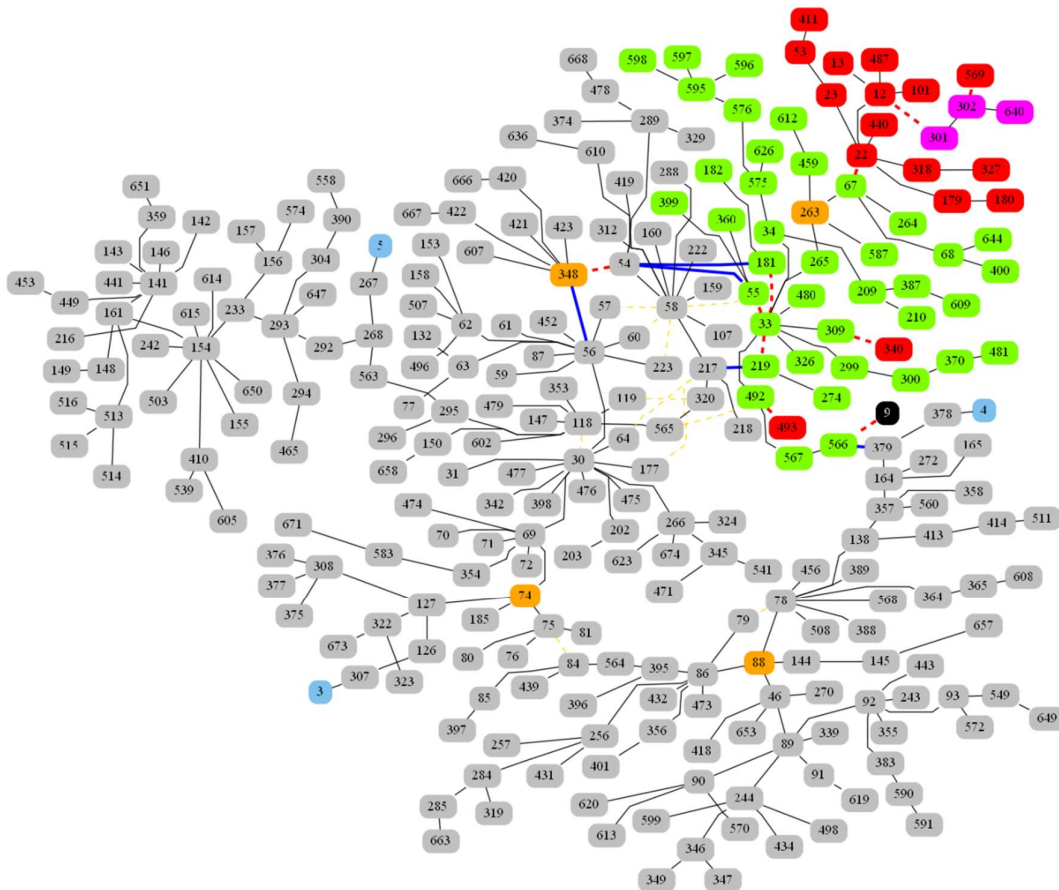
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Em geral, os resultados da Tabela 102 são de igual, ou melhor, qualidade que os resultados apresentados na Tabela 101. Os resultados nos Alimentadores 2, 4, 7, 8 e 9 são aprimorados desde que equipamentos de controle de tensão, como capacitores chaveados e reguladores de tensão, são considerados como parte da estratégia de solução. Outro fato que deve ser analisado é o aumento no tempo computacional necessário para executar o algoritmo quando o número de equipamentos de controle considerados aumenta, principalmente quando o corte de carga é necessário para obter soluções factíveis para o problema. Note-se que o algoritmo requer de um tempo elevado quando analisado o cenário de falta no Alimentador 9.

Nas Figuras 58, 59, 60 são apresentadas as topologias para cada um dos *steps* no cenário de falta permanente no início do Alimentador 9, em que as seções nas cores cinza, azul, verde, laranja, vermelho, roxo e preto, representam as seções de carga, seções no começo de alimentador, seções restabelecidas, seções com presença de equipamento de controle de tensão, seções com corte de carga, seções em operação ilhada e seções em falta, respectivamente.

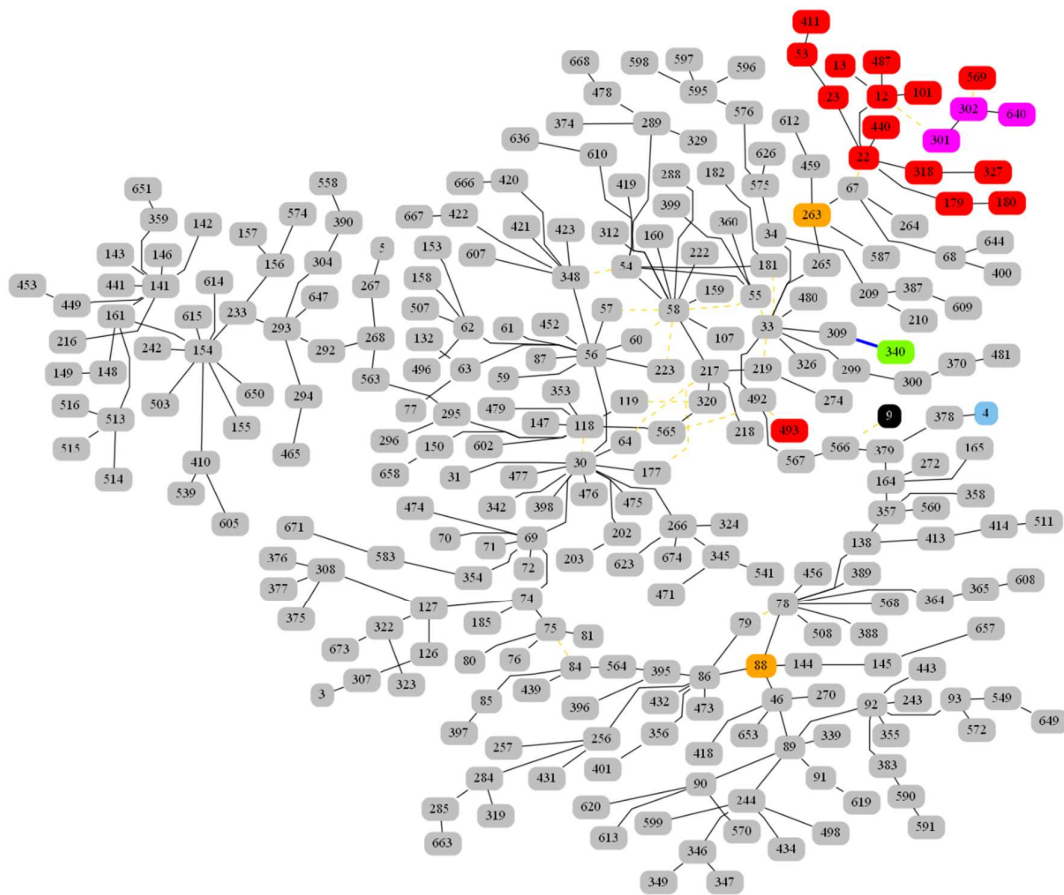
As linhas pretas e contínuas representam chaves normalmente fechadas, as linhas azuis e contínuas representam chaves fechadas para gerar a configuração final, as linhas vermelhas e descontínuas representam chaves abertas para gerar a configuração final. Nas Tabelas 103, 104 e 105 são apresentadas as sequências de chaveamento para cada *step*.

Figura 58 – Topologia final do *step* 1 no cenário de falta no Alimentador 9

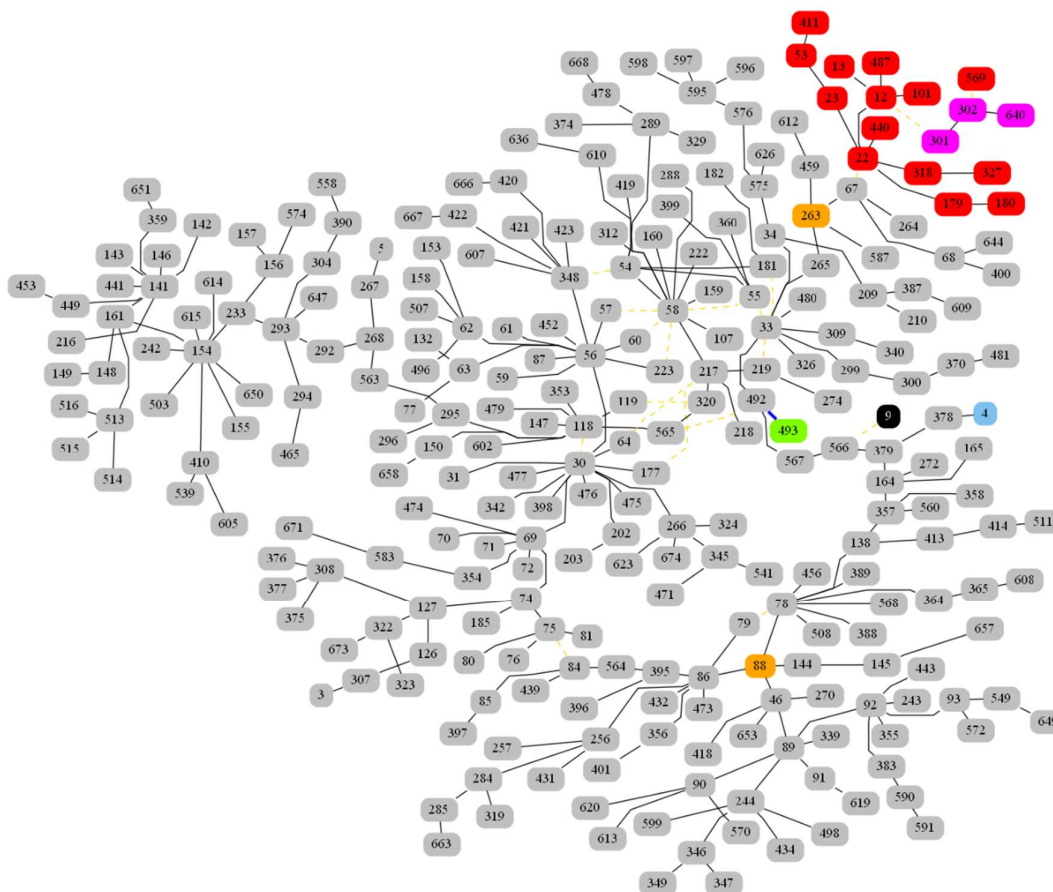


Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 59 – Topologia final do *step 2* no cenário de falta no Alimentador 9



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 60 – Topologia final do *step* 3 no cenário de falta no Alimentador 9

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Tabela 103 – Sequência de chaveamento do *step* 1 no cenário de falta no Alimentador 9

Estagio	Ação	Chave ou Equipamento
Isolamento da seção em falta e da região em operação ilhada	Abrir	9 – 566
	Abrir	12 – 301
	Abrir	302 – 569
1	Movimento de tap	Capacitor seção 263: tap: posição 0 para posição 2
2	Abrir	309 – 340
3	Abrir	67 – 22
4	Abrir	33 – 55
5	Abrir	33 – 219
6	Abrir	33 – 181
7	Abrir	492 – 493
8	Fechar	379 – 566
9	Fechar	54 – 55
10	Fechar	54 – 181
11	Abrir	54 – 348
12	Fechar	348 – 56
13	Fechar	217 – 219

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Tabela 104 – Sequência de chaveamento do *step* 2 no cenário de falta no Alimentador 9

Estagio	Ação	Chave ou Equipamento
1	Fechar	309 – 340

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Tabela 105 – Sequência de chaveamento do *step* 3 no cenário de falta no Alimentador 9

Estagio	Ação	Chave ou Equipamento
1	Fechar	492 – 493

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Nos Testes 1 e 2, verifica-se que utilizando a Estratégia-1 (abordagem sequencial dos problemas de restauração e sequenciamento de chaves) e utilizando a meta-heurística de Busca Tabu clássica, os tempos de processamentos foram menores, embora foram obtidos resultados de menor qualidade. Para fins didáticos na Tabela 48 apresentam-se os resultados considerando a Estratégia-1 de solução e a meta-heurística de Busca Tabu clássica.

Tabela 106 – Resultados do Teste 18, utilizando a Estratégia-1 e a meta-heurística de Busca Tabu

Falta	Step 1				Step 2				Step 3				ENS [kWh]
	N	P	R (%)	T [s]	N	P	R (%)	T [s]	N	P	R (%)	T [s]	
01	1	0	100	3,25	0	0	100	0,27	0	0	100	0,27	76,81
02	3	3	100	38,04	0	0	100	0,27	0	0	100	0,26	168,55
03	1	0	100	13,70	0	0	100	0,26	0	0	100	0,26	76,81
04	1	2	100	21,42	0	0	100	0,27	0	0	100	0,26	79,37
05	1	0	100	13,32	0	0	100	0,26	0	0	100	0,25	76,81
06	5	3	100	29,72	0	0	100	0,25	0	0	100	0,25	564,58
07	1	1	100	0,77	0	0	100	0,29	0	0	100	0,29	12,59
08	3	4	100	37,20	0	0	100	0,26	0	0	100	0,26	304,88
09	7	2	66,53	67,50	13	0	73,17	75,91	2	0	75,89	54,34	6842,78

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Da Tabela 106, verifica-se que a maioria dos resultados não melhoram as soluções obtidas na Tabela 102, porém o tempo computacional é menor principalmente para o cenário em que um corte de carga é necessário no caso do Alimentador 9 (aproximadamente 1 minuto por *step*), tornando esta estratégia interessante quando é necessário resolver o problema de restauração em tempo real.

7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho, uma nova metodologia escalável foi desenvolvida para abordar de forma integrada os problemas de restauração e sequenciamento de manobras de chaves para sistemas de grande porte. Esta metodologia fornece soluções de igual ou melhor qualidade quando comparado com os resultados obtidos com ambos os problemas resolvidos de forma separada e sequencial, tanto para sistemas com apenas chaves manuais, chaves manuais e telecomandadas e, inclusive, para sistemas com apenas chaves telecomandadas.

A meta-heurística de Busca Tabu com Vizinhança Reativa, uma nova variação da meta-heurística de Busca Tabu clássica, foi desenvolvida neste trabalho para o problema de restauração. A eficiência e robustez deste novo algoritmo são avaliadas utilizando dois sistemas de distribuição, em que o mesmo tem a habilidade de encontrar soluções ótimas globais quando comparado com resultados obtidos através de modelos de otimização matemática clássicos.

Uma nova heurística para obter a sequência de chaveamento para o problema de restauração foi desenvolvida. A eficiência, robustez e rapidez deste novo algoritmo são demonstradas através dos testes realizados.

A existência e controle de equipamentos de controle de tensão, como capacitores e reguladores de tensão, e geradores distribuídos permitem melhorar os resultados obtidos através da solução do problema de restauração. A localização dos dispositivos de controle de tensão e geradores distribuídos na rede, exerce forte influência na qualidade das soluções encontradas pelo algoritmo de restauração, reduzindo o valor da ENS, número de chaveamentos e qualidade das magnitudes de tensão.

A presença de cargas termicamente controladas dificulta o processo restaurativo, no entanto, o controle de capacitores chaveados, reguladores de tensão e geração distribuída, contribuem em diminuir os efeitos de interrupções prolongadas em sistemas de distribuição.

Os resultados obtidos com a BTVVR são muito sensíveis aos próprios parâmetros. A calibração destes parâmetros exige uma análise exaustiva e uma alta quantidade de experimentos para obter valores considerados adequados. Em relação ao tempo computacional, a metodologia proposta encontra soluções de boa qualidade em tempo adequado para sua aplicação prática em sistemas reais de distribuição de grande porte.

Para sistemas de grande porte, é possível afirmar que as abordagens baseadas em meta-heurísticas e as abordagens baseadas em otimização clássica para o problema de restauração são complementares entre si.

A principal desvantagem da otimização clássica pode estar na dificuldade de encontrar soluções para sistemas com um grande número de variáveis de decisão, ao mesmo tempo que precisa de tempos computacionais elevados para um problema que deve ser resolvido em tempo real, como é o problema de restauração, enquanto que técnicas baseadas em meta-heurísticas encontram soluções de boa qualidade para sistemas de grande porte, em tempos computacionais relativamente baixos. Porém duas dificuldades são encontradas ao se utilizar meta-heurísticas, a primeira é que não é possível saber se a solução encontrada é ótima para o problema em análise, e a segunda é a quantidade de parâmetros que devem ser calibrados. Portanto, pode-se concluir que a melhor estratégia para resolver o problema de restauração para sistemas de grande porte deve estar baseada em técnicas meta-heurísticas, utilizando as soluções fornecidas pela otimização clássica como *benchmarking* para calibrar os parâmetros necessários.

Como trabalhos futuros propõe-se os seguintes desenvolvimentos:

- Avaliar a possibilidade de um processo semi-aleatório para a Busca Tabu com Vizinhança Variável Reativa.
- Dinamizar os parâmetros da Busca Tabu com Vizinhança Variável Reativa, permitindo ao algoritmo autorregular-se e autocalibrar-se.
- Considerar gerenciamento pelo lado da demanda.
- Reduzir o tempo computacional do algoritmo para obtenção de resultados para sistemas de grande porte.
- Desenvolver equivalentes estáticos da rede de distribuição para reduzir o tempo computacional.
- Implementar um algoritmo de localização de falta para estabelecer um esquema FLISR.

REFERÊNCIAS

AGALGAONKAR, Y. P.; PAL, B. C.; JABR, R. A. Distribution voltage control considering the impact of pv generation on tap changers and autonomous regulators. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 29, n. 1, p. 182–192, jan. 2014.

AL-NUJAIMI, A.; ABIDO, M. A.; AL-MUHAINI, M. Distribution power system reliability assessment considering cold load pickup events. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 33, n. 4, p. 4197–4206, jul. 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA- ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST. **Qualidade da energia elétrica**. [S. l.: s.n.], 2010. p. 1–76. (Modulo, 8).

ANGELO, C.; SELEJAN, P. Technologies of the self healing grid. In: INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXHIBITION ON ELECTRICITY DISTRIBUTION- CIRED, 22., 2013, Estocolmo. **Anais...** Estocolmo: Institution of Engineering and Technology, 2013. p. 1–4.

AOKI, K.; SATOH, T.; ITOH, M.; KUWABARA, H.; KANEZASHI, M. Voltage drop constrained restoration of supply by switch operation in distribution systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 3, n. 3, p. 1267–1274, jul. 1988.

ARIF, A.; MEMBER, S.; MA, S.; MEMBER, S.; WANG, Z.; WANG, J.; MEMBER, S.; RYAN, S. M.; MEMBER, S.; CHEN, C. Optimizing service restoration in distribution

systems with uncertain repair time and demand. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 33, n. 6, p. 6828–6838, 2018.

AUGUGLIARO, A.; DUSONCHET, L.; SANSEVERINO, E. R. Service restoration in compensated distribution networks using a hybrid genetic algorithm. **Electric Power Systems Research**, Amsterdã, v. 46, n. 1, p. 59–66, 1998.

AUGUGLIARO, A.; DUSONCHET, L.; SANSEVERINO, E. R. Evolving non-dominated solutions in multiobjective service restoration for automated distribution networks. **Electric Power Systems Research**, Amsterdã, v. 59, n. 3, p. 185–195, 2001.

BAN, H. B.; NGUYEN, D. N. A Meta-heuristic algorithm combining between tabu and variable neighborhood search for the minimum latency problem. **Fundamenta Informaticae**, Varsovia, v. 156, n. 1, p. 21–41, 2013.

BOBEL, E. Inteligência computacional aplicada à logística de equipes de manutenção de redes de distribuição de energia elétrica. **Espaço Energia**, Curitiba, v. 1, n. 7, p. 22–33, 2007.

BONDY, J. A.; MURTY, U. S. R. **Graph Theory**. Londres: Springer-Verlag London, 2008

CARVALHO, P. M. S.; FERREIRA, L. A. F. M.; BARRUNCHO, L. M. F. Optimization approach to dynamic restoration of distribution systems. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, Londres, v. 29, n. 3, p. 222–229, 2007.

CHANDA, S.; SRIVASTAVA, A. K. Defining and enabling resiliency of electric distribution systems with multiple microgrids. **IEEE Transactions on Smart Grid**, Piscataway, v. 7, n. 6, p. 2859–2868, 2016.

CHAVALI, S.; PAHWA, A.; DAS, S. A genetic algorithm approach for optimal distribution feeder restoration during cold load pickup. In: CONGRESS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION- CEC, 2., 2002, Honolulu. **Anais...** Piscataway: IEEE, 2002. p. 1816–1819.

CHEN, B.; CHEN, C.; WANG, J.; BUTLER-PURRY, K. L. Multi-time step service restoration for advanced distribution systems and microgrids. **IEEE Transactions on Smart Grid**, Piscataway, v. 9, n. 6 p. 6793–6805, 2017.

CHEN, B.; CHEN, C.; WANG, J.; BUTLER-PURRY, K. L. Sequential service restoration for unbalanced distribution systems and microgrids. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 33, n. 2, p. 1507–1520, 2018.

CHEN, T. H.; HUANG, W. T.; GU, J. C.; PU, G. C.; HSU, Y. F.; GUO, T. Y. Feasibility study of upgrading primary feeders from radial and open-loop to normally closed-loop arrangement. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 19, n. 3, p. 1308–1316, 2004.

ĆURČIĆ, S.; ÖZVEREN, C. S.; CROWE, L.; LO, P. K. L. Electric power distribution network restoration: a survey of papers and a review of the restoration problem. **Electric Power Systems Research**, Amsterdã, v. 35, n. 2, p. 73–86, 1995.

DELBEM, A. C. B.; DE CARVALHO, A.; POLICASTRO, C. A.; PINTO, A. K. O.; HONDA, K.; GARCIA, A. C. Node-depth encoding for evolutionary algorithms applied to network

design. In: GENETIC AND EVOLUTIONARY COMPUTATION–GECCO, 2004, 2004, Seattle. **Anais...** Berlin: Springer, 2004. p. 678–687.

DIMITRIJEVIC, S.; RAJAKOVIC, N. Service restoration of distribution networks considering switching operation costs and actual status of the switching equipment. **IEEE Transactions on Smart Grid**, Piscataway, v. 6, n. 3, p. 1227–1232, maio 2015.

DING, J.; BELL, K. R. W.; ELDERS, I. M. A method for the evaluation and optimisation of power losses and reliability of supply in a distribution network. In: POWER SYSTEMS COMPUTATION CONFERENCE–PSCC, 19., 2016, Genoa. **Anais...** Piscataway: IEEE, 2016. p. 1–8.

FUKUYAMA, Y.; CHIANG, H. A parallel genetic algorithm for service restoration in electric power distribution systems. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON FUZZY SYSTEMS, 4., 1995, Yokohama. **Proceedings ...** Piscataway: IEEE, 1995. p. 275–282.

GLOVER, F. Tabu search–part 1. **ORSA Journal on Computing**, Catonsville, v. 1, n. 3, p. 135–206, 1989.

HAJAGOS, L. M.; DANAI, B. Laboratory measurements and models of modern loads and their effect on voltage stability studies. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 13, n. 2, p. 584–592, 1998.

KALYANOMY DEB, A. P. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA -II. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, Piscataway, v. 6, n. 2, p. 182–197, 2002.

KLEINBERG, M. R.; MIU, K.; CHIANG, H. D. Improving service restoration of power distribution systems through load curtailment of in-service customers. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 26, n. 3, p. 1110–1117, 2011.

KUMAR, V.; KUMAR, R. H. C.; GUPTA, I.; GUPTA, H. O. DG Integrated approach for service restoration under cold load pickup. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 25, n. 1, p. 398–406, 2010.

KUMAR, Y.; DAS, B.; SHARMA, J. Multiobjective, multiconstraint service restoration of electric power distribution system with priority customers. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 23, n. 1, p. 261–270, 2008.

LEI, S.; WANG, J.; HOU, Y. Remote-controlled switch allocation enabling prompt restoration of distribution systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 33, n. 3, p. 3129–3142, 2018.

LEITE, J. B.; VARGAS, R.; MANTOVANI, J. R. S. Restauração em redes de distribuição de energia elétrica através de operações planejadas de chaveamento In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 22., 2018, João Pessoa. **Anais...** Campinas: SBA, 2018. p. 1–8.

LI, W.; WANG, P.; LI, Z.; LIU, Y. Reliability evaluation of complex radial distribution systems considering restoration sequence and network constraints. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 19, n. 2, p. 753–758, 2004.

LI, Y.; XIAO, J.; CHEN, C.; TAN, Y.; CAO, Y. Service restoration model with mixed-integer second-order cone programming for distribution network with distributed generations. **IEEE Transactions on Smart Grid**, Piscataway, v. 1, n. 1, p. 1–13, 2018.

LINARES, P.; REY, L. The costs of electricity interruptions in Spain: are we sending the right signals? **Energy Policy**, Amsterdã, v. 61, n. 1, p. 751–760, 2013.

LIU, C.-C.; LEE, S. J.; VENKATA, S. S. An expert system operational aid for restoration and loss reduction of distribution systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 3, n. 2, p. 619–626, 1988.

LUO, W.; FU, Z. A Variable neighborhood tabu search algorithm for the heterogeneous fleet vehicle routing problem with time windows. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LOGISTICS ENGINEERING AND INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS, 1., 2010, Wuhan. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2010. p. 1–4.

MASSIGNAN, J. A. D.; LONDON, J. B. A.; BESSANI, M.; MACIEL, C. D.; DELBEM, A. C. B.; CAMILLO, M. H. M.; SOARES, T. W. L. In-field validation of a real time monitoring tool for distribution feeders. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 33, n. 4, p. 1798–1808, 2018.

MATHIAS-NETO, W. P.; MANTOVANI, J. R. S. A node-depth encoding-based tabu search algorithm for power distribution system restoration. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, Heidelberg, v. 27, n. 3, p. 317–327, jun. 2016.

MIU, K. N.; CHIANG, H. D.; MCNULTY, R. J. Multi-tier service restoration through network reconfiguration and capacitor control for large-scale radial distribution networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 15, n. 3, p. 1001–1007, 2000.

MIU, K. N.; CHIANG, H. D.; YUAN, B.; DARLING, G. Fast service restoration for large-scale distribution systems with priority customers and constraints. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 13, n. 3, p. 789–795, 1998.

MORELATO, A. L.; MONTICELLI, A. J. Heuristic search approach to distribution system restoration. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 4, n. 4, p. 2235–2241, 1989.

MORI, H.; TSUNOKAWA, S. Variable neighborhood tabu search for capacitor placement in distribution systems. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CIRCUITS AND SYSTEMS, 5., 2005, Kobe. **Anais...** Piscataway: IEEE, 2005.p. 47474750.

MATHIASNETO, W. P. **Proposta de um algoritmo eficiente baseado em busca tabu e representação nó-profundidade para a restauração de redes de distribuição de energia elétrica**. 2016. 145 f. Tese (Doutorado)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"- UNESP, Ilha Solteira, 2016.

PHAM, T. T. H.; BÉSANGER, Y.; HADJSAID, N. New challenges in power system restoration with large scale of dispersed generation insertion. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 24, n. 1, p. 398–406, 2009.

POUDEL, S.; DUBEY, A. Critical Load Restoration using Distributed Energy Resources for Resilient Power Distribution System. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 34, n. 1, p. 52–63, 2018.

ROMERO, R.; FRANCO, J. F.; LEO, F. B.; RIDER, M. J.; DE SOUZA, E. S. A new mathematical model for the restoration problem in balanced radial distribution systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 31, n. 2, p. 1259–1268, 2016.

SANTOS, A. C.; DELBEM, A. C. B.; LONDON, J. B. A.; BRETAS, N. G. Node-depth encoding and multiobjective evolutionary algorithm applied to large-scale distribution system reconfiguration. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 25, n. 3, p. 1254–1265, 2010.

SANTOS, A.; NANNI, M.; MANSOUR, M.; DELBEM, A.; LONDON, J.; BRETAS, N. A power flow method computationally efficient for large-scale distribution systems. In: TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION: LATIN AMERICA, 4., 2008, Bogota. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2008. p. 1–6.

SCHNEIDER, K. P.; SORTOMME, E.; VENKATA, S. S.; MILLER, M. T.; PONDER, L. Evaluating the magnitude and duration of cold load pick-up on residential distribution feeders using multi-state load models. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 31, n. 5, p. 3765–3774, 2016.

SHIRMOHAMMADI, D. Service restoration in distribution networks via network reconfiguration. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 7, n. 2, p. 952–958, abr. 1992.

SHIRMOHAMMADI, D.; HONG, H. W.; SEMLYEN, A.; LUO, G. X. A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, Piscataway, v. 3, n. 2, p. 753–762, 1988.

SONG, I. K.; JUNG, W. W.; KIM, J. Y.; YUN, S. Y.; CHOI, J. H.; AHN, S. J. Operation schemes of smart distribution networks with distributed energy resources for loss reduction and service restoration. **IEEE Transactions on Smart Grid**, Piscataway, v. 4, n. 1, p. 367–374, 2013.

TOUNE, S.; FUDO, H.; GENJI, T.; FUKUYAMA, Y.; NAKANISHI, Y. Comparative study of modern heuristic algorithms to service restoration in distribution systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 17, n. 1, p. 173–181, 2002.

UÇAK, C.; PAHWA, A. Optimal step-by-step restoration of distribution systems during excessive loads due to cold load pickup. **Electric Power Systems Research**, Amsterdã, v. 32, n. 2, p. 121–128, 1995.

ULUSKI, R. W. VVC in the Smart Grid era. In: IEEE POWER & ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING, 8., 2010, Providence. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2010. p. 17.

WANG, Z.; WANG, J.; CHEN, C. A Three-phase microgrid restoration model considering unbalanced operation of distributed generation. **IEEE Transactions on Smart Grid**, Piscataway, v. 9, n. 4, p. 3594–3604, 2018.

WATANABE, I.; NODU, M. A genetic algorithm for optimizing switching sequence of service restoration in distribution systems. In: CONGRESS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, 6., 2004, Portlan. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2004. p. 1683–1690.

ZIDAN, A.; KHAIRALLA, M.; ABDRABOU, A. M.; KHALIFA, T.; SHABAN, K.; ABDRABOU, A.; EL SHATSHAT, R.; GAUDA, A. M. Fault detection, isolation, and service restoration in distribution systems: state-of-the-art and future trends. **IEEE Transactions on Smart Grid**, Piscataway, v. 8, n. 5, p. 2170-2185, 2017.