

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

RENZO AMILCAR VARGAS PERALTA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA
RESTAURAÇÃO AUTOMÁTICA DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO**

Ilha Solteira

2015

RENZO AMILCAR VARGAS PERALTA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA
RESTAURAÇÃO AUTOMÁTICA DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Câmpus de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Automação.

Prof. Dr. José Roberto Sanches Mantovani
Orientador

Prof. Dr. Luis Gustavo Wesz da Silva
Coorientador

Ilha Solteira
2015

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

V297d Vargas Peralta, Renzo Amilcar.
Desenvolvimento de uma metodologia para restauração automática de
redes de distribuição / Renzo Amilcar Vargas Peralta. -- Ilha Solteira: [s.n.],
2015
93 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de
Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2015

Orientador: José Roberto Sanches Mantovani
Co-orientador: Luis Gustavo Wesz da Silva
Inclui bibliografia

1. Restauração de redes de distribuição. 2. Meta-heurística. 3. Busca tabu. 4.
Representação nó-profundidade. 5. Geração distribuída.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA RESTAURAÇÃO AUTOMÁTICA DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO.

AUTOR: RENZO AMILCAR VARGAS PERALTA

ORIENTADOR: Prof. Dr. JOSE ROBERTO SANCHES MANTOVANI

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. LUIS GUSTAVO WESZ DA SILVA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica ,
Área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. JOSE ROBERTO SANCHES MANTOVANI

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Profa. Dra. MARINA LAVORATO DE OLIVEIRA

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. MARCELO ESCOBAR DE OLIVEIRA

Departamento de Áreas Acadêmicas - Indústria/Engenharia / Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia Goiano

Data da realização: 26 de fevereiro de 2015.

DEDICO

A minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, aos meus pais Amilcar e Gloria, pelo exemplo, força e carinho. A meus irmãos Rommel, Joel e Alonso, 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 Luis Gustavo Wesz da Silva, Antonio Padilha, Marcos Rider, Marina Lavorato, Fabio Bertequini, 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.

À Fundação de Ensino e Pesquisa de Ilha Solteira (FEPISA) pelo apoio financeiro durante os primeiros meses de pesquisa.

À CAPES pelo apoio financeiro conferido durante os meses restantes.

“Ser más para servir mejor. ”

San Ignacio de Loyola

RESUMO

Neste trabalho, propõe-se um algoritmo baseado na meta-heurística busca tabu para o problema de restauração de redes de distribuição de energia elétrica radiais com geração distribuída, considerando como sistema de codificação uma estrutura denominada representação nó-profundidade (RNP). O problema é modelado como não linear inteiro misto e considera os principais objetivos da restauração de redes de distribuição: minimizar número de consumidores sem fornecimento de energia elétrica e o número de chaveamentos. Propõe-se, também, uma sequência lógica de chaveamentos que garante os aspectos operacionais. O algoritmo desenvolvido foi implementado em linguagem de programação C++ e testado em sistemas de distribuição de 136 e 7052 barras.

Palavras-chave: Restauração de redes de distribuição. Meta-heurística. Busca tabu. Representação nó-profundidade. Geração distribuída.

ABSTRACT

This work proposes a methodology based in the meta-heuristic tabu search to distribution power system restoration considering distributed generators installed on the system, using the encoding system node depth representation. The problem is established as a mixed-integer nonlinear programming taking into account the mainly goals: to minimize both the number of consumers without supply and the number of switching. This work also proposes a logic sequence of switching operations, taking care of operational issues. The proposed algorithm was implemented in C++ programming language and tested in a 136 and a 7052 bus distribution systems.

Keywords: Distribution power system restoration. Meta-heuristic. Tabu search. Node-depth encoding. Distributed generation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estados de operação de um sistema de distribuição. Adaptado da fonte.	14
Figura 2 – Ilustração de um grafo.....	22
Figura 3 – Exemplo de árvore e sua RNP.	34
Figura 4 – Exemplo de árvores para o operador PAO.....	36
Figura 5 – Seleção de índices para operador PAO.	36
Figura 6 – Matriz temporária para operador PAO.....	37
Figura 7 – Árvores finais após operador PAO.	37
Figura 8 – Exemplo de árvores para o operador CAO.	39
Figura 9 – Seleção de índices para o operador CAO.....	39
Figura 10 – Sub-árvores auxiliares para o operador CAO.	40
Figura 11 – Matriz temporária para o operador CAO.	40
Figura 12 – Representações finais após o operador CAO.	41
Figura 13 – Exemplo de árvores para o operador CUT.....	42
Figura 14 – Representações finais após o operador CUT. Adaptado da fonte.....	42
Figura 15 – Exemplo de renumeração em camadas.	45
Figura 16 – Diagrama de blocos do algoritmo básico de busca tabu.	48
Figura 17 – Exemplo da RNP e RSP. a) RNP. b) RSP	51
Figura 18 – Exemplo do atributo armazenado na lista tabu.	54
Figura 19 – Diagrama de blocos da meta-heurística busca tabu aplicada ao problema de restauração.	56
Figura 20 – Sistema em estado normal.....	59
Figura 21 – Configuração pós-falta (CPF). A falta foi isolada	59
Figura 22 – Configuração Inicial (CI).	60
Figura 23 – Nova configuração.	60
Figura 24 – Configuração Incumbente (CF).....	61
Figura 25 – Configuração Inicial (CI).	62
Figura 26 – Configuração de análise do exemplo.	62
Figura 27 – Configuração pós-falta (CPF), a falta foi isolada.....	63
Figura 28 – Configuração Incumbente.	63
Figura 29 – Sistema 136 barras. Adaptado da fonte.....	67
Figura 30 – Identificação das seções no sistema de 136 barras. Adaptado da fonte.	68

Figura 31 – Representação do sistema de 136 barras em seções. Adaptado da fonte.	69
Figura 32 – Potência disponível máxima no parque eólico no período de falta.....	71
Figura 33 – Potência disponível máxima na micro central solar no período de falta.....	71
Figura 34 – Limites mínimos e máximos de potência disponível na central geradora hidráulica.	72
Figura 35 – Falta na seção 11. Adaptado da fonte.	74
Figura 36 – Falta na seção 7. Adaptado da fonte.	75
Figura 37 – Número de iterações para obter a solução final no sistema com falta na seção 7.	76
Figura 38 – Porcentagem das soluções encontradas no sistema com falta na seção 7.....	76
Figura 39 – Falta na seção 32. Adaptado da fonte.	77
Figura 40 – Falta nas seções 6 e 13. Adaptado da fonte.....	78
Figura 41 – Número de iterações para obter a solução final no sistema com falta nas seções 6 e 13.....	79
Figura 42 – Porcentagem das soluções encontradas no sistema com falta nas seções 6 e 13. .	79
Figura 43 – Falta nas seções 11 e 15. Adaptado da fonte.....	80
Figura 44 – Porcentagem das soluções encontradas no sistema com falta nas seções 11 e 15.	81
Figura 45 – Falta nas seções 12, 30 e 40. Adaptado da fonte.....	82
Figura 46 – Número de iterações para obter a solução final no sistema com falta nas seções 12 e 30 e 40.....	83
Figura 47 – Porcentagem das soluções encontradas no sistema com falta nas seções 12, 30 e 40.	83
Figura 48 – Alimentador em análise do segundo sistema teste.	84
Figura 49 – Falta na seção 304.	85
Figura 50 – Número de iterações para obter a solução final no sistema com uma falta no alimentador 0.	85
Figura 51 – Porcentagem das soluções encontradas com uma falta no alimentador 0.....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Grau de cada nó pertencente ao grafo da Figura 2.	22
Tabela 2 - Principais características da energia solar fotovoltaica.	25
Tabela 3 - Principais características da energia eólica.	25
Tabela 4 - Estado das chaves na configuração inicial.	54
Tabela 5 - Estado das chaves após a reconfiguração.	54
Tabela 6 - Atributos proibidos.	54
Tabela 7 - Classes de chaves segundo o estado nas configurações CPF, CI e CF.	57
Tabela 8 - Estado das chaves ao longo do exemplo e a sua classificação por classes.	61
Tabela 9 - Chaves das classes 2, 3, 4, e 7 do exemplo.	62
Tabela 10 - Sequência de chaveamento do exemplo.	64
Tabela 11 - Chaves do sistema de 136 barras.	69
Tabela 12 - Restrições de mínimo e máximo fator de potência para diferentes fontes/tecnologias.	72
Tabela 13 – Sequência de chaveamento do sistema com falta na seção 11.	74
Tabela 14 - Sequência de chaveamento do sistema com falta na seção 7.	75
Tabela 15 - Sequência de chaveamento do sistema com falta na seção 32.	77
Tabela 16 - Sequência de chaveamento do sistema com falta nas seções 6 e 13.	79
Tabela 17 - Sequência de chaveamento do sistema com falta nas seções 11 e 15.	81
Tabela 18 - Sequência de chaveamento do sistema com falta nas seções 12, 30 e 40.	82
Tabela 19 - Sequência de chaveamento do sistema com falta nas seções 12, 30 e 40.	85

LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BT	Busca Tabu
CAO	<i>Change Ancestor Operator</i>
CPF	Configuração pós-falta
CI	Configuração inicial
CF	Configuração incumbente
GD	Geração Distribuída
PAO	<i>Preserve Ancestor Operator</i>
RNP	Representação Nó Profundidade
SAIDI	<i>System Average Interruption Duration Index</i>
SAIFI	<i>System Average Interruption Frequency Index</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	RESTAURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	13
1.2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
1.3	PROPOSTA DE TRABALHO	19
1.4	ESTRUTURA DO TEXTO	20
2	O PROBLEMA DE RESTAURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	21
2.1	REPRESENTAÇÃO DAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DE GRAFOS	21
2.2	CONCEITOS BÁSICOS DE GERAÇÃO DISTRIBUIDA	22
2.3	CONCEITOS DE OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO	26
2.3.1	Critério de soma de ponderações de pesos	27
2.4	MODELO MATEMÁTICO DO PROBLEMA DE RESTAURAÇÃO	28
2.4.1	Funções objetivos	28
2.4.2	Restrições	29
3	METODOLOGIA PROPOSTA	33
3.1	REPRESENTAÇÃO NÓ-PROFUNDIDADE	33
3.1.1	Codificação da Representação Nó-Profundidade	33
3.1.2	Operadores	34
3.1.3	Posição de um nó na floresta F	43
3.1.4	Aplicação da RNP em Seções	43
3.2	FLUXO DE POTÊNCIA	44
3.3	BUSCA TABU	47
3.3.1	Algoritmo básico de busca tabu	47
3.3.2	Algoritmo de busca tabu dedicado ao problema de restauração de redes	50
3.4	SEQUÊNCIA DE CHAVEAMENTO	57
3.4.1	Sequência de chaveamento sem corte de carga	58
3.4.2	Sequência de chaveamento com corte de carga	64
4	TESTES E RESULTADOS	67
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	67
4.1.1	Parâmetros	67
4.1.2	Sistemas testes	67
4.2	RESULTADOS OBTIDOS	73
4.2.1	Simulações no sistema de 136 barras	73
4.2.2	Simulação com o sistema de 7052 barras	84
4.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS	87
	REFERÊNCIAS	89

1 INTRODUÇÃO

Os cortes no fornecimento de energia elétrica ocasionados por contingências e manutenções preventivas e corretivas proporcionam desconforto aos usuários. Estes cortes, além de reduzir a satisfação do cliente e provocarem prejuízos econômicos, afetam a rotina das diferentes empresas do setor elétrico, ou seja, são situações não desejadas.

As faltas em sistemas de distribuição, e posterior perda de fornecimento de energia elétrica para grupos de consumidores, são muitas vezes inevitáveis. As concessionárias buscam constantemente por técnicas operativas e de manutenções para amenizar os problemas decorrentes dos cortes de fornecimento de energia. Uma das principais técnicas é o desenvolvimento de algoritmos rápidos e eficientes para a solução do problema de restauração de sistemas de energia elétrica.

As interrupções de fornecimento de energia elétrica podem ser ocasionadas por fatores humanos, técnicos ou ambientais e o principal trabalho após a interrupção é recuperar a maior quantidade de carga sem fornecimento no menor tempo possível. Esse processo muitas vezes é realizado por operadores com experiência no sistema, mas a tendência é introduzir novas tecnologias aos sistemas de distribuição e contar com dispositivos de controle nos sistemas com o objetivo de automatizar o processo de restauração das redes.

O problema de restauração está diretamente relacionado com a confiabilidade da rede, uma vez que, devido a fatores como o frequente crescimento da dimensão e complexidade das redes de distribuição, tornou-se mais crítico. O desempenho da confiabilidade de um sistema de distribuição está relacionado com a rápida restauração do fornecimento aos consumidores e o retorno às condições de operação normal após uma falta.

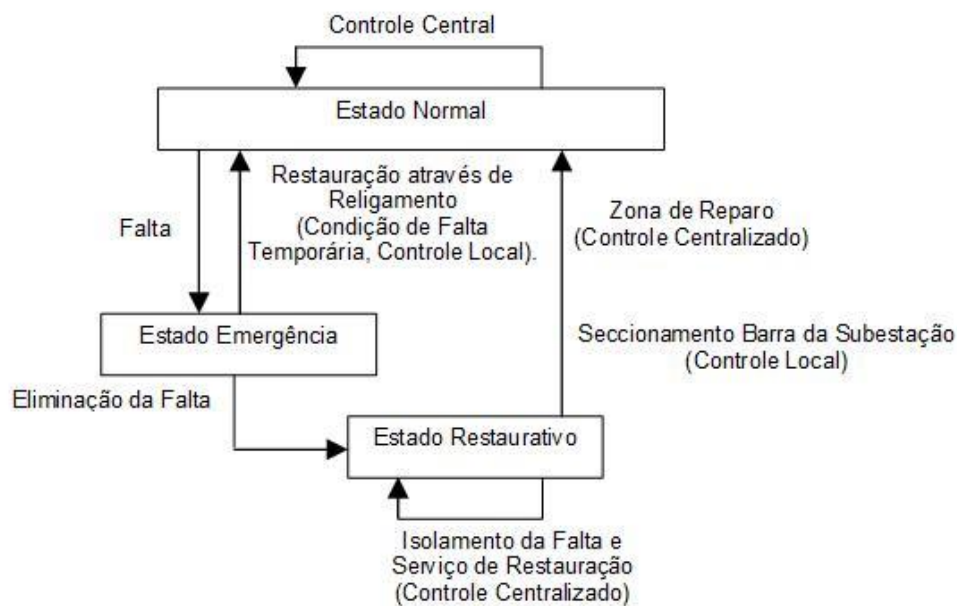
1.1 RESTAURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELETRICA

Curtos-circuitos, sobrecargas no sistema e falhas nos equipamentos são condições anormais de operação que estão sujeitos os circuitos de distribuição. Descargas atmosféricas, galhos de árvores que tocam os condutores, falhas de isoladores e interferências no sistema, tanto humanas como de animais, são geralmente os principais causadores da atuação dos dispositivos de proteção interrompendo o fornecimento de energia para os consumidores. Sob condições de faltas permanentes, o sistema passa do estado normal de funcionamento para o estado restaurativo.

Mais de 80% das interrupções do fornecimento de energia são provenientes de faltas na rede de distribuição (SONG et al., 2010). A restauração é um processo essencial executado pelas concessionárias de distribuição para garantir a confiabilidade do serviço e reduzir o tempo de interrupção. As faltas são normalmente classificadas em dois tipos, temporárias e permanentes. Geralmente, o mecanismo de religamento é amplamente aceito como método de restauração para faltas temporárias. Para faltas permanentes, um método baseado no fluxo de potência e o conhecimento do operador do sistema são usados para criar planos de restauração.

Na Figura 1 (ANDERSON, 1999) ilustram-se os estados operativos de uma rede elétrica. No estado restaurativo, após liberar uma falta permanente, tenta-se restabelecer a maior quantidade de carga que ficou desenergizada. O estado restaurativo continua até que a zona sob falta seja reparada.

Figura 1 – Estados de operação de um sistema de distribuição. Adaptado da fonte.



Fonte: Anderson (1999).

Nos sistemas de distribuição de energia elétrica existe um conjunto de componentes (barras, linhas, transformadores, chaves de manobras, ramais de interconexões, etc.) que permitem a operação da rede de forma radial. Nessa disposição existem as seções, que são conjuntos de elementos de rede separados por dispositivos de manobras que além de limitar, permitem sua isolamento elétrica em caso de falha.

O fluxo de potência percorre os componentes de um sistema de distribuição através da sua topologia radial, mas muitas vezes acontece a falha de algum equipamento da rede, e atuam os elementos de proteção ocasionando a perda de fornecimento de energia na seção em falta e as cargas das regiões a partir dela. O processo de restauração inicia identificando as cargas que foram desenergizadas. Após localizar a falta, a seção afetada deve ser isolada, e, em seguida, deve-se determinar a melhor configuração que permita restabelecer o fornecimento de energia elétrica, através da reconfiguração, mantendo os níveis de qualidade estabelecidos com a menor quantidade de consumidores fora de serviço.

Uma consideração importante, após o restabelecimento, é que o sistema deve manter a radialidade da operação. De acordo com a teoria de grafos (que será explicado com maior detalhe no Capítulo 2), essa topologia radial é chamada de árvore. Dentro da teoria de grafos existem tipos de codificações que podem ser selecionadas com o objetivo de fazer variações na topologia, sem perder a radialidade. Estas variações são feitas trocando adequadamente ramos energizados, ou ramos de árvore, por ramos não energizados, ou ramos de ligação.

Na solução do problema de restauração deve-se buscar a menor quantidade de consumidores sem fornecimento, e concomitantemente ao fazer a restauração considerar-se a menor quantidade de manobras que devem ser realizadas. Uma menor quantidade de manobras implica reduzir as ações das equipes de manutenção, o que permite restabelecer o fornecimento de uma área desenergizada em menor tempo. Minimizar o número de chaveamentos também permite reduzir os danos aos equipamentos instalados nas redes primárias e secundárias, por comportamentos transitórios de correntes e tensões que estas manobras podem provocar através dos transitórios eletromagnéticos na rede.

A introdução de geração distribuída (GD) nas redes de distribuição está ganhando mais importância nos últimos anos. O incentivo da geração distribuída deriva de propósitos comerciais, a sua capacidade de melhorar a qualidade da energia e pelo fato de utilizar elementos da natureza, como a radiação solar ou a velocidade do vento para gerar eletricidade. Além destes benefícios, a geração distribuída pode operar de forma ilhada, se ela tem a capacidade fornecer de energia a uma quantidade limitada de carga no caso de interrupção de fornecimento pela subestação, aumentando desta forma, a confiabilidade do sistema.

A pesquisa na área de automação de sistemas de distribuição é focada na definição de estratégias rápidas de restauração do fornecimento de energia elétrica, as quais devem ser de fácil implementação e fornecer soluções de boa qualidade em tempos de cálculo aceitáveis para controle em tempo real.

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na literatura são propostas várias técnicas baseadas em heurísticas, meta-heurísticas e otimização clássica para o problema de restauração. A seguir, detalham-se algumas delas. Também são revisados artigos relacionados a GD no final desta seção.

Cinvalar et al. (1988) estabeleceram o problema de reconfiguração de alimentador no contexto de redução de perda dos alimentadores e desenvolveram uma ferramenta computacional, tanto para o planejamento quanto para o controle em tempo real. Neste trabalho é proposto um método baseado em troca de chaveamentos mais conhecido como “troca de ramos” (do inglês, *branch exchange*), o método de busca inicia a partir de uma solução radial do sistema utilizando uma expressão matemática que permite encontrar as topologias com menores perdas através da abertura de uma chave normalmente fechada e o fechamento de uma chave normalmente aberta, com essa troca de chaves, o sistema sempre é mantido de forma radial e evita avaliar com o cálculo de fluxo de potência algumas configurações economizando, desta forma, tempo computacional.

Morelato e Monticelli (1989) apresentaram uma estratégia de busca direcionada com a utilização de regras práticas (baseadas na experiência do operador) para resolver problemas como a restauração de sistemas. Os autores utilizam um processo de busca heurística em árvore de decisão binária, que permite percorrer o espaço de possibilidades do estado operacional do sistema. Para reduzir a dimensão da árvore de decisão é utilizado o conhecimento de domínio específico das características do problema e da topologia da rede, evitando uma explosão combinatorial e mantendo o problema dentro de um espaço de busca de dimensão gerenciável.

Hsu et al. (1992) fizeram uma abordagem heurística para a restauração de sistemas de distribuição, baseados na experiência dos operadores da *Taiwan Power Company*. Os autores elaboraram um conjunto de regras analisando a capacidade de reserva dos alimentadores após a falta. A estratégia apresentada fornece bons resultados, mas é restrita a uma falta por alimentador.

Toune et al. (2002) fizeram uma comparação de quatro metaheurísticas para resolver o problema de restauração de serviço em sistemas de distribuição. As metaheurísticas avaliadas são o Algoritmo Genético (*Genetic Algorithm*) (AG), Arrefecimento simulado paralelo (*Parallel Simulated Annealing*) (PSA), Busca Tabu e Busca Tabu Reativa, sendo essa última uma variação de busca tabu. O artigo, após uma comparação quantitativa e qualitativa, tem por conclusão que a metaheurística busca tabu reativa, gera melhores resultados, utilizando o

mecanismo reativo, que faz a dimensão da lista tabu variável, se existem ou não configurações repetidas. Para escapar dos ótimos locais, propõe uma série de passos aleatórios usando uma lista auxiliar que evita o fenômeno de ciclagem.

Huang (2003) propõe utilizar as regras heurísticas obtidas na interação com os operadores de sistemas de distribuição no processo de restauração do sistema, transformando-as em um modelo de rede tipo *Fuzzy Cause – Effect* (FCE). A abordagem proposta combina as metas *fuzzy* da restauração do sistema, que é um problema multiobjetivo, usando uma estratégia de ponderação de pesos através de um processo analítico hierárquico (PAH). As redes FCE são baseadas em modelos de grafos entre uma premissa e o consequente efeito. Para cada proposição *fuzzy*, combinam-se valores *fuzzy* através da estratégia de ponderação de pesos, obtendo o melhor esquema restaurativo com uma única função objetivo.

Em Augugliaro et al. (2001), em um contexto de redes de distribuição automatizadas, os autores propuseram uma nova abordagem, *Non-Dominated Sorting Fuzzy Evolution Strategy* (NS_FES), que utiliza parte do *Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm* (NSGA) e a estrutura da *Fuzzy Evolution Strategy* (FES). O trabalho tem por objetivo fornecer energia elétrica à maior quantidade de carga e minimizar as perdas de potência. Utiliza a capacidade para dividir a população de soluções em classes de dominância de acordo com os critérios dos objetivos do problema. No algoritmo proposto, utilizam-se dois laços, sendo um laço externo baseado no NSGA e um laço interno baseado no FES.

Song et al. (2010) apresentaram um sistema de distribuição inteligente (*Smart Distribution System*), com a presença de geradores distribuídos, equipamentos de armazenamento de energia e elementos de medição avançados, para simplificar o cálculo dos planos de restauração e reduzir o tempo sem fornecimento de energia aos consumidores. Devido à presença dos elementos de medição avançados, leva-se em consideração a capacidade de desconexão seletiva de carga fornecida espontaneamente pelos usuários. Apresentam-se três cenários, detalhando-se em cada um, a capacidade dos alimentadores para completar o processo de restauração após a desconexão seletiva de carga e a interação com outros alimentadores se for necessário.

Jun et al. (2001) apresentaram uma solução do problema de restauração de sistemas de distribuição baseado no AG. O problema é separado em uma série de subproblemas para poder ser eficientemente resolvidos pelo AG. Os subproblemas são caracterizados de acordo com as capacidades dos alimentadores adjacentes fornecerem energia às áreas fora de serviço, total ou parcialmente, tendo a possibilidade de transferir algumas cargas dos alimentadores adjacentes a outros alimentadores para aumentar a capacidade disponível.

Inagaki et al. (2006) apresentaram um método para obter um conjunto de soluções de pareto para resolver o problema de restauração de sistemas de distribuição. O método aproveita as características do AG e, sabendo a necessidade de melhorar a otimização local, o método combina-se com a meta-heurística Arrefecimento Simulado (*simulated annealing*) (SA) com a finalidade de intensificar a busca local. No método, a população é dividida em duas subpopulações, sendo que a primeira minimiza a quantidade total de cargas não restauradas e a segunda minimiza o número de chaveamentos.

Hattori et al. (2000) apresentaram um novo algoritmo, o *Modern Heuristic Method* (MHM) para resolver o problema de restauração em sistemas de distribuição de grande porte. O algoritmo é resumido em quatro passos. Primeiro, prepara-se uma lista de linhas de propagação. Uma linha de propagação é um conjunto de informação que inclui uma seção de fronteira dentro da área sem fornecimento (Ti), uma seção com fornecimento (Fi) junto à seção de fronteira anterior e o interruptor entre eles (Si). Em seguida, escolhe-se a melhor lista de propagação de acordo aos seguintes critérios: Ti vai ser fornecido por outro alimentador, Fi tem capacidade para fornecer Ti, e Si deve estar aberto. O terceiro passo é avaliar a situação da rede econômica e eletricamente. O passo final é repetir este procedimento até cumprir o critério de parada. O método apresenta bons tempos para interrupções de grandes áreas.

El-Khattam e Salama (2004) apresentaram uma definição da GD, como unidades de geração de energia elétrica limpa (fazendo referência aos elementos da natureza como principal matéria-prima) de pequeno porte, compactos e alocados perto aos consumidores. Apresentam também, uma classificação e as vantagens dos tipos de geração distribuída segundo a tecnologia e a sua fonte de recursos para transformá-la em eletricidade. Por fim, analisam os benefícios da GD desde o ponto de vista econômico, como a instalação em lugares específicos de carga evitando a construção de novas linhas de transmissão e distribuição, ressaltando a facilidade de instalação, locação e a variabilidade de recursos aproveitáveis na geração. Outros benefícios concentram-se desde o ponto de vista operacional, como a diminuição das perdas em sistemas de distribuição, fornecimento em horários de pico e a melhora da continuidade e confiabilidade dos sistemas operando em situações de emergência ou desligamento da rede.

Gomes e Morcos (2008) apresentaram, em um contexto de operação ilhada da GD, os pontos de vista da concessionária e dos proprietários e consumidores de um sistema de distribuição. Desde o ponto de vista da concessionária, deve-se desligar um GD no momento que o fornecimento desde a subestação é interrompido por questões de segurança (áreas

destinadas à manutenção podem estar erradamente fornecidas desde a GD). Para os proprietários da GD, a operação ilhada constitui a continuidade da operação com certas limitações embora as perdas de produção sejam menores que em estado de blecaute. Por fim, conclui-se que a operação ilhada pode-se apresentar como uma melhora de disponibilidade e qualidade do fornecimento de energia elétrica para o proprietário e ser tecnicamente viável para a concessionária, com os controles adequados.

1.3 PROPOSTA DE TRABALHO

A restauração de sistemas de distribuição tem sido trabalhada ao longo dos anos e continua sendo um problema interessante para os pesquisadores da área devido a suas características, um problema de otimização combinatorial complexo pelo grande número de chaves candidatas existentes para manobras em um sistema de distribuição e as restrições como os limites de operação e a radialidade.

A técnica proposta neste trabalho, para resolver o problema de restauração de redes radiais, baseia-se na meta-heurística busca tabu (GLOVER, 1989), utilizando como codificação a representação nó-profundidade (RNP) (DELBEM et al., 2004) e a técnica de fluxo de potência por varredura inversa e direta (SHIRMOHAMMADI, et al., 1989).

A restrição de radialidade é um dos fatores mais complicados do problema de restauração. Na literatura tem sido tratada de várias formas como restrições, operadores ou estruturas de codificação. Considerando que a técnica de solução proposta para o problema é uma meta-heurística, neste trabalho para contemplar a restrição de radicalidade é usado um esquema de codificação para as soluções do problema baseado na teoria de grafos, a RNP, a qual têm a característica de produzir topologias para o sistema elétrico com a característica de ser grafos acíclicos, respeitando, dessa forma, a condição de radialidade inerente das redes de distribuição.

Para avaliar as variáveis elétricas em cada uma das configurações encontradas, utiliza-se uma técnica especializada em fluxo de potência de sistemas radiais, o fluxo de varredura inversa e direta, na qual se faz uma pequena adaptação. Com base na RNP pode-se aproveitar essa representação do sistema elétrico radial para o programa de fluxo de potência sem a necessidade de executar a renumeração das barras do sistema, normalmente utilizada no fluxo por varredura.

A busca tabu é uma meta-heurística que apresenta um bom desempenho para a solução do problema de restauração (TOUNE, et al., 2002), e entre outras características, permite

evitar a repetição de configurações visitadas em iterações anteriores, prevenindo a característica de ciclagem dos algoritmos de busca em vizinhança.

Contudo, define-se o objetivo desse trabalho como apresentar uma proposta de solução para resolver o problema de restauração de sistemas de distribuição com geração distribuída, encontrando-se uma configuração pós-falta de boa qualidade via a reconfiguração da rede em um tempo aceitável para o controle real do sistema de distribuição, considerando as necessidades de manter os limites de continuidade (SAIFI – SAIDI), respeitando os limites de operação e fornecendo ao final uma sequência lógica de chaveamentos que garante os aspectos operacionais.

1.4 ESTRUTURA DO TEXTO

Este trabalho está organizado em 5 capítulos.

Neste capítulo introdutório, têm-se apresentado em linhas gerais o problema de restauração de sistemas de distribuição de energia elétrica, uma breve revisão bibliográfica, o objetivo do trabalho e a técnica de solução que será abordada com maior detalhe nos capítulos posteriores.

No capítulo 2, apresentam-se a formulação do problema, uma breve introdução à teoria de grafos, conceitos básicos de geração distribuída, o modelo matemático, as restrições do problema e uma breve discussão das funções objetivos.

No capítulo 3, apresentam-se a metodologia proposta para solução do problema de restauração, uma breve explicação dos conceitos de otimização multiobjetivo, o critério de soma de ponderações de pesos, a RNP, o fluxo radial e sua adaptação à RNP, a meta-heurística busca tabu e os critérios para definir a sequência de chaveamento.

No capítulo 4, apresentam-se os resultados da metodologia proposta obtidos efetuando-se testes em um sistema de 136 barras e um sistema real de 7052 barras.

No capítulo 5, apresentam-se as considerações finais, conclusões e propostas para trabalhos futuros.

2 O PROBLEMA DE RESTAURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

O objetivo principal no serviço de restauração de sistemas de distribuição é que na incidência de uma falta permanente na rede ou sobrecargas, o sistema possa ser restaurado automática ou manualmente mantendo-se energizada a maior quantidade de carga possível através da transferência das cargas desenergizadas em áreas fora de serviço para outros alimentadores, sem violar as restrições físicas ou operacionais da rede. A maior parte dos sistemas de distribuição tem por característica a radialidade da operação, com a possibilidade de alteração da topologia inicial para outras topologias radiais. Essa possibilidade de mudança na configuração permite aumentar os níveis de confiabilidade da rede, permitindo o fornecimento de energia elétrica aos setores da rede que não apresentam faltas, mas que ficam sem fornecimento após uma falta permanente no sistema. De esta forma reduzir a área sem fornecimento de energia permite melhorar a confiabilidade da rede de distribuição.

Neste trabalho, para realizar o procedimento de restauração da rede, utiliza-se uma codificação baseada na teoria de grafos, que é exposta no item 2.1. No item 2.2 apresentam-se conceitos básicos de geração distribuída. No item 2.3 são apresentados os conceitos de otimização multiobjetivo utilizados na elaboração deste trabalho e no item 2.4 o modelo matemático do problema de restauração, através das suas funções objetivo e restrições.

2.1 REPRESENTAÇÃO DAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DE GRAFOS

Nas redes elétricas, assim como em outros tipos de problemas, pode-se utilizar a teoria de grafos como ferramenta de representação matemática da rede. Um grafo consiste em um conjunto de nós e um conjunto de arestas, os quais podem ser utilizados em analogia com as redes elétricas, como o conjunto de barras e os ramos de conexão, respectivamente.

Na definição de um grafo G utiliza-se o conjunto de nós $N(G)$ e o conjunto de arestas $E(G)$ para representá-lo simbolicamente por $G = (N, E)$. Se Y e W são dois nós de um grafo e uma aresta e liga esses dois nós, diz-se que a aresta e é incidente aos nós Y e W (Figura 2). A ordem de um grafo G é dada pelo número de nós $N(G)$ e a dimensão do mesmo é dado pelo número de arestas $E(G)$. O grau de um nó pertencente a $N(G)$ é obtido pelo número de arestas do conjunto $E(G)$ incidentes nesse nó (Tabela 1) (SANCHES, 2013).

como referência dentro de uma árvore. Nós que possuem grau 1 são chamados de nós terminais, exceto se for o nó raiz (SANCHES, 2013).

As redes de energia elétrica podem ser representadas pelos elementos da teoria de grafos. Pela sua característica de radialidade, um sistema de distribuição pode ser representado por uma floresta, cada um dos alimentadores pode ser representado por uma árvore, cada barra pode ser representada por um nó e cada chave ou ramo pode ser representado por uma aresta. Os sistemas de distribuição operam de forma radial, com chaves energizadas que são chamadas ramos de árvore, e chaves não energizadas chamadas ramos de ligação. O problema de restauração de sistemas de energia caracteriza-se por, após localizar e isolar a seção sob falta, iniciar um processo de busca da melhor configuração através da reconfiguração. Esse processo é realizado pela troca adequada de um ramo de árvore por um ramo de ligação.

2.2 CONCEITOS BÁSICOS DE GERAÇÃO DISTRIBUIDA

Na literatura existe um número grande de termos e definições em relação à GD. Termos como ‘geração embutida’, ‘geração dispersa’ ou ‘geração descentralizada’ são aplicados para se referir ao mesmo tipo de geração (ACKERMAN et al., 2000). Embora existam diferenças na definição do ponto de vista da capacidade da geração, nível de tensão, impacto ambiental ou tecnologia, pode-se definir a GD como a geração de energia elétrica próxima aos consumidores com os seguintes atributos (CHOWDHURY et al., 2009):

- Capacidade normalmente menor a 50 MW;
- Não é centralmente planejada nem despachada;
- Usualmente conectada no sistema de distribuição em tensões de 230/415 V até 145 kV.

A GD apresenta-se como uma solução na tentativa de diminuir o consumo de combustíveis fósseis. Tecnologias de GD baseados em recursos renováveis como a incidência solar, vento ou recursos hídricos, podem reduzir o requerimento de reserva de geração centralizada e postergar investimento na transmissão e distribuição (BROWN; FREEMAN, 2001).

A introdução de GD traz benefícios e inconvenientes aos sistemas de distribuição. Da perspectiva que, os sistemas de distribuição foram planejados para serem redes passivas (fornecimento unidirecional de energia desde subestações até consumidores), dependendo do

nível de penetração, dimensionamento das unidades e alocação da GD, podem aumentar os níveis de curto-circuito e gerar inconvenientes na coordenação de proteções (CHAITUSANEY; YOKOYAMA, 2006).

GD com recursos renováveis também apresentam inconvenientes pois os níveis de geração das mesmas dependam de fenômenos naturais, como: a velocidade do vento, radiação solar ou vazão de água. Contudo, os benefícios da introdução de GD nos sistemas de distribuição são interessantes.

As perdas elétricas mudam desde que o fluxo de potência é alterado pela inclusão de GD no sistema. Pequenos geradores alocados perto a uma carga grande, podem reduzir as perdas no momento que parte da carga é fornecido pelo GD, entretanto, se um grande gerador encontra-se afastado das cargas pode aumentar as perdas do sistema (no presente trabalho, os nós onde a GD está alocada é um dado de entrada).

Nas redes passivas o fluxo de corrente percorre transformadores e linhas de transmissão, reduzindo a magnitude de tensão nas cargas (LOPEZ, 2011) e são as concessionárias as encarregadas de garantir um nível de tensão dentro de uma faixa predefinida. Para isto instalam-se equipamentos como capacitores fixos, condutores de um diâmetro especificado, ou utiliza-se o controle automático de taps dos transformadores ou capacitores chaveados. A presença de GD pode modificar o perfil de tensão ao interagir com as equipamentos de controle de tensão, por isto, a GD geralmente não é orientada a controlar o perfil tensão embora o modifique. Dependendo da tecnologia da GD, um gerador síncrono pode consumir e fornecer reativos, e um gerador assíncrono apenas consome.

A confiabilidade de um sistema pode aumentar, desde que existe a possibilidade de alimentar um grupo de cargas com um GD de forma ilhada. As cargas normalmente exigem um valor de potência ativa e reativa, para as quais o GD deve fornecer deixando uma porcentagem como reserva para variações de carga. O uso de GD de forma ilhada no Brasil não é proibido embora tenha que constar em um acordo operativo entre a concessionária e a encarregada da GD (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA- ANEEL, 2009).

Entre as principais tecnologias de GD com recursos renováveis, tem-se:

a. Gerador solar fotovoltaico

Trata-se da energia elétrica obtida a partir da incidência da radiação solar. Esta tecnologia apresenta vantagens ambientais ao não consumir combustível nem produzir ruído, e vantagens econômicas devido ao baixo custo de manutenção, a possibilidade de instalação

em curto prazo e em lugares afastados dos centros populacionais. Entre as desvantagens, tem-se a produção de intermitente energia e apenas durante o dia, além dos altos custos de investimento.

Tabela 2 - Principais características da energia solar fotovoltaica.

Faixa de capacidade	1 kW – 1MW
Eficiência	6 a 19%
Custo de capital (\$ / kW)	2000 – 3000
Custo de operação e manutenção (\$ / kW)	0,001 – 0,004
Disponibilidade comercial	Amplamente disponível

Fonte: Lopez (2011).

b. Gerador eólico

O gerador eólico fornece energia elétrica a partir da velocidade do vento, e pelo fato da inconstância deste recurso, existe uma baixa previsibilidade da potência gerada, sendo uma fonte de energia intermitente. A potência gerada pela GD eólica tem uma relação direta com a altura ao qual o vento incide nas pás do aerogerador, uma maior altura reduz os efeitos da rugosidade do terreno, prédios e áreas florestais. Pode-se instalar desde pequenas até grandes centrais, o que permite, se for necessária, a operação ilhada com determinada carga.

Tabela 3 - Principais características da energia eólica.

Faixa de capacidade	150 kW – 3 MW
Custo de capital (\$ / kW)	1000 - 1500
Custo de operação e manutenção (\$ / kW)	0.006 – 0.01
Disponibilidade comercial	Amplamente disponível

Fonte: Lopez (2011).

c. Gerador hidrelétrico

São geradores que aproveitam a energia potencial e cinética da água. Os níveis de geração dependem da topografia da área e dos índices de precipitação anuais. Estes geradores, normalmente, sem represas de água têm consideráveis variações de geração devido a variação

do fluxo de água causado pelas chuvas não constantes, ao mesmo tempo, estas variações do recurso de água produzem uma geração variável com um fator de capacidade baixo (relação entre a energia anual disponível e a capacidade anual máxima).

A potência de saída de uma turbina hidrelétrica está relacionada com a seguinte expressão:

$$P = QH\eta\rho g \quad (1)$$

Em que:

P : potência hidráulica útil

Q : vazão de água

H : altura da queda de água

η : rendimento global da conversão hidráulica

ρ : massa específica da água

g : aceleração da gravidade

Vários tipos de turbina são utilizados dependendo da altura da queda e dos índices de fluxo de água. Geralmente, as turbinas de reação extraem energia da queda de pressão e operam a alturas menores (turbinas Francis e Kaplan) e as de impulso aproveitam a energia cinética da água (turbinas Pelton e Turgo). Para hidrelétricas de pequeno porte, pode-se utilizar geradores síncronos e assíncronos, embora tenha-se que prevenir no projeto, o dano pela sobrevelocidade ante a intempestiva perda de carga (CHOWDHURY, et al., 2009).

2.3 CONCEITOS DE OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO

Normalmente, não existe uma solução que seja ótima para todos os alvos simultaneamente. Devido a uma relação conflitante entre os objetivos, a melhoria de um deles pode significar a degradação de outro.

Pode-se representar um problema de otimização multiobjetivo como:

$$\text{Min } y = f(x) = \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_M(x)\} \quad (2)$$

s. a.

$$g(x) = \{g_1(x), g_2(x), \dots, g_J(x)\} \leq 0$$

$$h(x) = \{h_1(x), h_2(x), \dots, h_K(x)\} = 0$$

$$x = \{x_1, x_2, \dots, x_N\} \in X$$

$$y = \{y_1, y_2, \dots, y_M\} \in Y$$

Em que x é o vetor de decisão e y é o vetor de objetivos, $g(x)$ conjunto de inequações e $h(x)$ conjunto de equações do problema, X é o espaço de decisão e Y é chamado de espaço de objetivos (SEDANO, 2005). Na literatura encontram-se diferentes técnicas de otimização clássica e meta-heurísticas para solução de problemas multio objetivo em falta objetivos. Neste trabalho o modelo matemático do problema de restauração é resolvido através da busca tabu e os objetivos são considerados através da soma das ponderações de pesos.

2.3.1 Critério de soma de ponderações de pesos

As funções objetivo são trabalhadas com o método de ponderações de pesos, escolhendo os coeficientes de acordo com a importância das funções objetivos. Desta forma o problema multiobjetivo original é transformado em um problema mono-objetivo (3).

$$\min \sum_{i=1}^M w_i f_i(\bar{x}) \quad (3)$$

Em que:

$$\sum_i^M w_i = 1$$

$$w_i \geq 0$$

$$i = 1, 2, \dots, M$$

$\bar{x}$ são as variáveis do problema

- Conjunto de restrições do problema (seção 2.4.2).

Sendo f_i a função objetivo a minimizar (seção 2.4.1), w_i o coeficiente ponderado da função i , e M o número de funções objetivos.

2.4 MODELO MATEMÁTICO DO PROBLEMA DE RESTAURAÇÃO

No problema de restauração procura-se minimizar a quantidade de consumidores fora de serviço após uma falta, com o mínimo número de chaveamentos possível. Restaurado o sistema, deve-se respeitar a qualidade do serviço com uma operação segura, respeitando as restrições físicas e operacionais do problema.

2.4.1 Funções objetivos

a. Minimizar o número de consumidores fora de serviço

Um dos principais objetivos no problema de restauração de sistemas de energia elétrica é minimizar a quantidade de consumidores sem fornecimento de energia. As seções, as quais estão delimitadas por elementos de manobras, podem ficar energizadas de acordo com a situação do sistema após a restauração. Neste trabalho, utiliza-se a potência demandada nas barras como forma de representar os consumidores, e o termo da função objetivo que representa o número de consumidores fora de serviço é representada por:

$$\text{Min} \sum_{c \in \Omega_s} (P_{SO_c} \cdot X_{SO_c}) \quad (4)$$

Em que:

$$P_{SO_c} = \sum_{i \in \Omega_b} P_{B_i} \quad \forall B_i \in SO_c$$

P_{SO_c} : potência ativa demandada na seção c .

SO_c : seção c do sistema.

X_{SO_c} : variável binária que indica $X_{SO_c} = 0$, se a seção está energizada e $X_{SO_c} = 1$, se a seção fica sem fornecimento de energia após o restabelecimento.

Ω_s : conjunto de seções do sistema

P_{B_i} : potência ativa demandada na barra B_i .

B_i : barra i do sistema.

Ω_b : conjunto de barras do sistema.

c : índice das seções do sistema.

i : índice das barras do sistema.

b. Minimizar o número de chaveamentos

Existe uma relação direta entre o tempo necessário para o restabelecimento e o tempo para efetuar os chaveamentos. Minimizar o número de chaveamentos também permite reduzir os danos nos equipamentos, ao longo das redes primárias e secundárias, por comportamentos transitórios de correntes e tensões que estas manobras podem provocar através dos transitórios eletromagnéticos na rede (MATHIAS NETO, 2011). A função objetivo que representa o número de chaveamentos para restaurar a rede é dado por:

$$\text{Min} \sum_{k \in NCH} |\overline{CH}_k - \overline{CH}_k^0| \quad (5)$$

Em que:

$\overline{CH}_k$: estado atual da chave k .

$\overline{CH}_k^0$: estado inicial da chave k .

k : índice da chave do sistema.

NCH : Conjunto de chaves de manobras disponíveis para restaurar a rede.

2.4.2 Restrições

As restrições que devem ser consideradas no modelo matemático do problema de restauração são de natureza física e operacional. A seguir, apresentam-se os modelos matemáticos das restrições consideradas no problema de restauração de redes.

a. Capacidade de fluxo de potência da subestação

O nível máximo de fluxo de potência nos transformadores da subestação deve ser mantido menor ou igual do seu limite operacional.

$$S_T \leq S_T^{MAX} \quad \forall T \in NT \quad (6)$$

Em que:

T : índice do transformador.

NT : conjunto de transformadores de subestação do sistema.

S_T : fluxo de potência aparente que percorre o transformador.

S_T^{MAX} : potência máxima do transformador T .

b. Capacidade de fluxo nos ramos

O fluxo de corrente nos ramos é limitado pela capacidade máxima do condutor.

$$I_r \leq I_r^{MAX} \quad \forall r \in \Omega_r \quad (7)$$

Em que:

r : índice do ramo.

Ω_r : conjunto de ramos do sistema.

I_r^{MAX} : corrente máxima definida para cada ramo r .

I_r : corrente através do ramo r .

c. Magnitude de tensão

O perfil de tensão tem que se manter dentro dos limites definidos para assegurar a qualidade do fornecimento.

$$V^{MIN} \leq V_{B_i} \leq V^{MAX} \quad \forall i \in \Omega_b \quad (8)$$

Em que:

B_i : barra i do sistema.

Ω_b : conjunto de barras do sistema.

V_{B_i} : módulo da tensão em cada barra B_i .

V^{MIN} : limite mínimo de tensão em cada barra do sistema.

V^{MAX} : limite máximo de tensão em cada barra do sistema.

d. Potência ativa dos geradores distribuídos

A potência ativa fornecida pelos geradores distribuídos deve respeitar os limites operacionais do gerador.

$$P_{i,g}^{MIN} \leq P_{i,g} \leq P_{i,g}^{MAX} \quad \forall g \in \Omega_g \quad (9)$$

Em que:

g : índice do gerador.

Ω_g : conjunto de geradores distribuídos do sistema.

$P_{i,g}$: potência ativa fornecida no nó i pelo gerador g .

$P_{i,g}^{MIN}$: potência ativa mínima fornecida pelo gerador g ao nó i .

$P_{i,g}^{MAX}$: potência ativa máxima fornecida pelo gerador g ao nó i .

e. Potência reativa dos geradores distribuídos

A potência reativa fornecida pelos geradores distribuídos deve respeitar os limites operacionais do gerador.

$$Q_{i,g}^{MIN} \leq Q_{i,g} \leq Q_{i,g}^{MAX} \quad \forall g \in \Omega_g \quad (10)$$

Em que:

$Q_{i,g}$: potência reativa fornecida no nó i pelo gerador g .

$Q_{i,g}^{MIN}$: potência reativa mínima fornecida pelo gerador g ao nó i .

$Q_{i,g}^{MAX}$: potência reativa máxima fornecida pelo gerador g ao nó i .

f. Equações de fluxo de potência

As equações são baseadas na primeira e segunda Lei de Kirchoff que devem ser mantidas com vistas a atender as demandas de potência ativa e reativa do sistema.

$$P_{s_i} - (P_{B_i} - P_{i,g}) - \sum_{(j \in \Omega_{bi})} (x_{ij} P_{ij}) = 0 \quad \forall i \in \Omega_b \quad (11)$$

$$Q_{s_i} - (Q_{B_i} - Q_{i,g}) - \sum_{(j \in \Omega_{bi})} (x_{ij} Q_{ij}) = 0 \quad \forall i \in \Omega_b \quad (12)$$

Em que:

P_{s_i} : potência ativa fornecida pela subestação da barra i

P_{B_i} : demanda de potencia ativa na barra B_i

Q_{s_i} : potência reativa fornecida pela subestação da barra i

Q_{B_i} : demanda de potência reativa na barra B_i

x_{ij} : variável binária que determina se o circuito entre as barras i e j está aberto (0) ou fechado (1)

P_{ij} : fluxo de potência ativa que sai da barra i para a barra j

Q_{ij} : fluxo de potência reativa que sai da barra i para a barra j

Ω_{bi} : conjunto de barras conectadas na barra i

Ω_b : conjunto de barras do sistema

g. Radialidade

$$\sum_{(j \in \Omega_{bi})} x_{ij} \leq n_b - 1 \quad \forall i \in \Omega_b \quad (13)$$

Em que:

n_b : número de barras do sistema

Este modelo matemático garante conectividade do subgrafo de uma solução através das equações (11), (12) e número inferior de ramos em relação aos nós por meio da equação (13). No entanto, a técnica de solução proposta, como apresentada no Capítulo 3, utiliza os operadores da RNP (DELBEM, 2004) como critério de vizinhança. Estes operadores, quando aplicados ao modelo de otimização, garantem o atendimento à equação (13), e, conseqüentemente, a radialidade das soluções geradas.

3 METODOLOGIA PROPOSTA

A metodologia proposta para o problema de restauração de sistemas de distribuição, consiste em um algoritmo de busca tabu, que utiliza a RNP como codificação das soluções, aproveita sua estrutura de organização grafo-orientada em ordem de níveis de profundidade para adaptar o método de varredura inversa e direta (SHIRMOHAMMADI et al., 1988), e faz uso dos seus operadores *Preserve Ancestor Operator* (PAO), *Change Ancestor Operator* (CAO) (DELBEM, et al., 2004) e CUT (MATHIAS NETO, 2014) para a geração de vizinhos. Por fim apresenta-se uma proposta para determinar, durante o processo de restauração da rede, a sequência de chaveamentos.

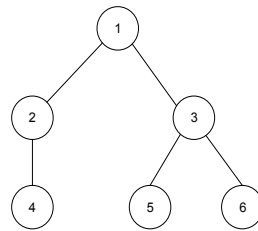
3.1 REPRESENTAÇÃO NÓ-PROFUNDIDADE

A RNP apresenta-se como uma ferramenta útil para a representação de sistemas de distribuição pelas suas características: possibilita a codificação eficiente das topologias radiais de sistemas grandes e os seus operadores geram grafos acíclicos, respeitando a restrição de radialidade dos sistemas de distribuição de energia elétrica.

3.1.1 Codificação da Representação Nó-Profundidade

A codificação da RNP é baseada na distância entre o nó raiz, previamente definido, e o nó de análise. A cada passagem por um nó, da raiz até o nó sob análise aumenta-se a profundidade em uma unidade, sendo que a raiz está localizada na profundidade 0.

Figura 3 – Exemplo de árvore e sua RNP.



$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 & 1 & 2 & 2 \\ 1 & 2 & 4 & 3 & 5 & 6 \end{bmatrix} \begin{matrix} \leftarrow \textit{profundidade} \\ \leftarrow \textit{nó} \end{matrix}$$

Fonte: Próprio autor.

A disposição da codificação é feita em uma matriz de dimensões 2 x NB. O número de colunas NB é dado de acordo com a quantidade de barras do alimentador. Cada par de elementos (n_x , p_x) é produzido a partir do nó raiz e continua na sequência de cada nó ao ser visitado.

3.1.2 Operadores

Os operadores PAO, CAO e CUT são aplicados em uma floresta F de um grafo G, para gerar uma nova floresta F'. A aplicação do operador CAO gera mudanças mais complexas que o operador PAO na floresta na qual é aplicado. O operador CUT gera corte de carga e/ou operação ilhada de certa região do sistema.

a. Operador PAO

O operador PAO foi desenvolvido para realizar pequenas alterações em uma floresta F composta de, no mínimo, duas árvores. Na execução do operador PAO, escolhem-se duas árvores que serão chamados T_{DE} e T_{PARA} . O operador PAO transfere uma sub-árvore da árvore T_{DE} para a árvore T_{PARA} . A raiz da sub-árvore podada será também a raiz da sub-árvore na nova árvore.

O operador PAO requer uma seleção de um nó de poda p (i_p) e de um nó adjacente a (i_a) nas árvores T_{DE} e T_{PARA} , respectivamente. O nó de poda p indica a raiz da sub-árvore que é para ser transferida e o nó adjacente a indica o nó ao qual será transferida a sub-árvore.

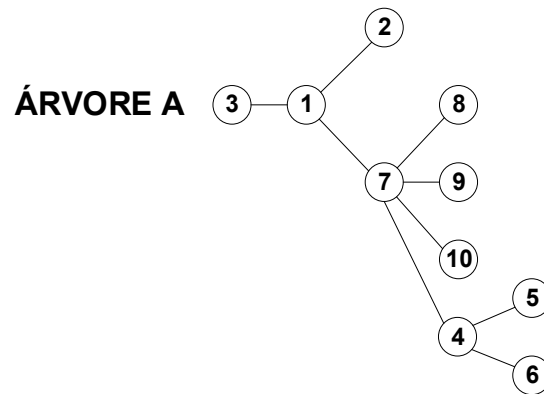
Os passos para executar o operador PAO são:

1. Com os índices i_p e i_a e as profundidades p_p e p_a dos nós a e p , devidamente identificados, encontrar a sub-árvore com raiz em p na árvore T_{DE} . Para isso necessita-se encontrar i_1 que é o índice do último nó da sub-árvore. Defina-se o conjunto (i_p, i_1) que corresponde aos índices i_x que iniciam no nó p em i_p e os consecutivos nós na segunda linha da matriz T_{DE} tal que $i_x > i_p$ e $p_x > p_p$.
2. Defina-se a matriz temporária T_{TEMP} com os termos do conjunto (i_p, i_1) . A profundidade de cada termo i_x é atualizada segundo a equação: $p_x = p_x - p_p + p_a + 1$, onde p_x , p_p e p_a são as profundidades dos nós x , p e a , respectivamente.
3. Cria-se a matriz T_{PARA}' , incorporando a matriz T_{TEMP} na posição $i_a + 1$ na matriz T_{PARA} .
4. Atualiza-se a matriz T_{DE} tirando os elementos da matriz T_{TEMP} da matriz T_{DE} gerando a nova matriz T_{DE}' .
5. Atualiza-se a floresta F por F' , substituindo T_{DE} e T_{PARA} por T_{DE}' e T_{PARA}' , respectivamente.

Seja o exemplo da Figura 4. A floresta F consiste em duas árvores, a árvore A com nó raiz em 3, possui 10 elementos representados por nós ligados entre eles por arestas, e a árvore B com um único nó 11. Escolhem-se o nó de poda (p) e o nó adjacente (a) do operador, cujos nós devem ter a possibilidade de interligação.

Na Figura 5, executa-se a transferência da sub-árvore com nó raiz em 4 (nó de poda) em direção à árvore com nó raiz em 11. Para isto cria-se uma matriz temporária (Figura 6), a qual é retirada da sua árvore inicial e alocada na árvore escolhida no nó adjacente 11 (Figura 7).

Figura 4 – Exemplo de árvores para o operador PAO.



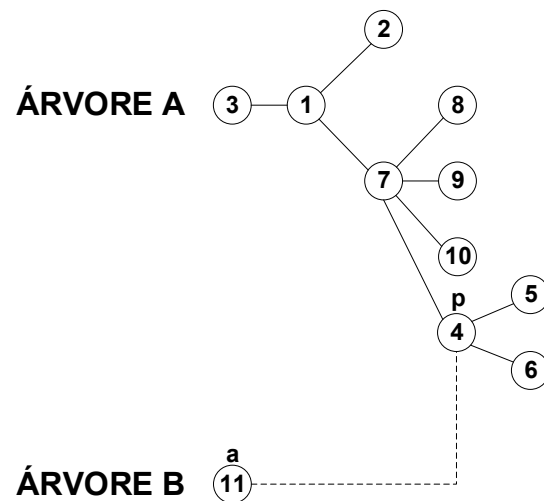
ÁRVORE B (11)

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 & 2 & 3 & 3 & 3 & 3 & 4 & 4 \\ 3 & 1 & 2 & 7 & 8 & 9 & 10 & 4 & 5 & 6 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 11 \end{bmatrix}$$

Fonte: Delbem et al. (2004).

Figura 5 – Seleção de índices para operador PAO.



$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 & 2 & 3 & 3 & 3 & 3 & 4 & 4 \\ 3 & 1 & 2 & 7 & 8 & 9 & 10 & 4 & 5 & 6 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 11 \end{bmatrix}$$

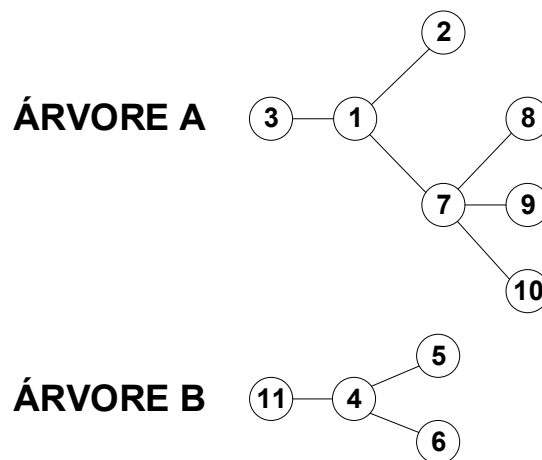
Fonte: Delbem et al (2004).

Figura 6 – Matriz temporária para operador PAO.



Fonte: Delbem et al. (2004).

Figura 7 – Árvores finais após operador PAO.



$$A' = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 & 2 & 3 & 3 & 3 \\ 3 & 1 & 2 & 7 & 8 & 9 & 10 \end{bmatrix}$$

$$B' = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 & 2 \\ 11 & 4 & 5 & 6 \end{bmatrix}$$

Fonte: Delbem et al. (2004).

b. Operador CAO

O operador CAO foi elaborado para realizar maiores e mais significativas alterações na floresta F. Além do corte em uma das árvores de F e, consequente, transferência à outra árvore da floresta, na execução do operador CAO, o nó de poda p não será a raiz da sub-árvore de transferência. Escolhem-se duas árvores que serão chamados T_{DE} e T_{PARA} o operador CAO transfere uma sub-árvore da árvore T_{DE} para a árvore T_{PARA} . A sub-árvore transferida utiliza uma nova raiz que será um nó adequado da sub-árvore, diferente da raiz original. A sub-árvore cortada é reordenada em função de uma nova raiz. Esta reordenação altera significativamente a topologia de F.

O operador CAO requer uma seleção de um nó de poda p (i_p) e um nó como nova raiz r (i_r) na árvore T_{DE} , e um nó adjacente a (i_a) na árvore T_{PARA} . O nó p indica o nó de poda e o nó r indica a nova raiz da sub-árvore para transferir, o nó adjacente a indica o nó ao qual a sub-árvore será transferida.

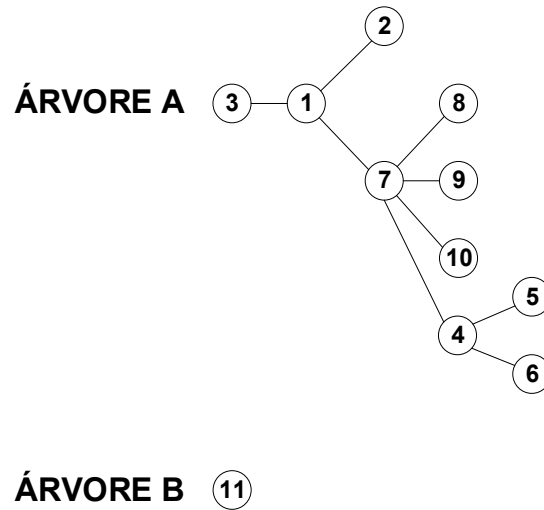
Os operadores CAO e PAO são similares, sendo que a diferença se encontra nos passos 2 e 3 do procedimento do operador PAO, na formação da matriz correspondente à seção do alimentador a ser podada e no armazenamento da matriz temporária.

O primeiro passo é similar, com a diferença de que no operador CAO, os índices i_r e i_p devem ser trocados. No próximo passo devem-se considerar os nós de r até p , sendo $r_0, r_1, r_2, \dots, r_n$, onde $r_0 = r$ e $r_n = p$, como raízes de sub-árvores. Copia-se a sub-árvore enraizada em r_i ($i = 1, 2, \dots, n$), sem a sub-árvore enraizada em r_{i-1} , e armazena-se o resultado das sub-árvores na matriz temporária T_{TEMP1} . Cria-se a matriz T_{PARA}' contendo os nós de T_{PARA} e insere-se depois a matriz T_{TEMP1} na posição $i_a + 1$ de T_{PARA} . No próximo passo, atualizam-se as matrizes T_{PARA}' e T_{DE}' (SANCHES, 2012).

Como exemplo gera-se uma nova configuração utilizando o operador CAO a partir da floresta F (Figura 8). Escolhem-se o nó p (nó 1), o nó r (nó 4) e o nó a (nó 11) do operador. Os nós raiz e adjacente devem ter a possibilidade de interligação (Figura 9).

Na Figura 10, geram-se as sub-árvores enraizadas entre os nós raiz e poda (nós 4, 7 e 1). Na Figura 11 gera-se a matriz temporária, formada pelas sub-árvores do passo anterior, que será inserida na posição contínua ao nó adjacente (Figura 12).

Figura 8 – Exemplo de árvores para o operador CAO.

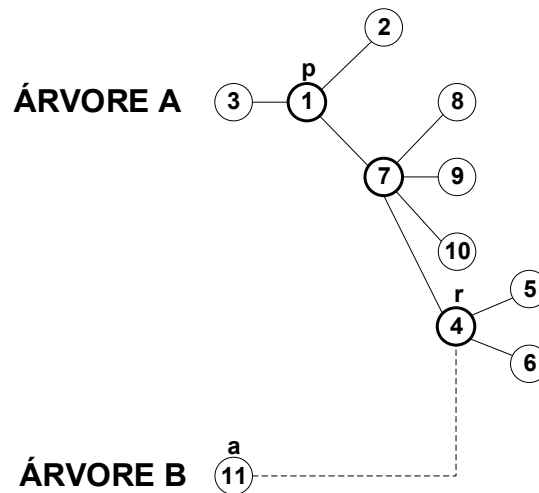


$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 & 2 & 3 & 3 & 3 & 3 & 4 & 4 \\ 3 & 1 & 2 & 7 & 8 & 9 & 10 & 4 & 5 & 6 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 11 \end{bmatrix}$$

Fonte: Delbem et al. (2004).

Figura 9 – Seleção de índices para o operador CAO.

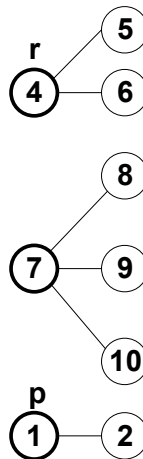


$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 & 2 & 3 & 3 & 3 & 3 & 4 & 4 \\ 3 & 1 & 2 & 7 & 8 & 9 & 10 & 4 & 5 & 6 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 11 \end{bmatrix}$$

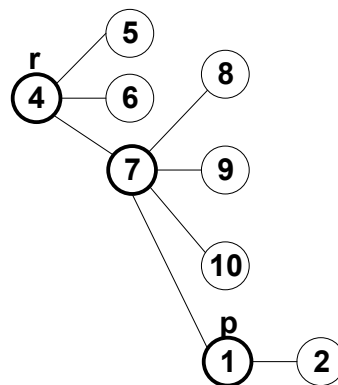
Fonte: Delbem et al. (2004).

Figura 10 – Sub-árvores auxiliares para o operador CAO.



Fonte: Delbem et al. (2004).

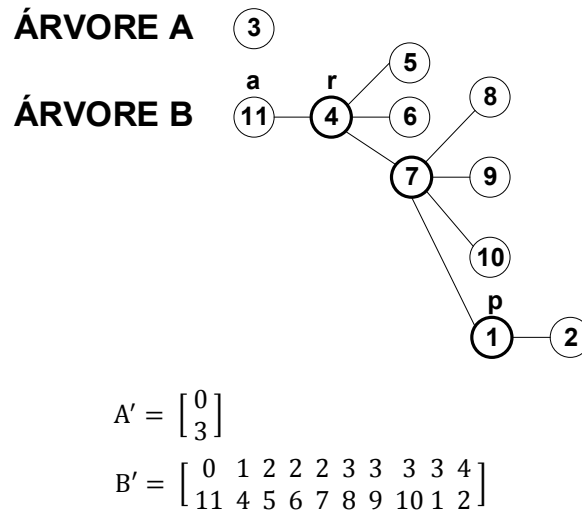
Figura 11 – Matriz temporária para o operador CAO.



$$\text{Matriz Temporária} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 2 & 2 & 3 & 3 & 3 & 3 & 4 \\ 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

Fonte: Delbem et al. (2004).

Figura 12 – Representações finais após o operador CAO.



Fonte: Delbem et al. (2004).

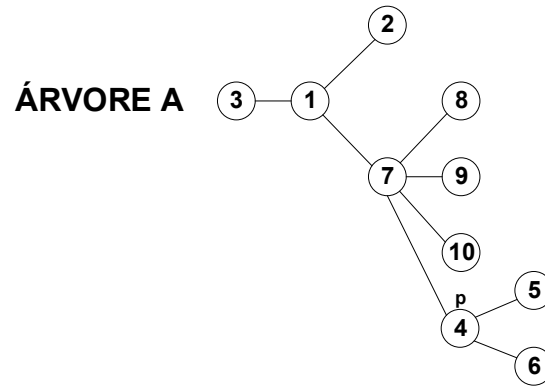
c. Operador CUT

O operador CUT (MATHIAS NETO, 2014) é um operador destinado a contemplar as necessidades físicas do problema de restauração, ou seja, o corte de carga e a operação ilhada de geradores distribuídos. Este operador poda uma sub-árvore de um alimentador e não o transfere para outro alimentador, gerando desta forma, uma nova árvore na floresta sob análise. O operador CUT, diferentemente dos anteriores, deve ser aplicado em apenas uma árvore da floresta F e possui a característica de ampliar em uma unidade seu número de árvores.

A inserção do operador CUT sugere relaxar a restrição do trabalho original de DELBEM, et al., 2004, que proíbe ao nó de poda p , dos operadores PAO e CAO, ser a raiz de um alimentador. A finalidade de eliminar esta restrição é permitir o processo inverso que o operador CUT gera.

Seja a floresta F (Figura 13), aplica-se o operador CUT para gerar uma nova árvore C a partir da árvore inicial A, para isto escolhe-se um nó de poda p (nó 4) (Figura 14).

Figura 13 – Exemplo de árvores para o operador CUT.



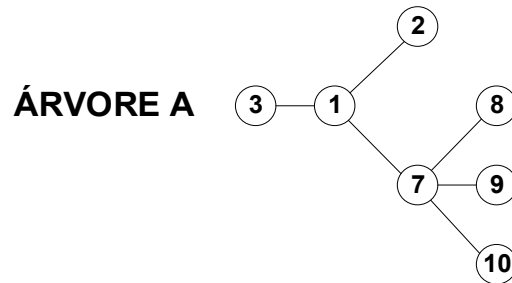
ÁRVORE B (11)

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 & 2 & 3 & 3 & 3 & 3 & 4 & 4 \\ 3 & 1 & 2 & 7 & 8 & 9 & 10 & 4 & 5 & 6 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 11 \end{bmatrix}$$

Fonte: Delbem ,et al. (2004).

Figura 14 – Representações finais após o operador CUT. Adaptado da fonte.



ÁRVORE B (11)



$$A' = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 & 2 & 3 & 3 & 3 \\ 3 & 1 & 2 & 7 & 8 & 9 & 10 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 11 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 4 & 5 & 6 \end{bmatrix}$$

Fonte: Delbem et al. (2004).

3.1.3 Posição de um nó na floresta F

A posição de um nó na floresta F pode ser determinada utilizando-se a matriz auxiliar π_x e o vetor π . A matriz auxiliar π_x contém a identificação do vértice, sua floresta, sua árvore e sua posição na estrutura RNP. O vetor π armazena, em cada posição, o ancestral da floresta representada naquela posição (DELBEM et al., 2004).

A matriz auxiliar π_x apresenta os seguintes dados:

$$\pi_x = \begin{bmatrix} f \\ a \\ i \\ p \end{bmatrix}$$

Em que:

f : número da floresta sob análise.

a : número da árvore que contém o nó x .

i : índice de posição correspondente a x na árvore.

p : profundidade de x na árvore.

Ao utilizar os operadores PAO, CAO e CUT geram-se novas configurações e se o nó x é parte da árvore que está presente na floresta anterior para gerar a floresta posterior, então se insere uma nova coluna em π_x com os valores da nova posição.

$$\pi_x = \begin{bmatrix} 0 \dots anterior \dots posterior \\ a_0 \dots anterior \dots posterior \\ i_0 \dots anterior \dots posterior \\ p_0 \dots anterior \dots posterior \end{bmatrix}$$

3.1.4 Aplicação da RNP em Seções

Neste trabalho, utiliza-se a divisão do sistema em seções. As seções são conjuntos de trechos de rede compreendidos entre dois ou mais dispositivos que podem ser utilizados para manobras (MATHIAS NETO, 2011), e particularmente, para o problema de restauração. As seções reduzem o tempo da codificação do sistema e da geração de novas configurações.

A RNP para seções é similar a RNP para barras, levando-se as seguintes considerações na representação de uma árvore do grafo:

- Os vértices representam seções.
- As arestas representam as chaves de manobras.
- Insira-se uma nova matriz auxiliar π_s que armazena os dados das seções do sistema. A geração de novas configurações via os operadores PAO, CAO e CUT, será feita utilizando as seções.
- A matriz auxiliar π_x continua armazenando os dados de posição dos nós x do sistema.
- O vetor π continua armazenando o ancestral da floresta em cada posição.

O fluxo de potência é implementado utilizando a matriz auxiliar π_x considerando todas as barras de carga, evitando qualquer tipo de simplificação para não reduzir o grau de confiabilidade dos resultados fornecidos pelo modelo.

3.2 FLUXO DE POTÊNCIA

O cálculo de fluxo potência permite conhecer os valores das variáveis elétricas de um sistema em determinado ponto de operação, apresentando-se como uma “fotografia” desse momento, fornecendo as magnitudes de tensão nas barras, corrente e fluxo das potências ativa e reativa nos ramos, e as subseqüentes perdas de potência.

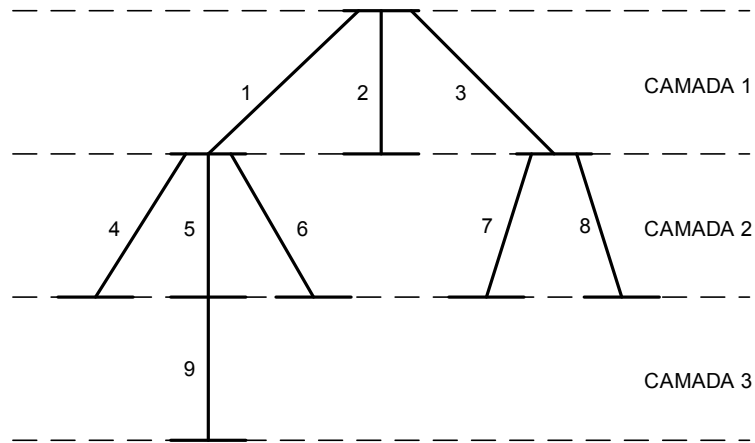
O método de varredura inversa e direta (SHIRMOHAMMADI et al., 1988), é largamente utilizado na literatura para o cálculo de fluxo de potência em sistemas de distribuição radiais, devido a sua rápida convergência e uma fácil implementação computacional. O método de varredura pode-se estender a sistemas fracamente malhados, embora o método torna-se lento e impreciso quando mais malhas tiver o sistema.

O método de varredura exige uma etapa de pré-processamento, na qual, o sistema de distribuição grafo-representado é organizado em camadas de acordo com o afastamento das barras ao nó raiz (nó da subestação) e renumeram-se as linhas por camadas. A renumeração das linhas em uma camada inicia depois que todas as linhas de uma camada prévia são numeradas (Figura 15).

Existem dois métodos de fluxo de potência baseados no método de varredura, o primeiro utiliza a soma de correntes no algoritmo (CHENG; SHIRMOHAMMADI, 1995) e o

segundo utiliza a soma de potências (BARAN; WU, 1989). Neste trabalho utiliza-se o primeiro destes.

Figura 15 – Exemplo de renumeração em camadas.



Fonte: Próprio autor.

A seguir, detalham-se os passos do método de varredura inversa e direta com soma de correntes:

Passo 1. Organizar em camadas e renumerar as linhas do sistema radial.

Passo 2. Estabelecer uma tensão para todas as barras, geralmente $V = 1$ p.u.

Passo 3. Calcular a corrente nodal em cada uma das barras do sistema, segundo a seguinte expressão:

$$I_i^{(k)} = \left(S_i / V_i^{(k-1)} \right)^* - Y_i \cdot V_i^{(k-1)} \quad (14)$$

Em que:

I_i : injeção de corrente no nó i .

S_i : injeção de potência no nó i .

V_i : tensão no nó i .

Y_i : soma dos elementos shunt presentes no nó i .

k : iteração atual.

i : nós sob análise.

j : nó sob análise.

Passo 4. Iniciar a etapa de varredura inversa. Soma de correntes pelos ramos, desde os nós extremos do alimentador até o nó raiz.

$$J_L^{(k)} = -I_j^{(k)} + \sum_{a=1,n} J_{j-a}^{(k)} \quad (15)$$

Em que:

J_L : fluxo de corrente através do ramo L .

L : ramo entre as barras i e j .

Passo 5. Inicia-se a etapa de varredura direta. Atualizam-se os valores de tensões nas barras desde o nó raiz até os nós mais afastados.

$$V_j^{(k)} = V_i^{(k)} - Z_L \cdot J_L^{(k)} \quad (16)$$

Em que:

Z_L : Impedância do ramo L .

Uma forma de melhorar o método de varredura é reduzindo o tempo na etapa de pré-processamento. Santos et al. (2008), propõem implementar os métodos de fluxo de potência de varredura utilizando a RNP, melhorando desta forma, o armazenamento, acesso e uso da informação através do grande número de vezes que um fluxo de potência deve ser executado ao obter novas configurações em problemas de otimização como a reconfiguração ou a restauração de sistemas distribuição.

Neste trabalho utiliza-se o algoritmo de fluxo por varredura com o método de somas de corrente e a RNP, aproveitando o fato que na RNP os nós do sistema sempre estão organizados em uma ordem de níveis de profundidade em relação ao nó raiz, evitando a necessidade de um algoritmo para organizar o sistema de distribuição, e dessa forma, reduzir o tempo de processamento do algoritmo.

3.3 BUSCA TABU

Busca tabu (GLOVER, 1990) é uma meta-heurística (método heurístico de propósito geral) que gerencia processos básicos através de um espaço de busca com o fim de encontrar ótimos locais, baseando-se no histórico e nas características das soluções geradas no processo.

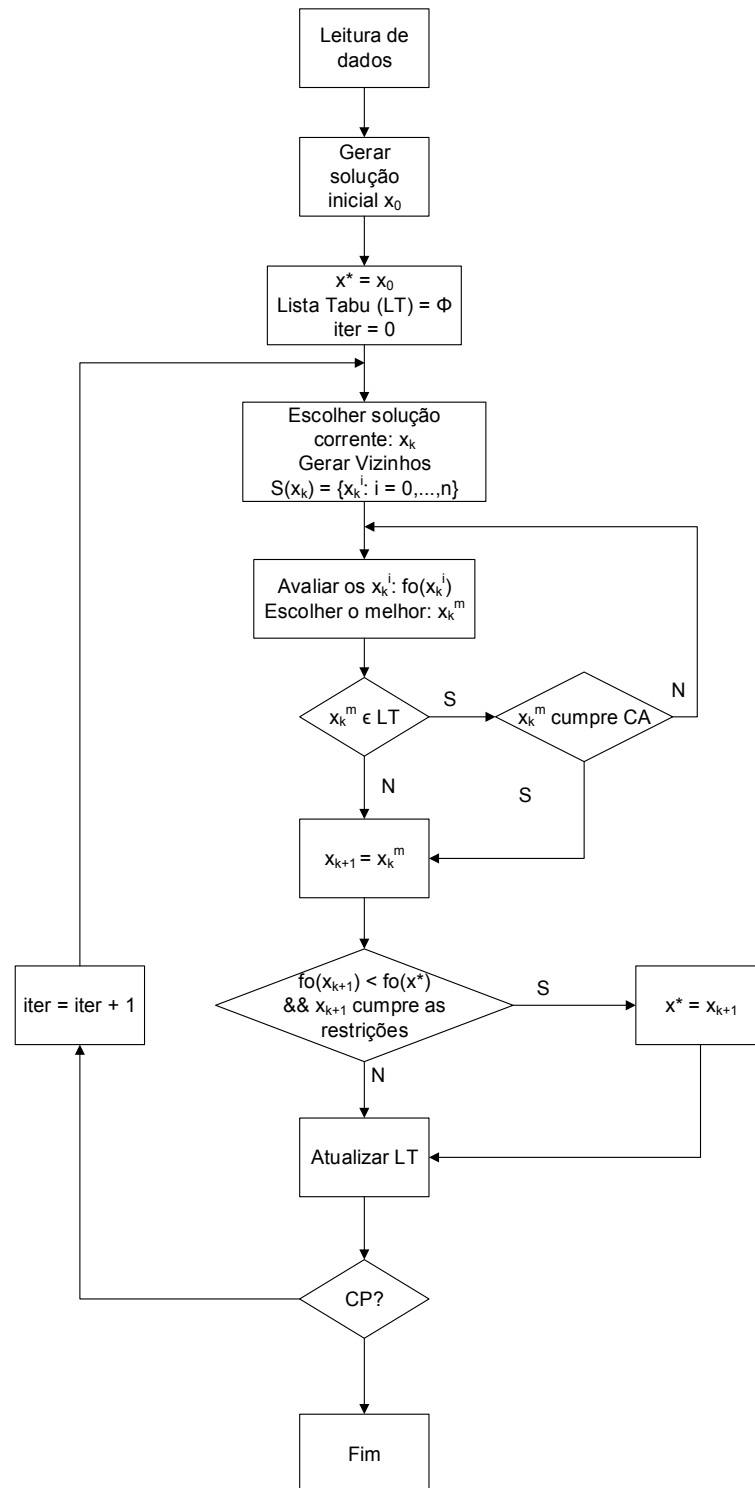
Busca Tabu caracteriza-se pelo uso da memória adaptativa (diferenciando-se de métodos sem memória ou memória fixa) na procura de soluções de boa qualidade. Este tipo de memória armazena, em um curto ou longo prazo, atributos ou configurações completas que mudam na obtenção de novas soluções. Outra característica de busca tabu é o uso da exploração sensível, baseada na premissa que uma solução de má qualidade obtida através de uma série de procedimentos fornece mais informação que uma solução gerada aleatoriamente. Para isto utilizam-se estratégias de diversificação, intensificação e oscilações estratégicas.

3.3.1 Algoritmo básico de busca tabu

Busca tabu inicia-se com uma solução inicial gerada, de forma aleatória ou através de uma heurística particular ao problema sob análise. Esta solução inicial (factível ou não, dependendo do problema em análise) é o ponto de partida da exploração do espaço de busca. Para tal fim, são necessárias estruturas de vizinhanças. As estruturas de vizinhança devem permitir gerar uma quantidade de possíveis novas soluções com relativo equilíbrio em intensificação e diversificação, possibilitando uma procura exaustiva local em uma grande área do espaço de busca. Uma vez gerada a vizinhança da solução inicial, cada candidato é avaliado com relação a uma função objetivo, e aquele que apresentar o melhor resultado passa a ser a solução incumbente. Este processo é repetido até que um critério de parada seja atingido. O processo de busca e seleção da solução incumbente é limitado por uma lista que armazena certas características de soluções passadas de intervalo predefinido (lista tabu) e incentivado se alguma condição é cumprida (critério de aspiração).

Na Figura 16, apresenta-se o algoritmo básico de busca tabu, em que x^0 é a solução inicial, $S(x)$ é a vizinhança ao redor de x , x^* é a solução incumbente, f_o a função objetivo, CA é o critério de aspiração e CP critério de parada.

Figura 16 – Diagrama de blocos do algoritmo básico de busca tabu.



Fonte: Próprio autor.

Em seguida detalham-se alguns critérios da busca tabu:

a. Estruturas de Vizinhanças

As estruturas de vizinhanças definem como é explorado o espaço de busca a partir de uma solução corrente. A importância de uma boa escolha das estruturas de vizinhança dá-se pelos critérios de intensificação e diversificação. Intensificar a busca a partir de uma solução, permite explorar novas possíveis configurações semelhantes ou com poucas mudanças em relação à solução de partida, e uma boa diversificação evita percorrer a mesma área e “visitar” novas regiões na procura de melhorar a solução incumbente (melhor solução encontrada pelo algoritmo). Chama-se de movimento, a execução de uma estrutura de vizinhança que permite a atualização da solução corrente.

b. Lista Tabu

A lista tabu é uma das principais características do algoritmo de busca tabu. A lista tabu armazena, em períodos curtos ou longos, as características que mudam de uma solução à solução seguinte, podendo armazenar até configurações completas. O objetivo da lista tabu é evitar a ciclagem, isto é, repetições sistemáticas ao redor de um ótimo local no qual o algoritmo pode-se estagnar.

O uso desta restrição estratégica é versátil, podendo ser de curto ou longo prazo, um número fixo ou variável de iterações, ou pode incluir soluções de forma seletiva. A lista tabu armazena atributos de soluções geradas e proíbe o uso deles na geração de novas configurações (movimentos proibidos). Ao tentar utilizar algum movimento proibido, ativa a *regra de ativação tabu*, a qual proíbe o movimento de ser executado. Mesmo que um movimento possa ser categorizado como proibido, é possível relaxar a *regra de ativação tabu* se algum critério de aspiração é atingido.

c. Critério de aspiração

O critério de aspiração é um critério de incentivo e faz parte da exploração sensível de busca tabu. Baseia-se na premissa que algum movimento proibido pode estar evitando a exploração de soluções não visitadas e de boa qualidade.

Na literatura, normalmente o critério de aspiração é definido como “melhorar a solução incumbente”. Se uma solução corrente leva a uma nova solução vizinha, executando um

movimento proibido, e esta nova solução atualiza a solução incumbente, a *regra de ativação tabu* é relaxada e o movimento é permitido.

d. Critério de parada

O critério de parada é o mecanismo de escape do algoritmo. Alguns dos critérios de parada são (GLOVER, 1989):

- a. Um número predefinido de iterações.
- b. Um número predefinido de iterações desde a última vez que a solução incumbente foi melhorada.
- c. Quando o valor da função objetivo atinge um valor preestabelecido.

3.3.2 Algoritmo de busca tabu dedicado ao problema de restauração de redes

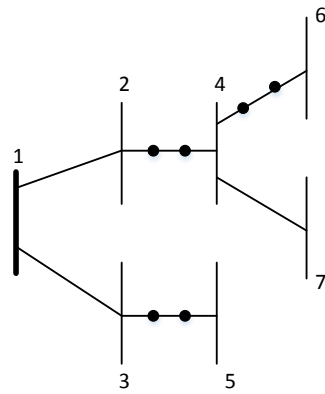
a. Representação

A representação dos sistemas de distribuição é baseada na teoria de grafos, particularmente no conceito da RNP, abordado na seção 3.1. Os sistemas de distribuição podem ser representados agrupando elementos da rede, limitados por dispositivos de manobras. Estes grupos recebem o nome de seções. Um sistema de distribuição dividido em seções pode facilitar procedimentos em termos de processamento computacional. Ao utilizar-se a teoria de grafos, pode-se representar os elementos agrupados da rede em vértices e os elementos de manobra como arestas, simplificando o problema de análise sem alterar o grau de confiabilidade. A simplificação é permitida pelas características do problema, devido as chaves que abrem e fecham, na procura de fornecer energia elétrica à maior quantidade de cargas sem falta no sistema. Entretanto, existem procedimentos que não permitem tal simplificação, como o cálculo de fluxo de potência, o qual precisa considerar todas as barras de carga para não prejudicar a modelagem do problema.

Com essa finalidade, definem-se dois tipos de representação, a RNP para o cálculo de fluxo de potência e uma Representação Seção-Profundidade (RSP) para o procedimento de otimização do problema. Na Figura 17, apresenta-se um exemplo de ambas representações para uma árvore.

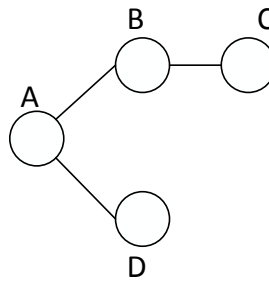
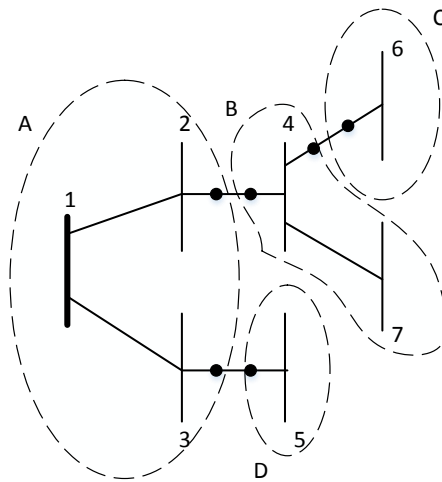
Figura 17 – Exemplo da RNP e RSP. a) RNP. b) RSP

a)



$$\pi_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \pi_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}; \pi_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 5 \\ 1 \end{bmatrix}; \pi_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ 2 \end{bmatrix}; \pi_5 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 6 \\ 2 \end{bmatrix}; \pi_6 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 3 \\ 3 \end{bmatrix}; \pi_7 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 4 \\ 3 \end{bmatrix}$$

b)



$$\pi_A = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \pi_B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}; \pi_C = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ 2 \end{bmatrix}; \pi_D = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 3 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Fonte: Próprio autor.

b. Configuração Inicial

Neste trabalho, a seção em falta é um dado de entrada. Para obter a configuração inicial e iniciar o processo de restauração da rede, utiliza-se uma série de passos simples.

Passo 1. Isola-se a falta ou as faltas no sistema, abrindo as chaves das seções com falha.

Passo 2. Avaliar a configuração, se existir seções sem fornecimento e sem falta, ir para o

Passo 3. Caso contrário, se todas as seções sem fornecimento e sem falta foram analisadas, ir para o Passo 5.

Passo 3. Fazer uma busca nas chaves abertas e escolher uma chave com extremo em uma barra da seção em análise (sem fornecimento e sem falta) e no outro extremo uma barra em uma seção com fornecimento. Ir para o passo 4. Se a chave não existir, voltar ao passo 2.

Passo 4. Fechar a chave encontrada. Retornar para o Passo 2.

Passo 5. Fim do algoritmo.

O maior risco nessa série de passos é violar os limites de operação, como o limite de corrente nos ramos e os limites de tensão nas barras. Para resolver esses problemas na meta-heurística busca tabu, através do processo de cálculo de fluxo de potência, avaliam-se a configuração inicial e as configurações obtidas pelos operadores PAO, CAO e CUT, para seleccionar uma solução factível respeitando as restrições de operação.

c. Estrutura de vizinhança

A estrutura de vizinhança é definida pelos operadores PAO, CAO e CUT da RNP. Os três operadores possuem características diferentes. Ao gerar novas configurações os dois operadores iniciais mantêm a mesma quantidade de carga ligada ao sistema com respeito a sua solução semente, sendo que o operador CAO representa melhores condições de variabilidade por gerar mudanças mais complexas que o operador PAO. O operador CUT, baseado na premissa que muitas vezes não é possível restabelecer toda a carga que foi interrompida, permite o corte de carga e/ou operação ilhada dos geradores distribuídos no sistema.

Para manter certa proporcionalidade nas características particulares de cada operador, decide-se atribuir a cada um deles uma probabilidade de ser seleccionado para gerar uma vizinhança. Definem-se os coeficientes: α , β e μ relacionados aos operadores PAO, CAO e CUT, respectivamente. Os coeficientes definem a participação de cada operador e respeitam as seguintes condições:

$$\begin{aligned}\alpha &> \beta > \mu \\ \alpha + \beta + \mu &= 1\end{aligned}\tag{17}$$

Para gerar certa diversificação inicial no algoritmo, decide-se utilizar o operador CAO para gerar a vizinhança da primeira configuração. As seguintes configurações serão geradas pelos três operadores segundo a proporcionalidade de α , β e μ . Os valores atribuídos a estes coeficientes no presente trabalho serão detalhados no capítulo 4.

d. Critério de aspiração

O critério de aspiração permite alguns movimentos proibidos da lista tabu, se um critério de melhoria é atingido. Neste trabalho utiliza-se o critério de “melhorar a solução incumbente”.

e. Lista tabu

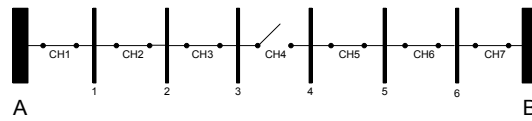
A lista tabu evita a ciclagem proibindo a execução de movimentos tabu. Esses movimentos são obtidos pelo armazenamento de atributos do histórico da busca, uma quantidade de iterações preestabelecidas. Neste trabalho são utilizadas duas listas tabu, uma de curta e outra de longa duração.

A lista tabu de curta duração utiliza uma quantidade fixa de iterações em que o atributo deve permanecer na lista tabu. O atributo selecionado foi a mudança de estado das chaves (aberto ou fechado) no passo de uma configuração corrente a uma nova configuração. No caso da lista tabu de longa duração, utiliza-se o histórico de estado das chaves ao longo do processo, evitando retornar às configurações já visitadas.

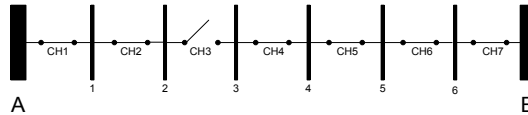
Seja o seguinte exemplo da Figura 18, um sistema de 6 barras separadas em duas árvores:

Figura 18 – Exemplo do atributo armazenado na lista tabu.

a) Sistema de 6 barras dividido em 2 alimentadores com 7 chaves de manobras.



b) Mudança nos estados das chaves CH3 e CH4.



Fonte: Próprio autor.

Gera-se a Tabela 4 contendo o estado das chaves da Figura 18a, a Tabela 5 contendo o estado das chaves da Figura 18b, e na Tabela 6, após comparar os estados das chaves nos estados inicial e reconfigurado, armazena-se um atributo na lista tabu que proíbe uma mudança simultânea das chaves CH3 e CH4 por certo número preestabelecido de iterações.

Tabela 4 - Estado das chaves na configuração inicial.

CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7
1	1	1	0	1	1	1

Fonte: Próprio autor.

Tabela 5 - Estado das chaves após a reconfiguração.

CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7
1	1	0	1	1	1	1

Fonte: Próprio autor.

Tabela 6 - Atributos proibidos.

CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7
0	0	1	1	0	0	0

Fonte: Próprio autor.

f. Critério de parada

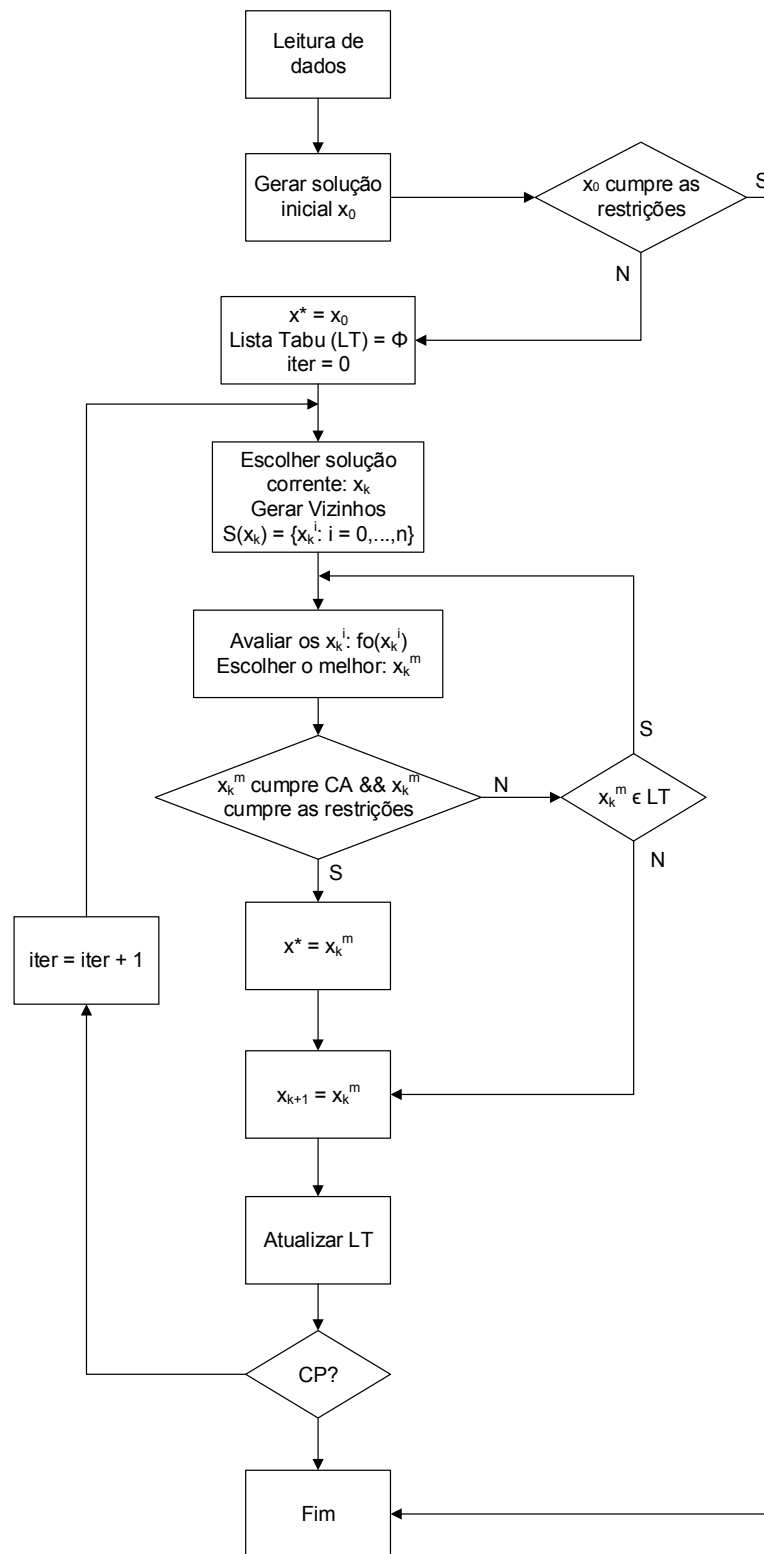
O critério de parada interrompe a execução do algoritmo quando alguma das condições predefinidas são atingidas. Neste trabalho são escolhidos três critérios de parada segundo as características do problema.

- i. Número máximo de iterações.
- ii. Número máximo de iterações desde que o algoritmo encontre uma solução de boa qualidade e a função objetivo não é atualizada.
- iii. Encontra-se uma configuração que restabelece o fornecimento de toda a carga que está sem fornecimento e sem falta, utilizando apenas um chaveamento.

g. Diagrama de blocos

O diagrama de blocos do algoritmo de busca tabu é apresentado na Figura 19.

Figura 19 – Diagrama de blocos da meta-heurística busca tabu aplicada ao problema de restauração.



Fonte: Próprio autor.

3.4 SEQUÊNCIA DE CHAVEAMENTO

Uma proposta de sequência de chaveamento para restaurar a rede é apresentada neste trabalho. Essa proposta é constituída de duas fases. A primeira fase consiste em uma sequência de chaveamentos se não existir corte de carga no processo de restauração, e uma segunda fase consiste em uma sequência de chaveamento de uma solução, na qual, um corte de carga é necessário para garantir uma solução factível e de boa qualidade.

Os diferentes estados das chaves podem ser armazenados em uma tabela de três colunas. A primeira coluna contém o estado da chave na configuração pós-falta (CPF), na segunda coluna encontra-se o estado da chave na configuração inicial (CI) e uma terceira coluna apresenta o estado da chave na configuração incumbente (CF) do processo de solução. A condição de chave fechada é definida como estado 1 e a condição de chave aberta, estado 0. Todas as classes de configurações possíveis das chaves ao longo das configurações CPF, CI e CF são apresentadas na Tabela 7:

Tabela 7 - Classes de chaves segundo o estado nas configurações CPF, CI e CF.

Classe	Estado na configuração pós-falta (CPF)	Estado na configuração inicial (CI)	Estado na configuração incumbente (CF)
Classe 1	0	0	0
Classe 2	0	0	1
Classe 3	0	1	0
Classe 4	0	1	1
Classe 5	1	0	0
Classe 6	1	0	1
Classe 7	1	1	0
Classe 8	1	1	1

Fonte: Próprio autor.

As chaves das classes 5 e 6 não participam do processo, porque na geração da configuração inicial procura-se fornecer energia para todas as seções sem fornecimento e sem falta, inicialmente, sem levar em consideração os limites operacionais. Este processo é executado apenas através do fechamento de chaves. As chaves da classe 1 e 8 são chaves normalmente abertas e normalmente fechadas, respectivamente, e devido a sua condição de não mudança, não participam da sequência de chaveamento.

As chaves de classes 3 e 7 trabalham com as chaves da classe 2, devido os seus estados contrários nas configurações inicial e incumbente. Se for necessário um corte de carga, são as chaves das classes 3 e 7 que poderiam ser selecionadas na sequência de chaveamentos. Por fim, as chaves de classe 4 são chaves fechadas para gerar a configuração inicial e mantidas nesse estado na configuração incumbente, portanto sempre são parte da sequência de chaveamento se os extremos delas estiverem energizados.

3.4.1 Sequência de chaveamento sem corte de carga

Uma característica observável em todas as configurações geradas a partir da configuração inicial em um processo de restauração sem corte de carga (como será ilustrado no exemplo do final desta seção) é que, as mesmas seções estão ligadas a alguma fonte de energia mesmo que não obedeçam às restrições de magnitude de tensão e/ou corrente (critério de fornecimento inicial).

Os passos para obter a sequência de chaveamentos são:

Passo 1: Identificar e armazenar as chaves que são abertas para isolar a falta. Se a configuração incumbente é a configuração CI, ir ao passo 11, caso contrário ir ao passo 2.

Passo 2: Procuram-se as chaves de classe 2, 3, 4 e 7. Ir ao passo 3.

Passo 3: Procura-se uma chave da classe 7 e ir ao passo 4. Se não existir, ir ao passo 7.

Passo 4: Procura-se uma chave da classe 2 e ir ao passo 5.

Passo 5: Avaliar na configuração CI se, abrindo a chave do passo 3 e fechando a chave do passo 4, o critério de fornecimento inicial é atingido. Ir ao passo 6. Caso contrário voltar ao passo 4 e escolher uma chave diferente.

Passo 6: Armazenar as duas chaves utilizadas. Voltar ao passo 3 escolhendo chaves diferentes a aquelas já armazenadas.

Passo 7: Procura-se uma chave da classe 3 e ir ao passo 8. Se não existir, ir ao passo 11.

Passo 8: Procura-se uma chave da classe 2 e ir ao passo 9.

Passo 9: Avaliar na CI se abrindo a chave do passo 7 e fechando a chave do passo 8, o critério de fornecimento inicial é atingido, e ir ao passo 10. Caso contrário voltar ao passo 8 e escolher uma chave diferente.

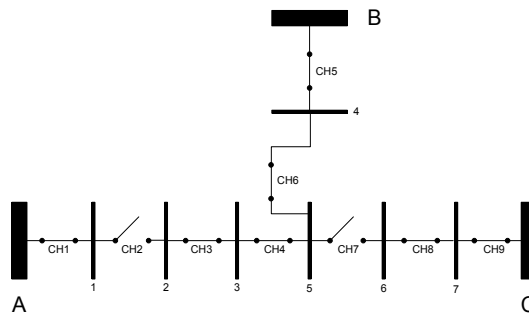
Passo 10: Armazenar a chave obtida no passo 8. Voltar ao passo 7 escolhendo chaves diferentes às aquelas já utilizadas.

Passo 11: Armazenar as chaves da classe 4. Sair do algoritmo.

Suponha-se, como exemplo, a representação de um sistema de distribuição da Figura 20, com 3 alimentadores, 7 seções e 9 chaves de manobras. Inicialmente o sistema encontra-se em estado normal.

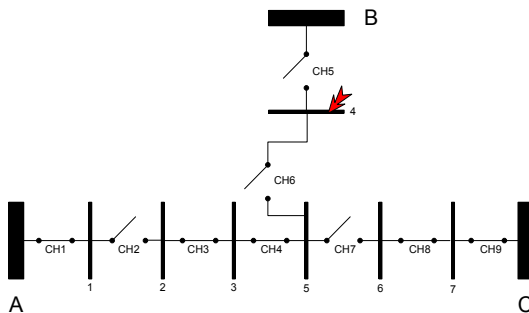
Após acontecer uma falta na seção 4, uma configuração CPF é gerada, abrindo as chaves conectadas à seção com falta. Como resultado, as seções 2, 3 e 5 ficam sem fornecimento sendo seções sem falta (Figura 21).

Figura 20 – Sistema em estado normal.



Fonte: Próprio autor.

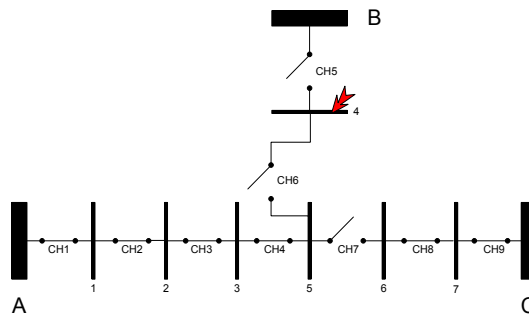
Figura 21 – Configuração pós-falta (CPF). A falta foi isolada



Fonte: Próprio autor.

Gera-se uma configuração CI fechando a chave 2 (CH2) (Figura 22).

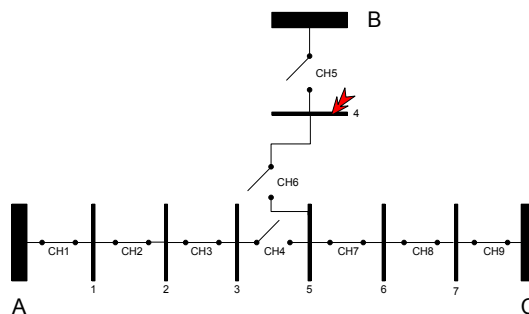
Figura 22 – Configuração Inicial (CI).



Fonte: Próprio autor.

A configuração gerada é factível desde que a radialidade seja obedecida, mas pode violar alguma restrição de operação. Pode ocorrer que a tensão na seção 5 (seção mais afastada da seção raiz), viole o limite mínimo de tensão. Dessa forma, o sistema deve ser reconfigurado através da abertura e fechamento das chaves de manobras.

Figura 23 – Nova configuração.

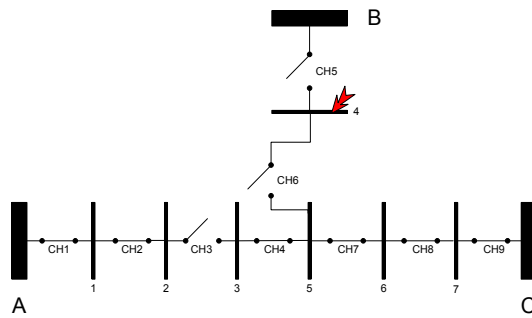


Fonte: Próprio autor.

Uma nova solução é apresentada (Figura 23), a chave 4 (CH4) é aberta e a chave 7 (CH7) é fechada. A carga da seção 5 passa para o alimentador C. No caso de ocorrer violação de tensão na barra 3 (menor que o limite mínimo de tensão), uma nova reconfiguração é gerada.

Finalmente, ao abrir a chave 3 (CH3) e fechar a chave 4 (CH4) obtém-se uma solução de configuração radial com os limites de operação obedecidos (Figura 24).

Figura 24 – Configuração Incumbente (CF).



Fonte: Próprio autor.

Tabela 8 - Estado das chaves ao longo do exemplo e a sua classificação por classes.

Chave	CPF	CI	C2	C3 / CF	Classe
CH1	1	1	1	1	Classe 8
CH2	0	1	1	1	Classe 4
CH3	1	1	1	0	Classe 7
CH4	1	1	0	1	Classe 2
CH5	0	0	0	0	Classe 1
CH6	0	0	0	0	Classe 1
CH7	0	0	1	1	Classe 2
CH8	1	1	1	1	Classe 8
CH9	1	1	1	1	Classe 8

Fonte: Próprio autor.

Neste sentido, obtém-se a sequência de chaveamento utilizando o procedimento acima apresentado.

Passo 1: Chaves que são abertas para isolar a falta, chaves 5 e 6.

Passo 2:

Tabela 9 - Chaves das classes 2, 3, 4, e 7 do exemplo.

Chave	CPF	CI	CF	Classe
CH2	0	1	1	Classe 4
CH3	1	1	0	Classe 7
CH7	0	0	1	Classe 2

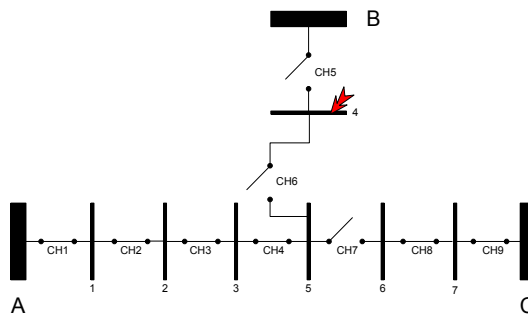
Fonte: Próprio autor.

Passo 3: Escolher chave 3.

Passo 4: Escolher chave 7.

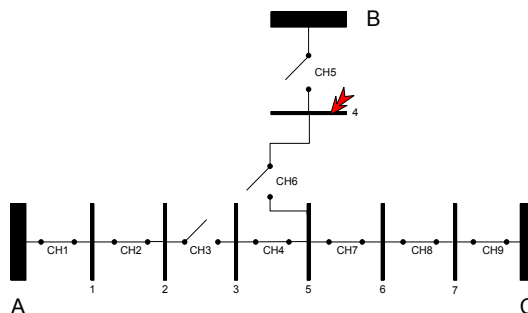
Passo 5: Abrir chave 3 e fechar chave 7 na configuração CI (Figura 25).

Figura 25 – Configuração Inicial (CI).



Fonte: Próprio autor.

Figura 26 – Configuração de análise do exemplo.



Fonte: Próprio autor.

O critério de fornecimento inicial é atingido desde que na Figura 25 e Figura 26 as seções 2, 3 e 5 estão conectados a algum alimentador.

Passo 6. Armazenar: abrir chave 3 e fechar chave 7. Voltar ao Passo 3.

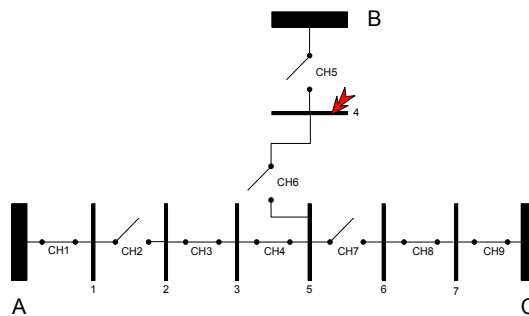
Passo 3. Não existe outra chave classe 7. Ir ao passo 7.

Passo 7. Não existe chave classe 3. Ir ao passo 11.

Passo 11. Armazenar: fechar chave 2. Sair do algoritmo.

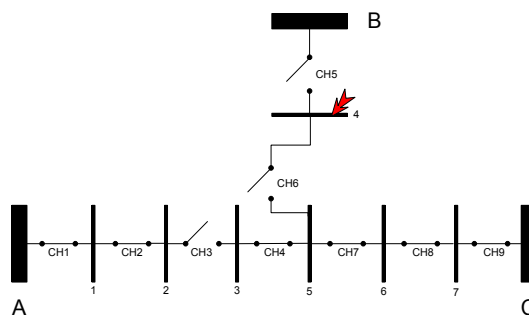
Nas Figuras 27 e 28 são apresentadas a configuração CPF e CF respectivamente. A Tabela 10 contém a sequência de chaveamento do exemplo.

Figura 27 – Configuração pós-falta (CPF), a falta foi isolada.



Fonte: Próprio autor.

Figura 28 – Configuração Incumbente.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 10 - Sequência de chaveamento do exemplo.

Sequência de chaveamento				
Etapa	Ação	Código da Chave	Seção Inicial	Seção Final
Isolar falta	Abrir chave	CH5	Alimentador B	Seção 4
Isolar falta	Abrir chave	CH6	Seção 4	Seção 5
Restauração	Abrir chave	CH3	Seção 2	Seção 3
Restauração	Fechar chave	CH7	Seção 5	Seção 6
Restauração	Fechar chave	CH2	Seção 1	Seção 2

Fonte: Próprio autor.

Restaurar o fornecimento de energia de todas as seções que não apresentem faltas e tenham a possibilidade de serem realocadas nos diferentes alimentadores vizinhos, através do processo de manobras de chaves, é um objetivo desejado do processo de restauração, porém, nem sempre é possível. Propõe-se, a seguir, um procedimento para a obtenção de uma sequência de chaveamento de uma solução com corte de carga.

3.4.2 Sequência de chaveamento com corte de carga

A principal diferença com a sequência de chaveamento da seção anterior, é que a análise do critério de fornecimento inicial e a armazenagem da sequência de abertura e fechamento das chaves não ocorre ao mesmo momento, portanto, durante o processo de busca de soluções para o problema de restauração as variações dos estados nas chaves são armazenadas temporariamente para serem organizados no passo final. Desta forma, os passos para gerar a sequência de chaveamentos com corte de carga são:

Passo 1: Identificar e armazenar, temporariamente, as chaves que são abertas para isolar a falta. Se a configuração incumbente é a configuração CPF, ir ao passo 14, caso contrário ir ao Passo 2.

Passo 2: Procuram-se as chaves de classes 2, 3, 4 e 7.

Passo 3: Identificar as chaves que serão abertas para corte de carga. Verificar se as seções extremas das chaves de classe 7 estão com fornecimento de energia. Se um extremo da chave está fornecendo energia e o outro não, armazenar temporariamente o número desta chave.

Passo 4: Procura-se uma chave da classe 3 e ir ao passo 5. Se não existir chave de classe 3, ir ao Passo 8.

Passo 5: Procura-se uma chave da classe 2 e ir ao Passo 6.

Passo 6: Avaliar em CI se abrindo a chave do Passo 4 e fechando a chave do Passo 5, o critério de fornecimento de energia inicial é atingido. Neste caso ir ao Passo 7. Caso contrário voltar ao Passo 5 e escolher uma chave diferente.

Observação: Se todas as chaves da classe 2 no Passo 5 foram escolhidas e o critério de fornecimento inicial não é atingido no Passo 6, ir ao Passo 8.

Passo 7: Armazenar temporariamente a chave do Passo 4. Voltar ao Passo 4 escolhendo chaves diferentes daquelas já utilizadas.

Passo 8: Procura-se uma chave da classe 7 e ir ao Passo 9. Se não existir, ir ao Passo 13.

Passo 9: Procura-se uma chave da classe 2 e ir ao Passo 10.

Passo 10: Avaliar em CI se abrindo a chave do Passo 8 e fechando a chave do Passo 9, o critério de fornecimento de energia inicial é atingido. Ir ao Passo 11. Caso contrário voltar ao Passo 8 e escolher uma chave diferente.

Observação: Se todas as chaves da classe 2 no passo 9 foram escolhidas e o critério de fornecimento inicial não é atingido no passo 10, ir ao Passo 12.

Passo 11: Armazenar temporariamente as chaves utilizadas nos Passo 8 e 9. Voltar ao Passo 7 escolhendo chaves diferentes daquelas já armazenadas.

Passo 12: Armazenar temporariamente as chaves da classe 4 se as seções extremas destas chaves estão energizadas na configuração CF. Ir ao Passo 13.

Passo 13: O armazenamento final da sequência corresponde à seguinte ordem:

- a. Chaves temporariamente armazenadas do Passo 1.
- b. Chaves temporariamente armazenadas do Passo 3.
- c. Chaves temporariamente armazenadas do Passo 11.
- d. Chaves temporariamente armazenadas do Passo 7.
- e. Chaves temporariamente armazenadas do Passo 12.

Passo 14: Sair do algoritmo.

Observação: Se for necessária a operação ilhada de um GD com uma área (grupo de seções) do sistema, após o Passo 14 deve-se armazenar, na sequência de chaveamento, a abertura das chaves que isolem a citada área com o GD associado.

4 TESTES E RESULTADOS

Neste capítulo, apresentam-se os resultados de testes obtidos com a implementação computacional do algoritmo proposto no Capítulo 3. Os sistemas testes utilizados foram um sistema de 136 barras e um sistema real de 7052 barras. O algoritmo foi implementado na linguagem de programação C++ e simulado utilizando um microcomputador com processador Intel Core i7 e 6GB de memória.

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

4.1.1 Parâmetros

Os parâmetros definidos são os correspondentes ao algoritmo de busca tabu e RNP. Para o algoritmo de busca tabu, define-se o tamanho de vizinhança ao redor da solução corrente em 20, o tamanho da lista tabu em 5 iterações, e os critérios de parada em 50 iterações máximas e 5 iterações após encontrar uma solução de boa qualidade, além do critério de parada que ativa-se se uma solução que restaura toda a carga sem fornecimento e sem falta com apenas um chaveamento.

Os coeficientes para a seleção dos operadores PAO, CAO e CUT são $\alpha = 0,50$, $\beta = 0,40$ e $\mu = 0,10$ respectivamente. Estes parâmetros foram calibrados através de testes exaustivos. O critério de aspiração é “melhorar a solução incumbente”. As restrições de tensão mínima e tensão máxima foram estabelecidas em 0,92 p.u. e 1,05 p.u. respectivamente. A restrição de corrente deve respeitar à capacidade dos condutores. Os coeficientes ponderados da função objetivo são $w_1 = 0,80$ e $w_2 = 0,20$ para as funções objetivo de minimização de carga não fornecida e minimização do número de chaveamentos, respectivamente. Este critério é escolhido devido à importância que dá-se neste trabalho a recuperar a maior quantidade de cargas possível.

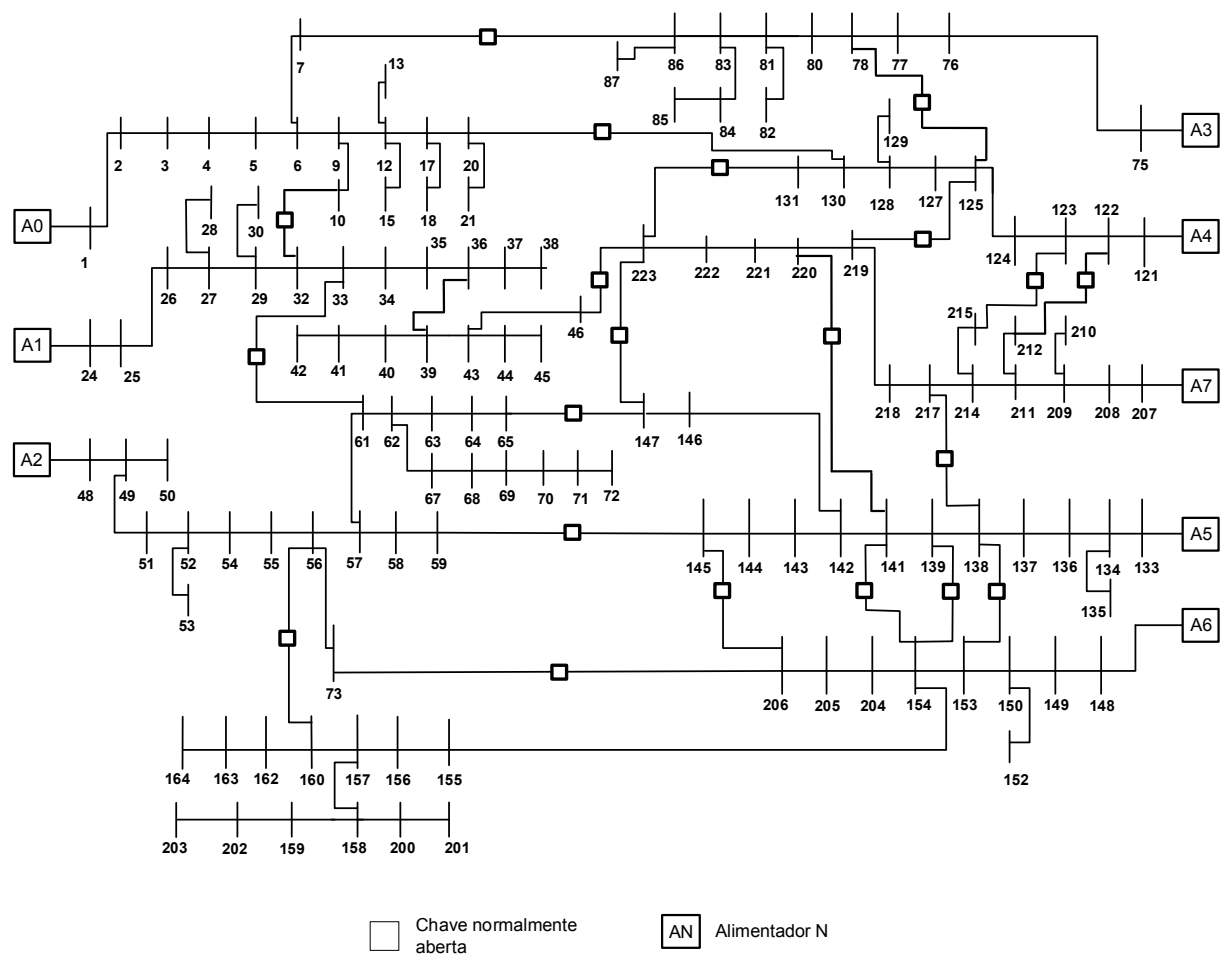
4.1.2 Sistemas testes

No presente trabalho foram dois sistemas utilizados no processo de avaliação do algoritmo proposto.

a. Sistema teste de 136 barras

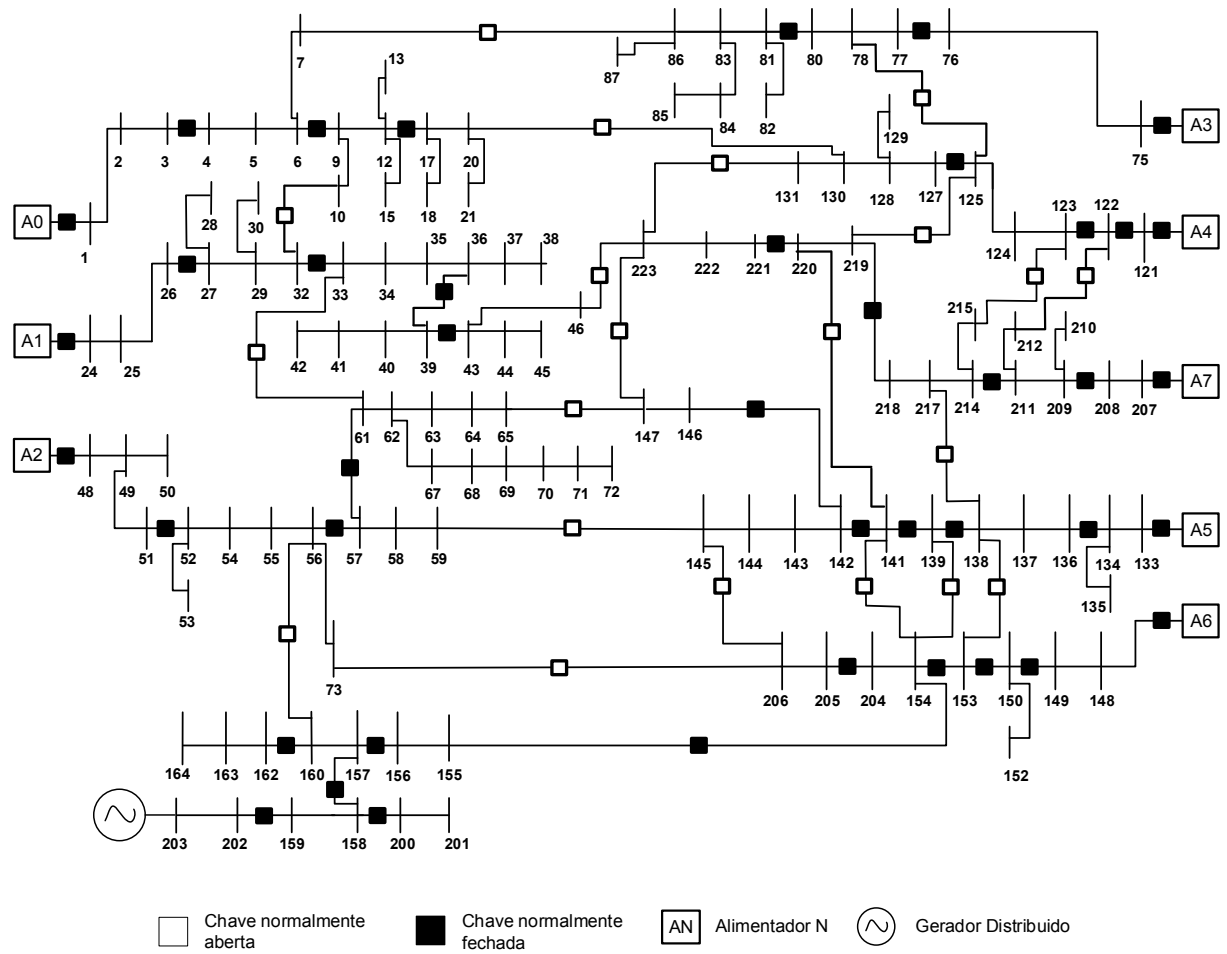
Este sistema teste é uma rede de 136 barras (MANTOVANI; CASARI; ROMERO, 2000) com 13,8kV de tensão nominal e oito alimentadores. O sistema foi adaptado para 41 seções (Figura 31), 55 chaves (Tabela 11), e foi inserido um gerador distribuído com 600 kVA de potência instalada na barra 203. Nas Figuras 29, 30 e 31 apresentam-se o sistema original e como as seções são definidas.

Figura 29 – Sistema 136 barras. Adaptado da fonte.



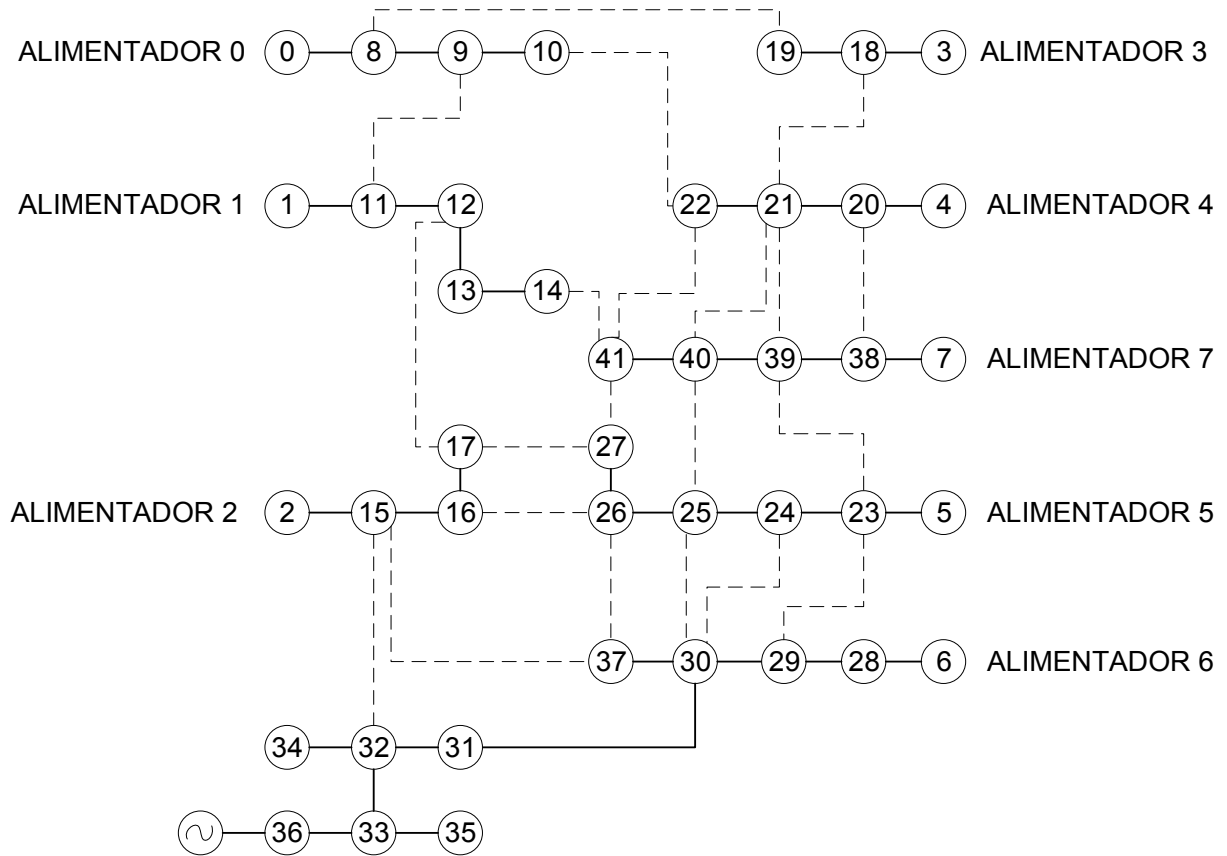
Fonte: Mantovani, Casari e Romero (2000).

Figura 30 – Identificação das seções no sistema de 136 barras. Adaptado da fonte.



Fonte: Mantovani, Casari e Romero (2000).

Figura 31 – Representação do sistema de 136 barras em seções. Adaptado da fonte.



Fonte: Mantovani, Casari e Romero (2000).

Tabela 11 - Chaves do sistema de 136 barras.

Chave	Seção Inicial	Seção Final	Chave	Seção Inicial	Seção Final
0	0	8	28	33	36
1	8	9	29	30	37
2	9	10	30	7	38
3	1	11	31	38	39
4	11	12	32	39	40
5	12	13	33	40	41
6	13	14	34	8	19
7	2	15	35	9	11
8	15	16	36	10	22
9	16	17	37	14	41
10	3	18	38	12	17
11	18	19	39	16	26
12	4	20	40	17	27
13	20	21	41	15	37
14	21	22	42	18	21
15	5	23	43	21	40
16	23	24	44	22	41

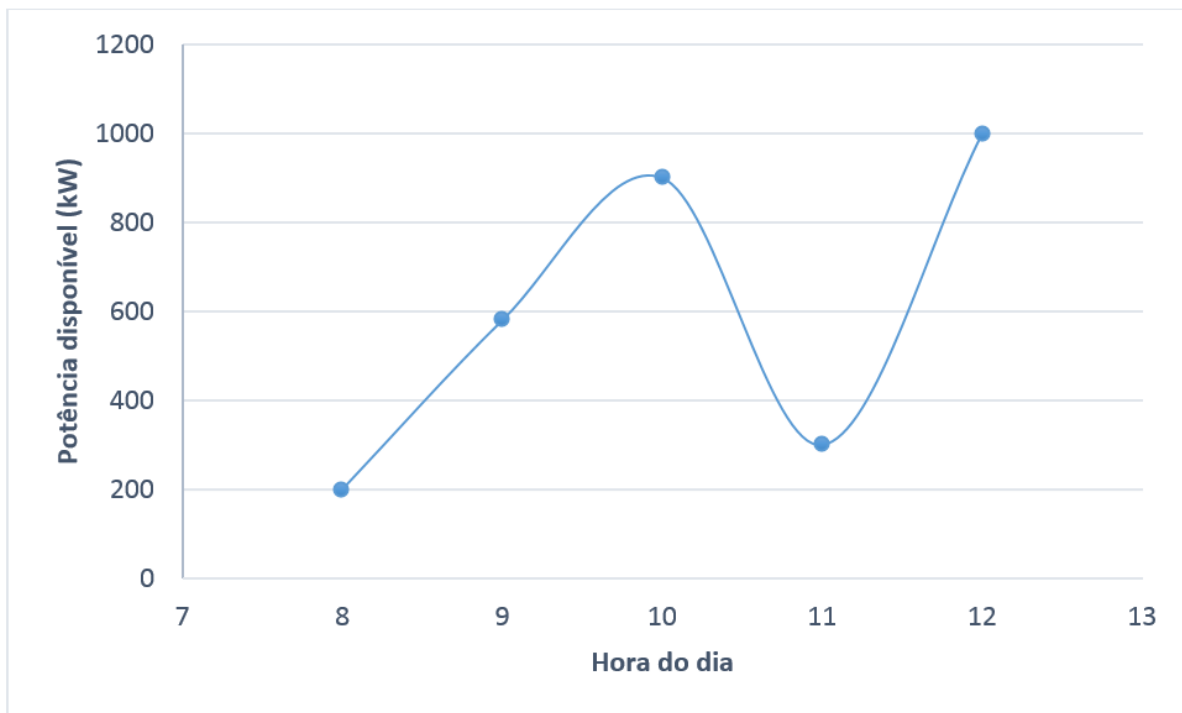
Chave	Seção Inicial	Seção Final	Chave	Seção Inicial	Seção Final
17	24	25	45	24	30
18	25	26	46	23	39
19	26	27	47	23	29
20	6	28	48	25	30
21	28	29	49	25	40
22	29	30	50	26	37
23	30	31	51	32	15
24	31	32	52	38	20
25	32	33	53	39	21
26	32	34	54	41	27
27	33	35			

Fonte: Próprio autor.

b. Sistema teste de 7052 barras

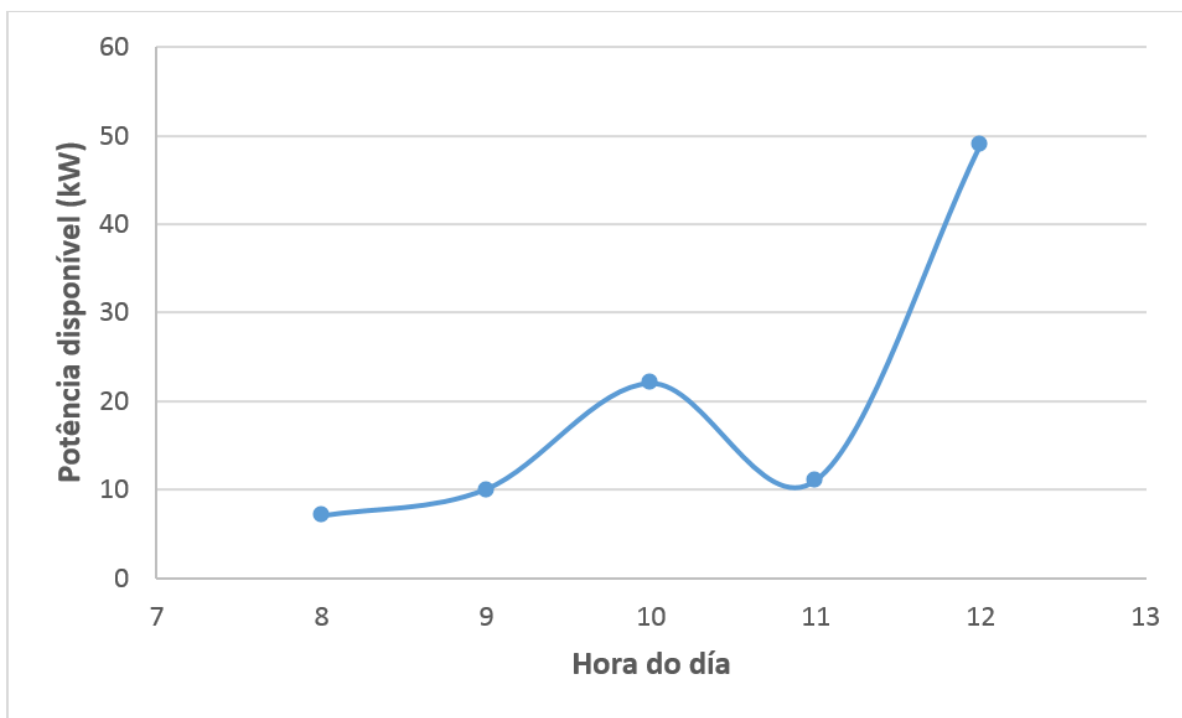
O segundo sistema teste utilizado corresponde a uma subestação real de distribuição com 7052 barras e tensão nominal de 13,6 kV, distribuídas entre nove alimentadores conectados a dois transformadores de potência, cada um com capacidade de transformação igual a 25/33,3 MVA operando com ventilação forçada. Adicionalmente 4 parques geradores de fontes renováveis foram inseridos nas barras 14254, 13274, 17426 e 22452, os dois primeiros correspondem a centrais hidráulicas, os dois últimos correspondem a um parque eólico e uma central solar, respectivamente. Considera-se uma falta com intervalo de tempo iniciando às 8 horas e previsão de retorno ao estado normal às 12 horas. Nas Figuras 32, 33 e 34 apresentam-se as curvas de capacidades de geração segundo a tecnologia de geração distribuída, para diferentes intervalos do dia. Na Tabela 12 apresenta-se as restrições de mínimo e máximo fator de potência para diferentes tecnologias.

Figura 32 – Potência disponível máxima no parque eólico no período de falta.



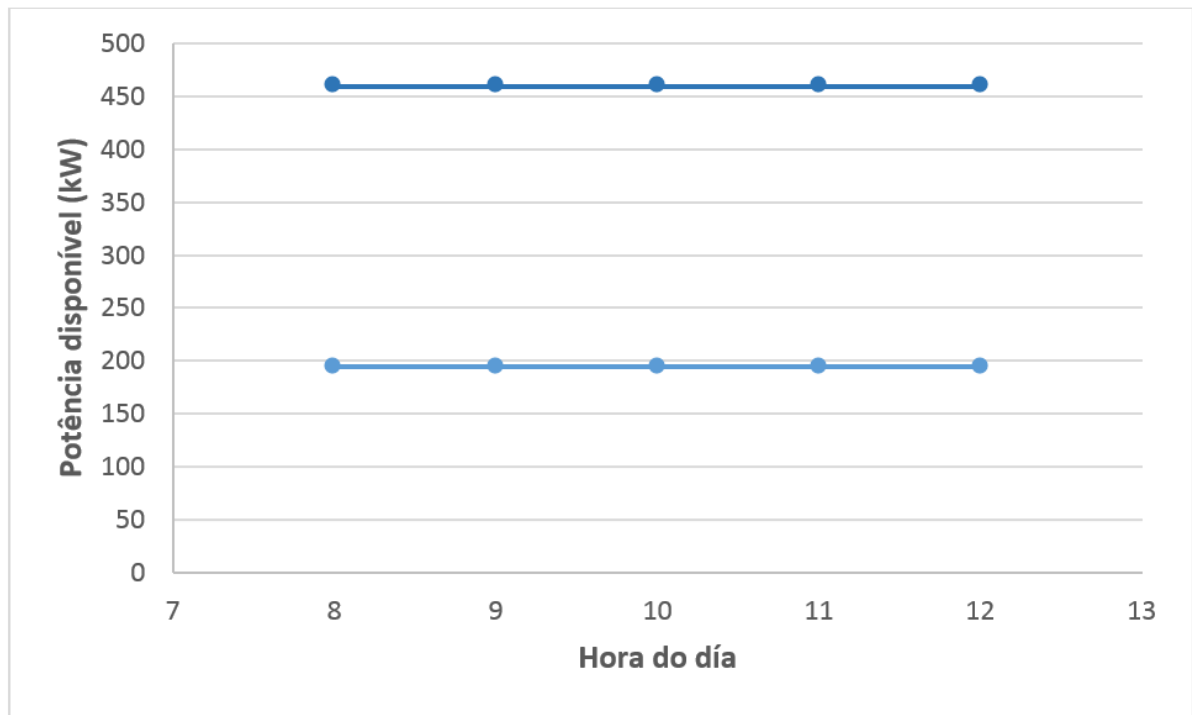
Fonte: Mathias Neto (2011).

Figura 33 – Potência disponível máxima na micro central solar no período de falta.



Fonte: Mathias Neto (2011).

Figura 34 – Limites mínimos e máximos de potência disponível na central geradora hidráulica.



Fonte: Mathias Neto (2011).

Tabela 12 - Restrições de mínimo e máximo fator de potência para diferentes fontes/tecnologias.

Tipo	Tecnologia	$\cos(\phi)_g^{MIN}$	$\cos(\phi)_g^{MAX}$
Hidráulica	Turbina com controle de velocidade acoplada ao gerador síncrono conectado à rede através de transformadores elevadores,	$\pm 0,8$	1,0
Eólica	Turbina de tipo horizontal com controle de pitch acoplada ao gerador síncrono de ímã permanente e conectada à rede através de conversores estáticos.	$\pm 0,9$	1,0
Solar	Painel fotovoltaico conectado à rede através de conversores estáticos.	$\pm 0,9$	1,0

Fonte: Mathias Neto (2011).

4.2 RESULTADOS OBTIDOS

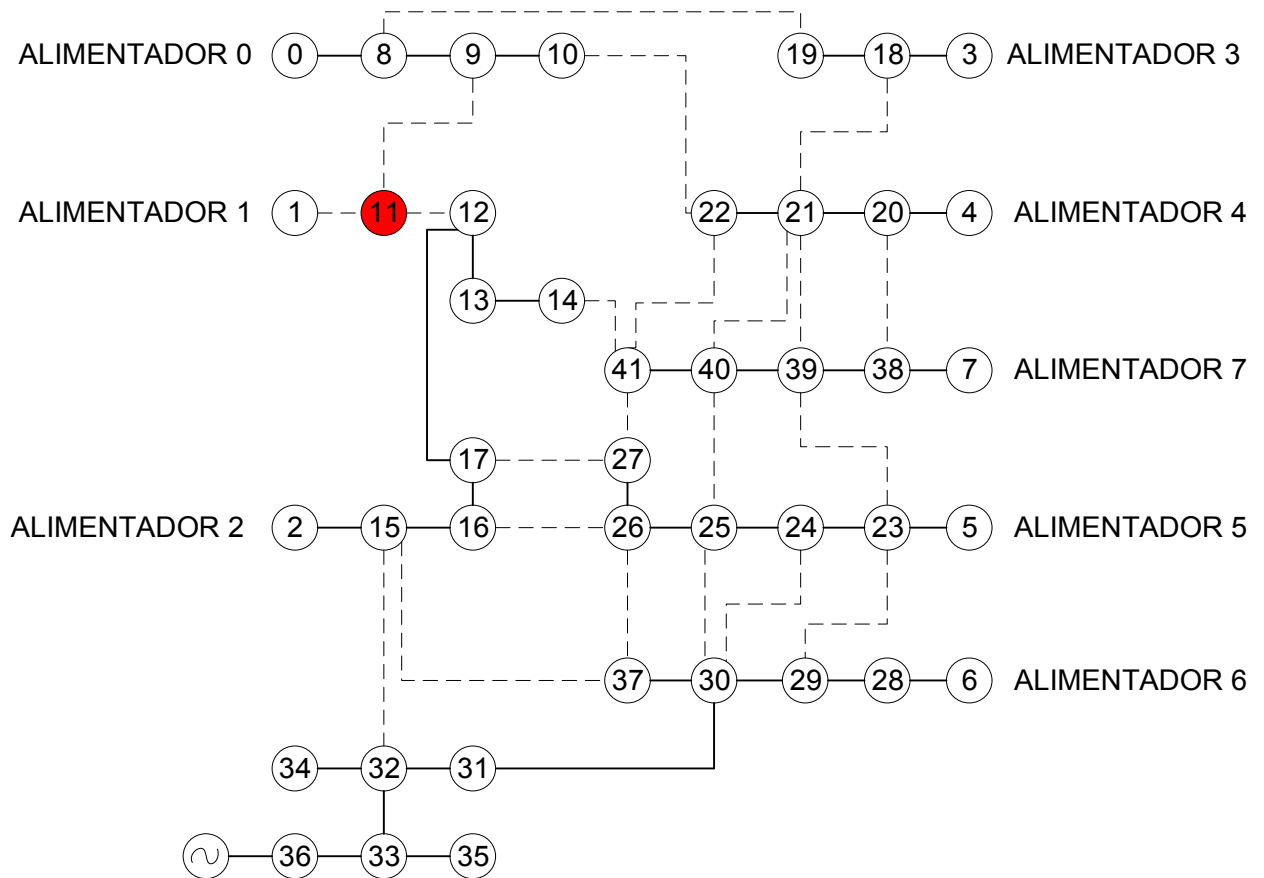
4.2.1 Simulações no sistema de 136 barras

No sistema de 136 barras reduzido a seções (representadas por circunferências) na Figura 31, alocam-se as faltas para a análise. As faltas em uma seção serão representadas com cor vermelha na respectiva circunferência, as chaves fechadas são representadas por linhas contínuas e as chaves abertas com linhas tracejadas.

a. Falta na seção 11

Uma falta na seção 11 do alimentador 1 foi considerada. Como consequência da contingência, as chaves 3 (entre as seções 1 e 11) e 4 (entre as seções 11 e 12) devem ser abertas para isolar a seção defeituosa daquelas que não apresentam falha. Como resultado, as seções 12, 13 e 14 ficam sem fornecimento de energia. A solução ótima fornecida pelo algoritmo é a solução inicial, o tempo de processamento foi 0,047 segundos e restabelece-se toda a carga possível (seções sem fornecimento e sem falta com possibilidade de serem transferidas para os alimentadores vizinhos) fechando a chave 38 (entre as seções 12 e 17).

Figura 35 – Falta na seção 11. Adaptado da fonte.



Fonte: Mantovan, ; Casari e Romero (2000).

Tabela 13 – Sequência de chaveamento do sistema com falta na seção 11.

Etap	Ação	Número de chave	Seção inicial	Seção final
Isolar falta	Abrir	3	1	11
Isolar falta	Abrir	4	11	12
Restauração	Fechar	38	12	17

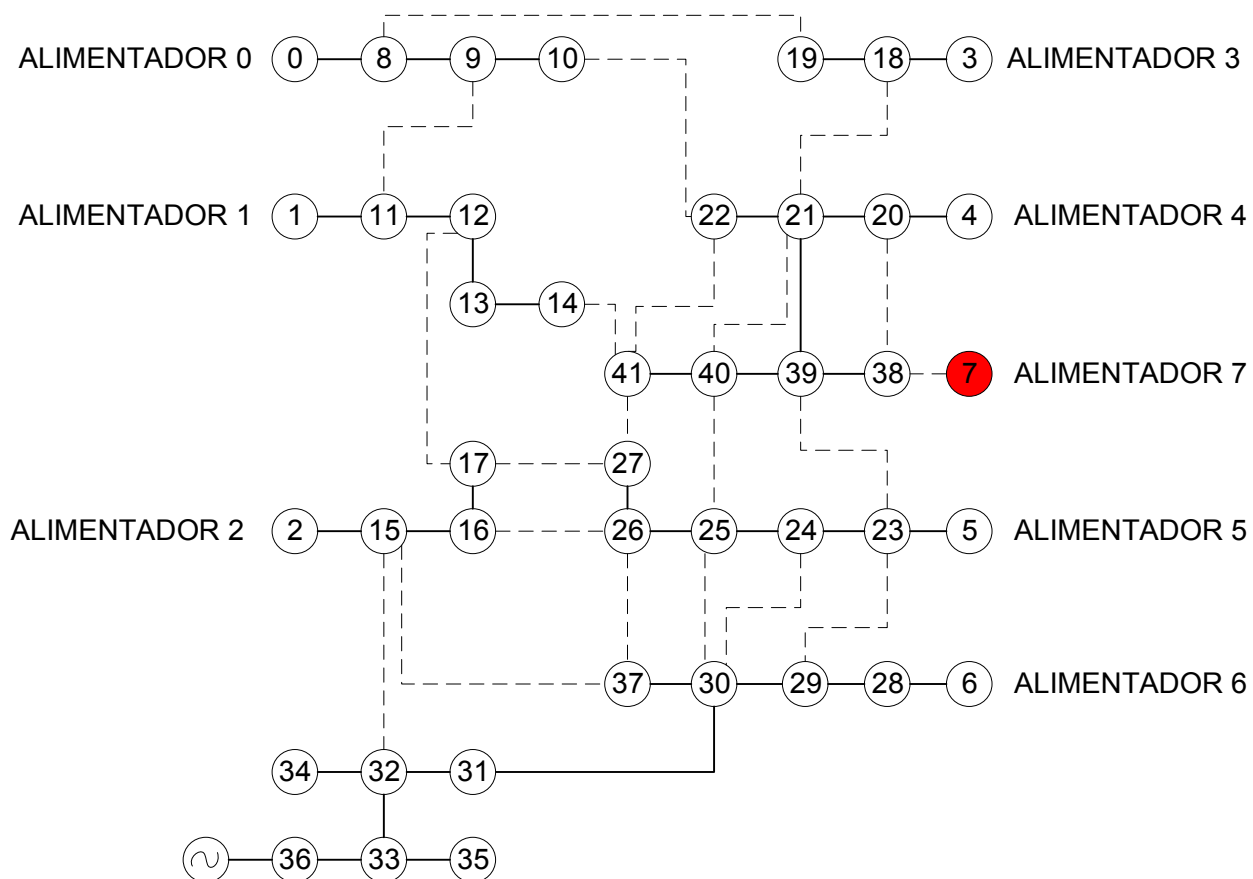
Fonte: Próprio autor.

b. Falta na seção 7

A falta na seção do alimentador 7 deixa sem fornecimento as seções 38, 39, 40 e 41. A chave 30 (entre as seções 7 e 38) é aberta para isolar a falta do sistema. Foram realizadas 20 simulações e em 100 % delas, a carga possível de restaurar foi restabelecida com uma iteração, embora são duas as configurações que conseguem o resultado com a mesma função objetivo, sendo uma delas apresentada na Figura 36 e sua sequência de chaveamento na Tabela 14. Na figura 38 apresenta-se a porcentagem de simulações nas quais as duas soluções

possíveis (fechar a chave 43 ou a chave 53) são obtidas. O tempo médio de processamento foi 0,094 segundos.

Figura 36 – Falta na seção 7. Adaptado da fonte.



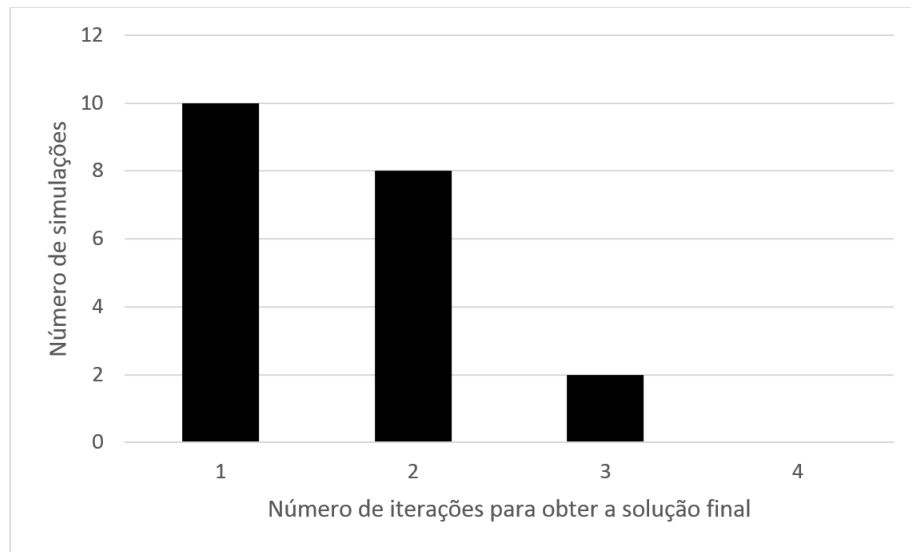
Fonte: Mantovani, Casari e Romero (2000).

Tabela 14 - Sequência de chaveamento do sistema com falta na seção 7.

Etapas	Ação	Número de chave	Seção inicial	Seção final
Isolar falta	Abrir	30	7	38
Restauração	Fechar	53	39	21

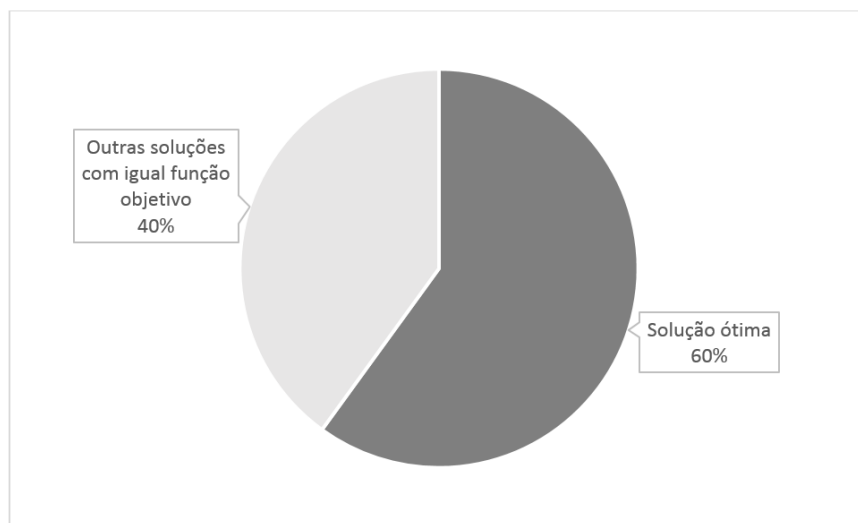
Fonte: Próprio autor.

Figura 37 – Número de iterações para obter a solução final no sistema com falta na seção 7.



Fonte: Próprio autor.

Figura 38 – Porcentagem das soluções encontradas no sistema com falta na seção 7.



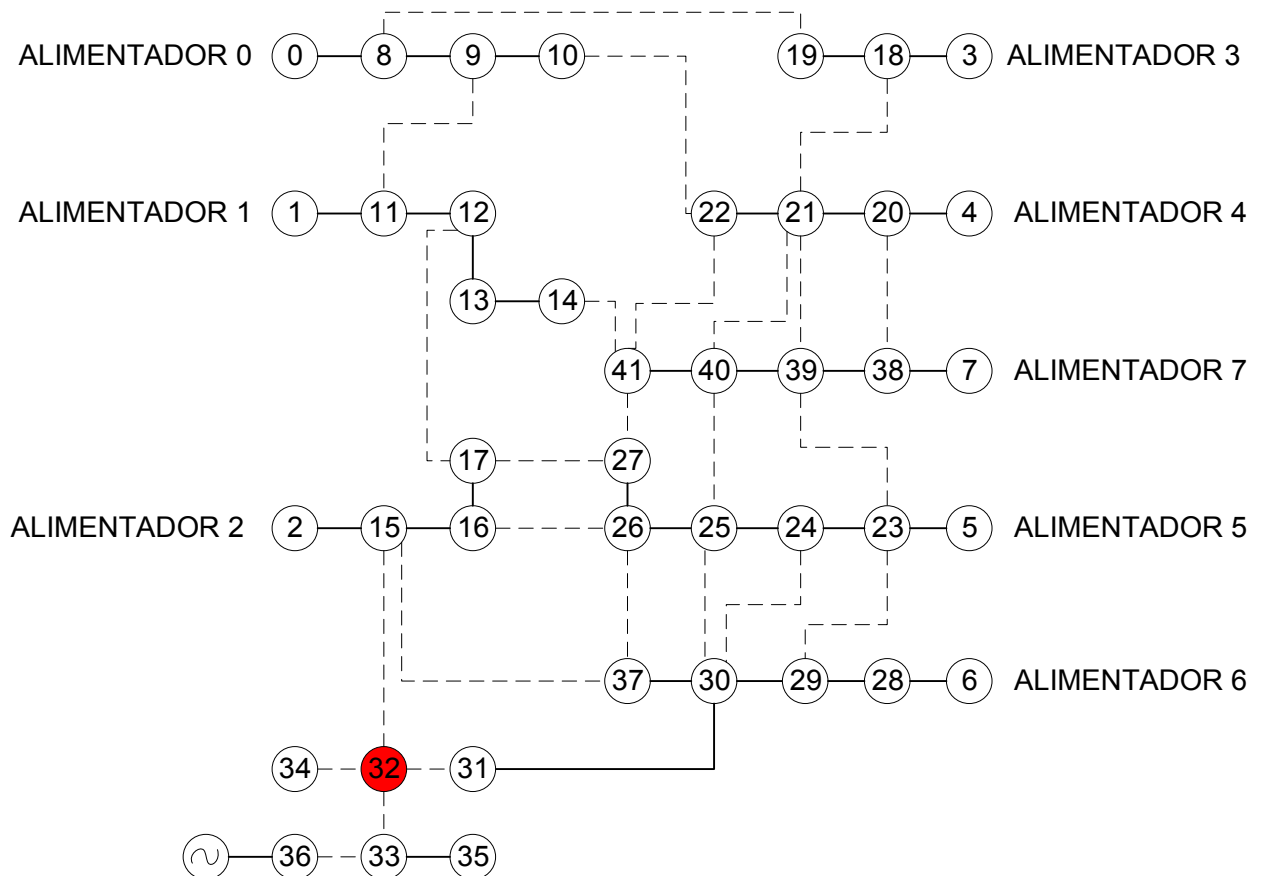
Fonte: Próprio autor.

c. Falta na seção 32

Uma prática comum nas empresas responsáveis pelos sistemas de distribuição é desligar automaticamente a geração distribuída conectadas aos alimentadores com falhas, por questões de segurança. Nesta simulação no momento que uma falha ocorre em uma seção do alimentador 6 (a seção 32 pertence ao citado alimentador), a geração distribuída alocada no nó 203 da seção 36 é desligada do sistema. Não existindo equipe de manutenção para restaurar as seções sem falta e sem fornecimento de energia, considera-se que gerador distribuído possa

ser ligado e a carga (seção 36) que pode ser restabelecida (neste trabalho toma-se 50% da capacidade do gerador em carga para manter reserva de geração). O tempo de processamento foi 0,031 segundos.

Figura 39 – Falta na seção 32. Adaptado da fonte.



Fonte: Mantovani, Casari e Romero (2000).

Tabela 15 - Sequência de chaveamento do sistema com falta na seção 32.

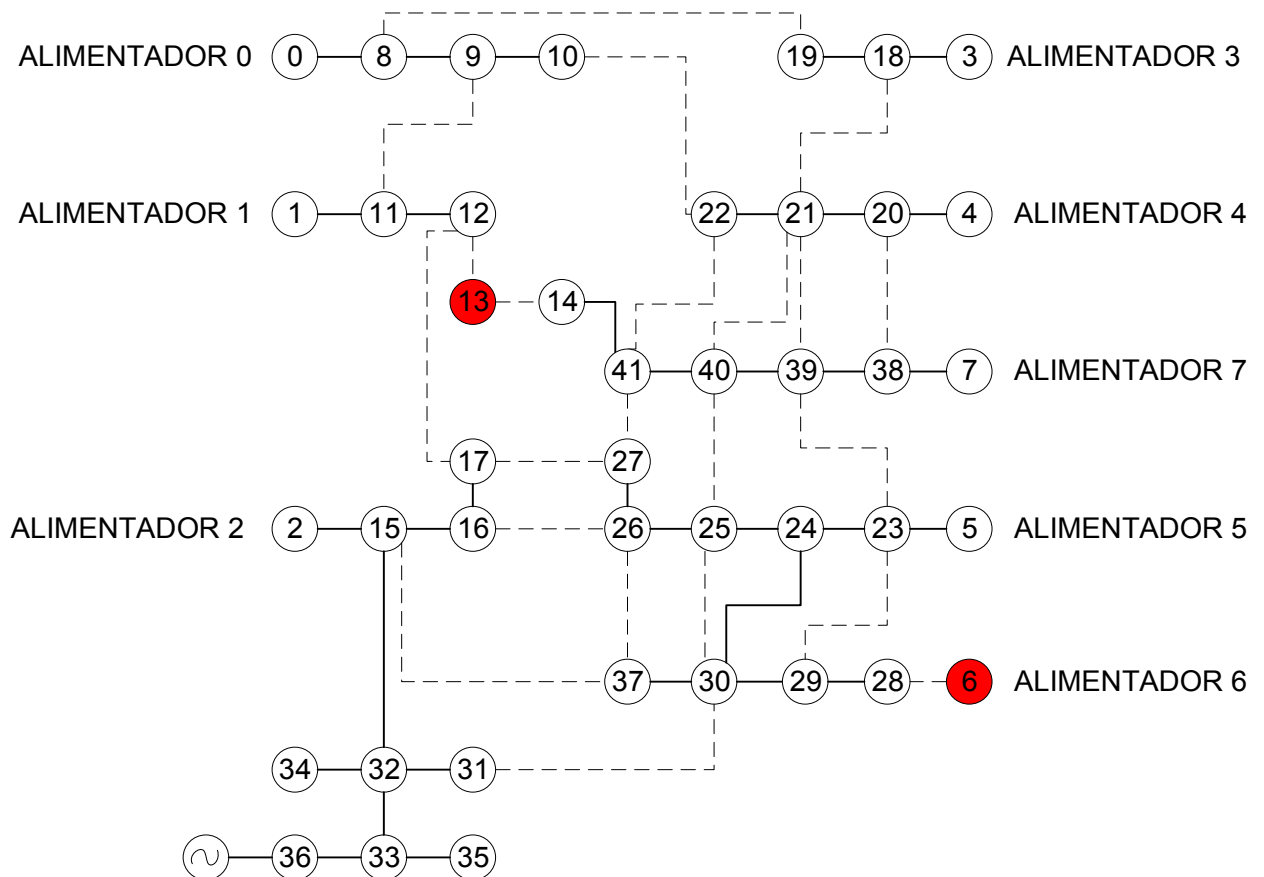
Etap	Ação	Número de chave	Seção inicial	Seção final
Isolar falta	Abrir	24	31	32
Isolar falta	Abrir	25	32	33
Isolar falta	Abrir	26	32	34
Restauração	Abrir	28	33	36

Fonte: Próprio autor.

d. Falta nas seções 6 e 13

Neste cenário uma condição de múltipla falta é simulada. Uma falta no alimentador 6 obriga a mudança de estado da chave 20 (entre as seções 6 e 28) e deixa sem fornecimento as seções 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36 e 37. Ao mesmo tempo, uma falta na seção 13 precisa ser isolada, para isto, abrem-se as chaves 5 e 6 (entre as seções 12, 13 e 13,14 respectivamente) e fica sem fornecimento a seção 14. Em 20 simulações efetuadas, o algoritmo consegue restaurar 100 % das cargas possíveis de restabelecer com 4 chaveamentos (Figura 40 e Tabela 16) após o isolamento das faltas, embora existam outras configurações com a mesma função objetivo (Figura 42). Na Figura 40, apresenta-se um remanejamento das cargas que na configuração pré-falta pertenciam ao alimentador 6, a chave 23 é aberta e as seções 30 e 31 são separadas. O grupo de seções 28, 29, 30 e 37 é transferido ao alimentador 5, enquanto que ao grupo de seções 31, 32, 33, 34, 35 e 36 é fornecida de energia novamente do alimentador 2. Por fim, a seção 14 é restabelecida fechando a chave 37. O tempo médio de processamento foi 0,062 segundos.

Figura 40 – Falta nas seções 6 e 13. Adaptado da fonte.



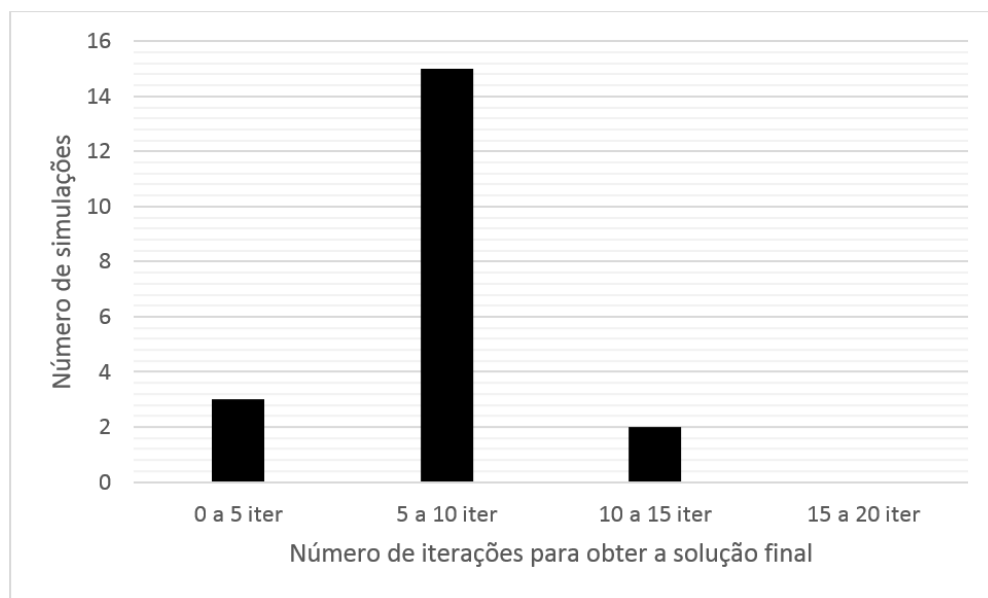
Fonte: Mantovani, Casari e Romero (2000).

Tabela 16 - Sequência de chaveamento do sistema com falta nas seções 6 e 13.

Etap	Ação	Número de chave	Seção inicial	Seção final
Isolar falta	Abrir	20	6	28
Isolar falta	Abrir	5	12	13
Isolar falta	Abrir	6	13	14
Restauração	Abrir	23	30	31
Restauração	Fechar	51	32	15
Restauração	Fechar	45	24	30
Restauração	Fechar	37	14	41

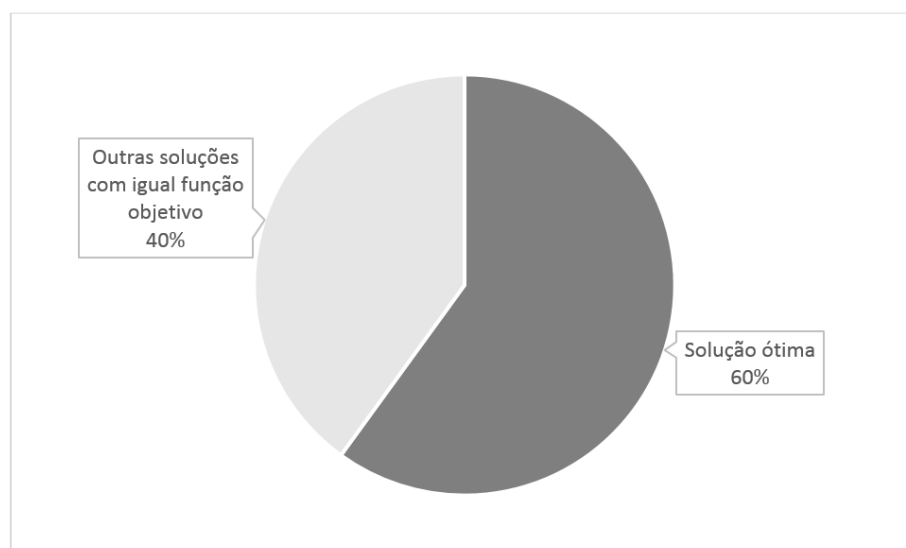
Fonte: Próprio autor.

Figura 41 – Número de iterações para obter a solução final no sistema com falta nas seções 6 e 13.



Fonte: Próprio autor.

Figura 42 – Porcentagem das soluções encontradas no sistema com falta nas seções 6 e 13.

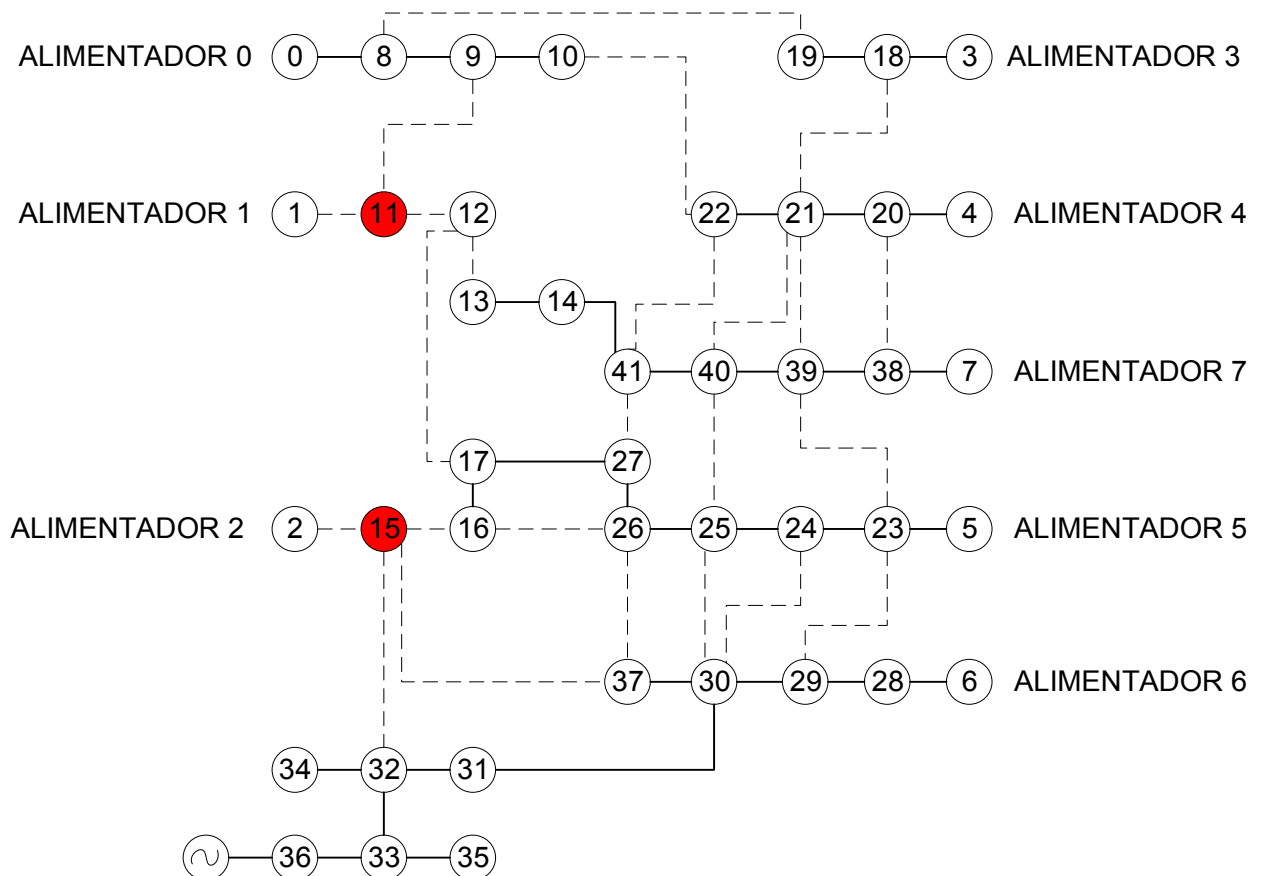


Fonte: Próprio autor.

e. Faltas nas seções 11 e 15

Neste cenário, as seções 11 e 15 apresentam falta. Como consequência da abertura das chaves para isolamento das seções com faltas, as seções 12,13, 14, 16 e 17 são desenergizadas e um processo de restauração é necessário. Um corte de carga da seção 12 viabiliza a obtenção de uma solução de boa qualidade, embora não seja a única configuração encontrada durante as 20 simulações realizadas. Na figura 43 as cargas das seções 13 e 14 são transferidas ao alimentador 7, as cargas das seções 16 e 17 são transferidas ao alimentador 5 e a carga da seção 12 não é restabelecida. Na Figura 44 apresenta-se a porcentagem das soluções com os diferentes cortes de carga necessários para obter soluções dentro dos limites operacionais. O tempo médio de processamento foi de 0,156 segundos.

Figura 43 – Falta nas seções 11 e 15. Adaptado da fonte.



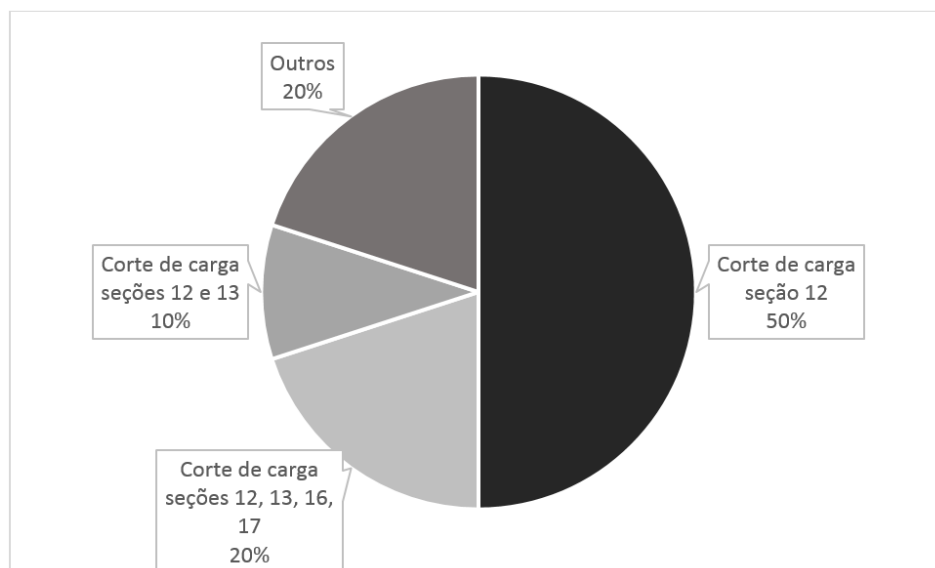
Fonte: Mantovani, Casari e Romero (2000).

Tabela 17 - Sequência de chaveamento do sistema com falta nas seções 11 e 15.

Etapas	Ação	Número de chave	Seção inicial	Seção final
Isolar falta	Abrir	3	1	11
Isolar falta	Abrir	4	11	12
Isolar falta	Abrir	7	2	15
Isolar falta	Abrir	8	15	16
Restauração	Abrir	5	12	13
Restauração	Fechar	40	17	27
Restauração	Fechar	37	14	41

Fonte: Próprio autor.

Figura 44 – Porcentagem das soluções encontradas no sistema com falta nas seções 11 e 15.

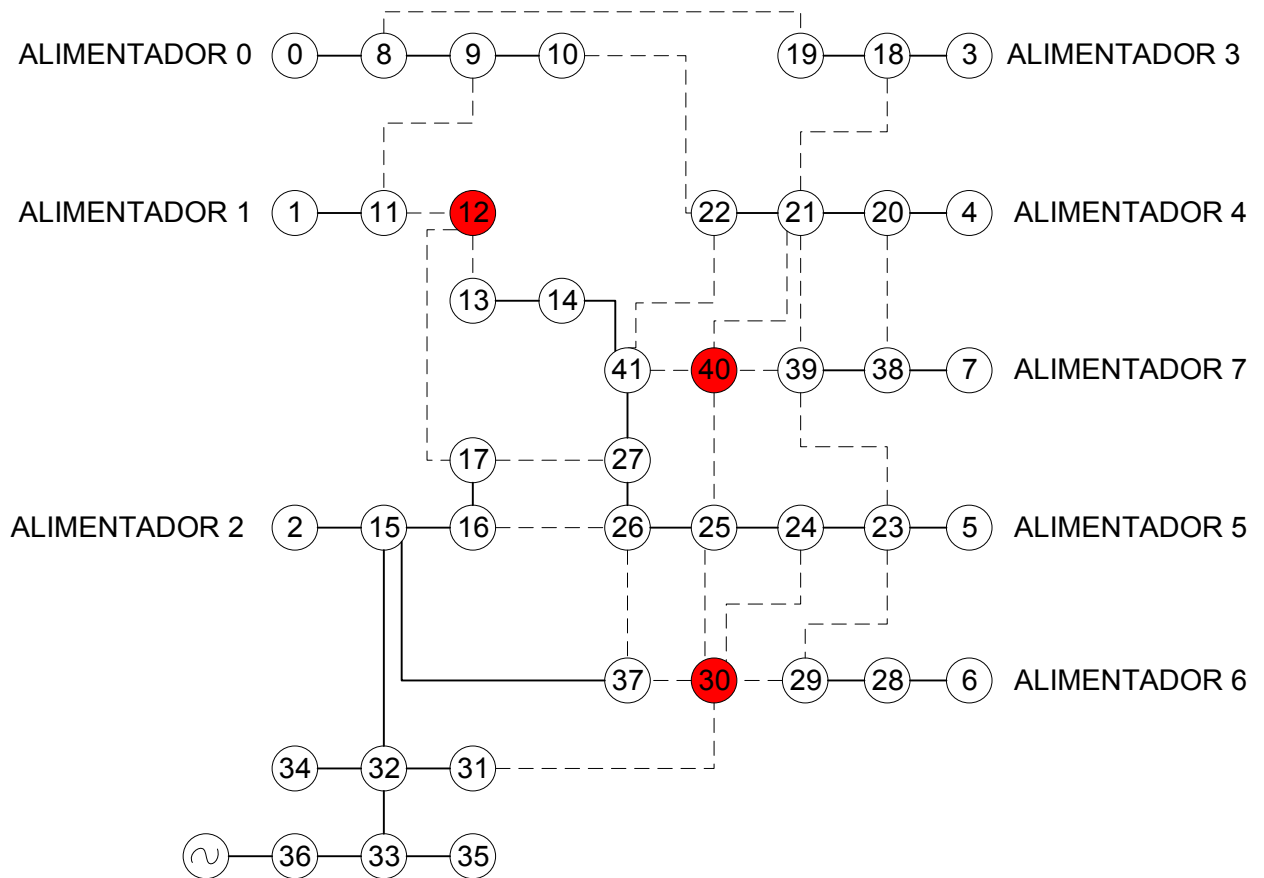


Fonte: Próprio autor.

f. Faltas nas seções 12, 30 e 40.

Foram realizadas 20 simulações em um cenário com múltiplas faltas nas seções 12, 30 e 40. As faltas geram uma perda de fornecimento nas seções 13, 14, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37 e 41 na etapa de isolamento das seções com falha. Uma solução ótima é obtida (Figura 45) restabelecendo todas as cargas possíveis em 90% das simulações efetuadas, e em 10% culminaram no corte de carga da seção 13. O tempo de processamento médio foi 0,094 segundos.

Figura 45 – Falta nas seções 12, 30 e 40. Adaptado da fonte.



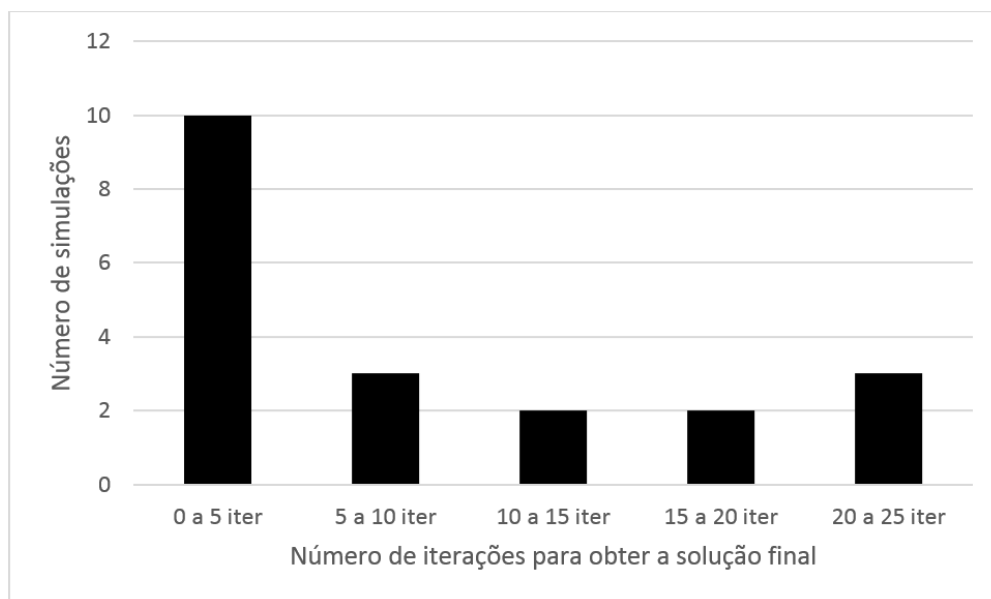
Fonte: Mantovani, Casari e Romero (2000).

Tabela 18 - Sequência de chaveamento do sistema com falta nas seções 12, 30 e 40.

Etap	Ação	Número de chave	Seção inicial	Seção final
Isolar falta	Abrir	4	11	12
Isolar falta	Abrir	5	12	13
Isolar falta	Abrir	22	29	30
Isolar falta	Abrir	23	30	31
Isolar falta	Abrir	29	30	37
Isolar falta	Abrir	32	39	40
Isolar falta	Abrir	33	40	41
Restauração	Fechar	54	41	27
Restauração	Fechar	37	14	41
Restauração	Fechar	41	15	37
Restauração	Fechar	51	32	15

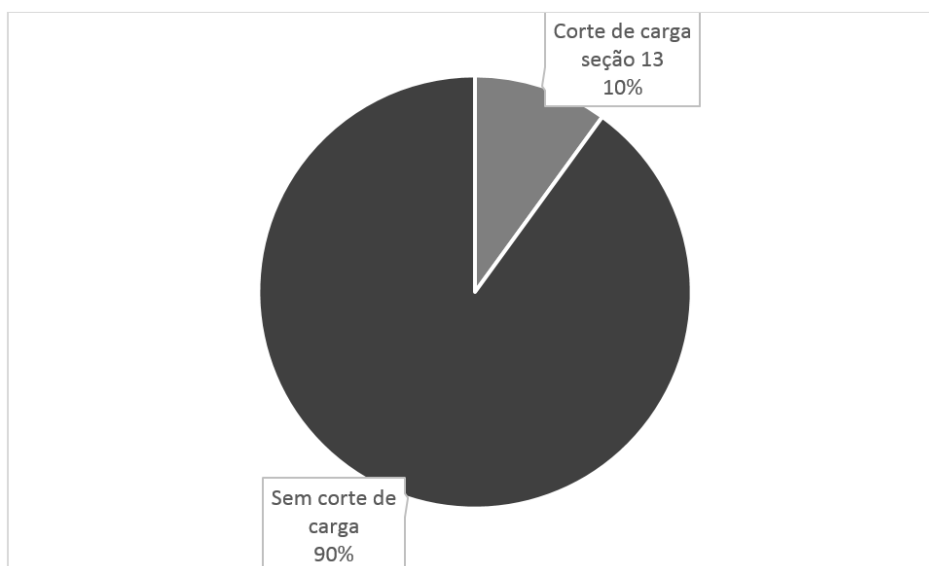
Fonte: Próprio autor.

Figura 46 – Número de iterações para obter a solução final no sistema com falta nas seções 12 e 30 e 40.



Fonte: Próprio autor.

Figura 47 – Porcentagem das soluções encontradas no sistema com falta nas seções 12, 30 e 40.



Fonte: Próprio autor.

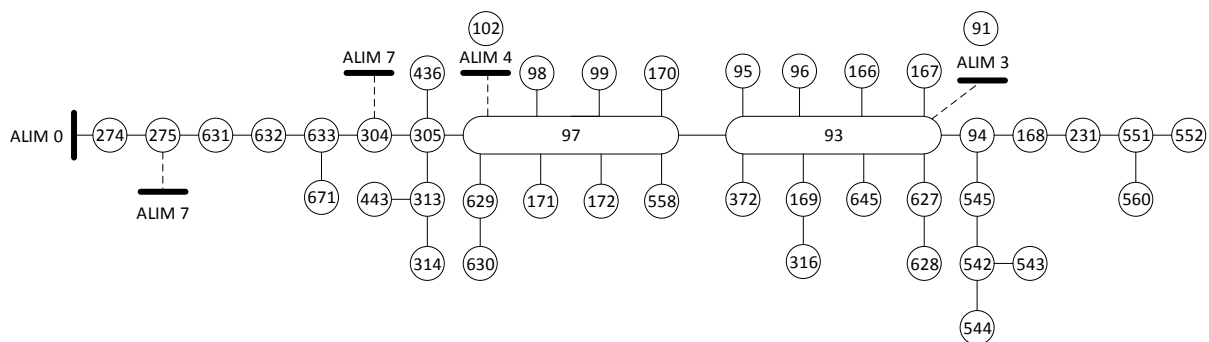
4.2.2 Simulação com o sistema de 7052 barras

a. Falta em uma seção no interior do alimentador 0

Foi considerada uma falta em uma seção no interior do alimentador 0 com saída às 8 horas e previsão de retorno às 12 horas. O alimentador 0 possui 42 seções e é vizinho de 3 alimentadores para possível transferência de carga. Estes alimentadores de emergência são os alimentadores 3 e 4 conectados ao primeiro transformador e o alimentador 7 conectado ao segundo transformador. Para isolar a falta as chaves conectadas à seção com falha foram abertas com o fim de isolá-la, interrompendo o fornecimento de uma carga total de 4007.53 kW distribuída entre 35 seções que foram desenergizadas.

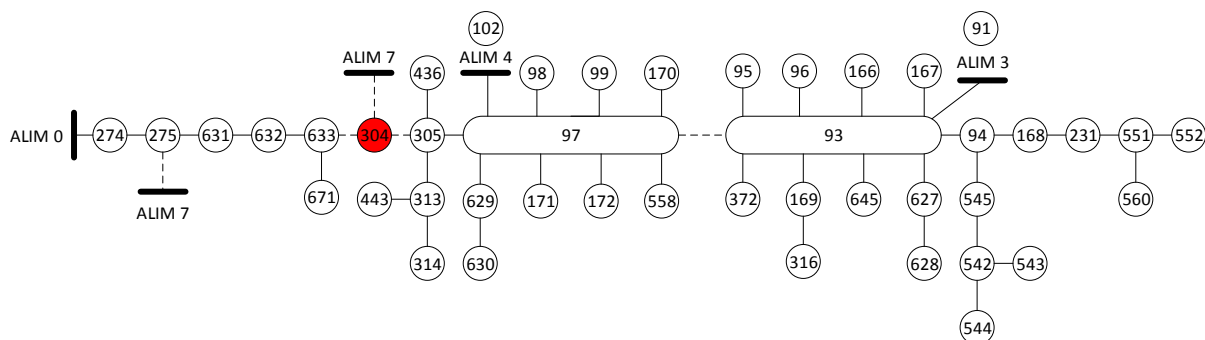
Para avaliar a técnica de solução foram realizadas 20 simulações para este cenário. Uma solução ótima com 100% de recuperação de carga em seções sem falha com 3 chaveamentos foi encontrada pelo algoritmo. Nesta solução parte da carga do alimentador que foi desenergizada, é transferida para o alimentador 3 e o restante da carga foi conectada ao alimentador 4 (Figura 49). A solução ótima representa 80% dos resultados das simulações, os 20% restante são soluções com corte de carga. Não foi necessária a operação ilhada dos geradores distribuídos. O tempo médio de processamento foi 12 de segundos.

Figura 48 – Alimentador em análise do segundo sistema teste.



Fonte: Próprio autor.

Figura 49 – Falta na seção 304.



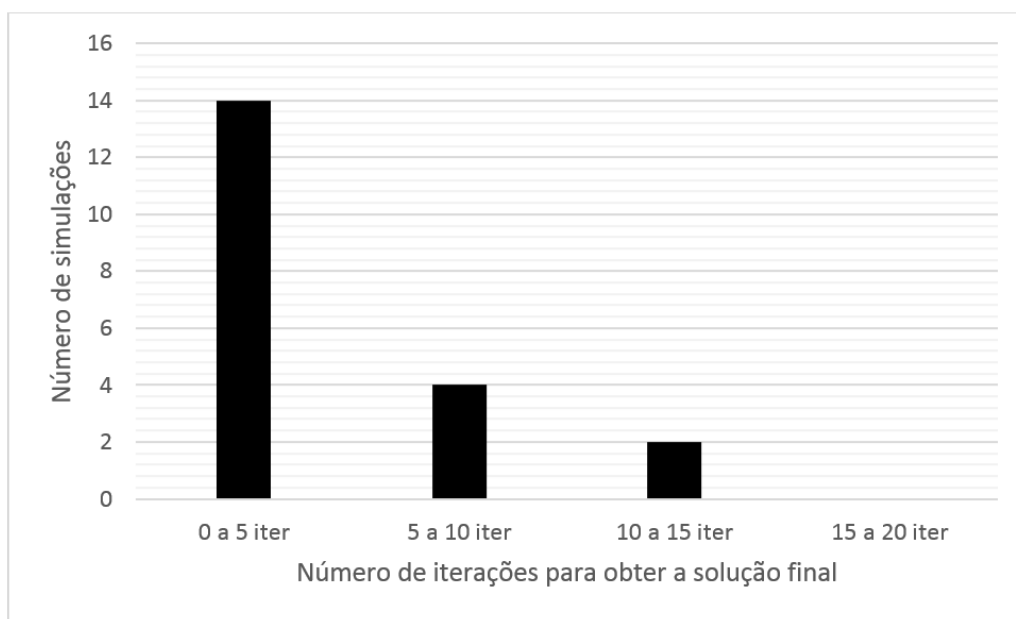
Fonte: Próprio autor.

Tabela 19 - Sequência de chaveamento do sistema com falta nas seções 12, 30 e 40

Etap	Ação	Número de chave	Seção inicial	Seção final
Isolar falta	Abrir	246	304	305
Isolar falta	Abrir	640	633	304
Restauração	Abrir	66	97	93
Restauração	Fechar	462	91	93
Restauração	Fechar	268	102	97

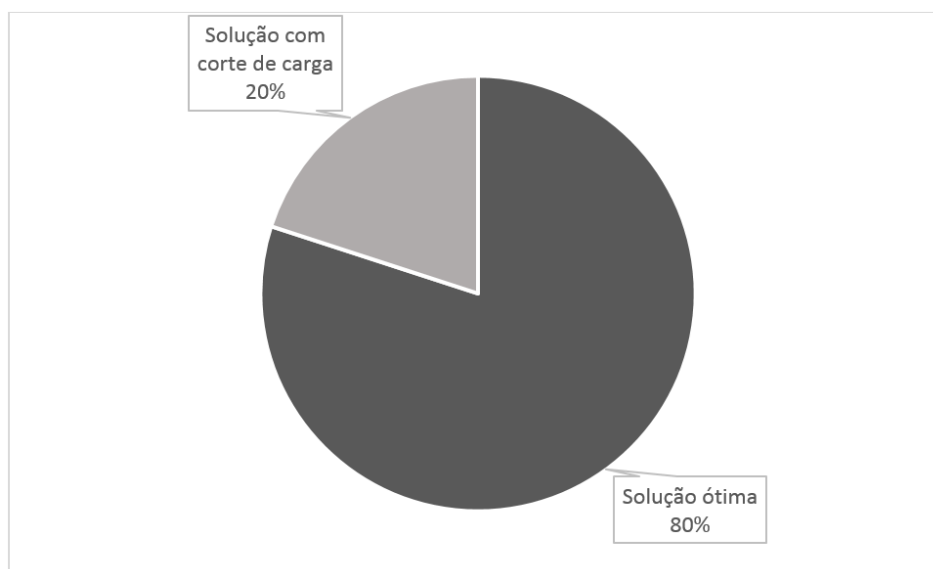
Fonte: Próprio autor.

Figura 50 – Número de iterações para obter a solução final no sistema com uma falta no alimentador 0.



Fonte: Próprio autor.

Figura 51 – Porcentagem das soluções encontradas com uma falta no alimentador 0.



Fonte: Próprio autor.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi proposto um algoritmo de otimização para tratar o problema da restauração de energia de sistemas de distribuição, baseado na meta-heurística busca tabu, e nos operadores da RNP para gerar as vizinhanças da BT.

O modelo matemático considera os principais objetivos e restrições no problema de restabelecimento de energia, considerando como sistema de codificação a RNP e os operadores PAO, CAO e CUT como técnica de exploração, os quais se mostraram adequados ao problema, produzindo somente soluções radiais. Considera-se também a presença de geração distribuída e operação ilhada para reduzir a quantidade de cargas fora de serviço e desta forma, aumentar a confiabilidade do sistema. Propõe-se, também, uma metodologia para obter um plano de sequência de chaveamentos e cenários de múltiplas faltas.

Os resultados para cenários de uma única falta foram satisfatórios, as configurações ótimas obtidas asseguram o fornecimento de energia das seções sem falta e com possibilidade de transferir cargas para outros alimentadores, as soluções foram factíveis com um tempo computacional baixo para ambos os sistemas testes, mostrando a viabilidade prática de aplicar o algoritmo proposto. Os resultados para cenários de múltiplas faltas apresentam uma porcentagem de simulações com corte de carga que se torna um desafio para a melhoria do trabalho. No entanto, verifica-se a partir dos resultados encontrados, que os geradores distribuídos podem contribuir para o processo de restabelecimento dos sistemas de distribuição em que se encontram conectados. Ressalta-se que ainda são necessárias muitas pesquisas tecnológicas para que estes microgeradores, se instalados na rede, contribuam de maneira eficiente de forma técnica, operacional, comercial e econômica.

Para desenvolvimentos futuros deste trabalho, propõe-se a pesquisa e abordagem dos seguintes tópicos:

- Definir uma região geográfica da falta, para restringir o número de chaves que possam ser operadas dentro de um raio limite em torno do ponto da falta.
- Analisar os impactos nos transitórios de tensão e corrente devido às ações de restaurações de redes de distribuição.
- Incorporar melhorias na heurística para obter a sequência de chaveamentos.
- Incorporar ao modelo técnicas de previsão de recursos (velocidade do vento, irradiação solar e vazão) com horizonte de curtíssimo prazo (algumas horas) a partir de medições em tempo real e/ou séries históricas.

- Adicionar técnicas de previsão de demanda ativa e reativa para os diferentes tipos de consumidores com horizonte de curtíssimo prazo (algumas horas) a partir de medições em tempo real e/ou séries históricas.
- Tratar as incertezas das previsões de geração e demanda e avaliar como possíveis erros de previsão afetariam os resultados encontrados.
- Determinação de procedimentos comerciais distribuidora/gerador/consumidor para a remuneração dos serviços ancilares associados ao restabelecimento e operação de forma ilhada ou micro rede.
- Incluir no modelo as restrições de rampa das cargas de aquecimento.

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, P. M. *Power system protection*. New York: IEEE, 1999. (Series on Power Engineering).
- ACKERMAN, T.; ANDERSON, G.; SODER, L. Distributed generation: a definition. *Electric Power Systems Research*, Lausanne, v. 71, n. 2, p. 119-128, 2000.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEL. *Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST*. Brasília, DF: ANEL, 2014. Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica.
- AUGUGLIARIO, A.; DUSONCHET, LUIGI.; RIVA SANSEVERINO, E. Evolving non-dominated solutions in multiobjective service restoration for automated distribution networks. *Electric Power Systems Research*, Palermo, v. 59, n. 3, p. 185-195, 2001.
- BROWN, L.; FREEMAN, L. Analyzing the reliability impact on distributed generation. In: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY SUMMER MEETING, 2001, Vancouver. *Proceedings...* New York: IEEE, 2001. v. 2, p. 1013-1018.
- CHAITUSANEY, S.; YOKOYAMA, A. Reliability analysis of distribution systems with distributed generation considering loss of protection coordination. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PROBABILISTIC METHODS APPLIED TO POWER SYSTEMS, 2006, Stockholm. *Proceedings...* New York: IEEE, 2005. p. 1-8.
- CHOWDHURY, S. C. S.; CRESSLEY, P. *Microgrid and active distribution networks*. Stevenage: IET Publishers, 2009.
- CINVALAR, S. ; GRAINGER, J. J.; YIN, H.; LEE, S. S. H. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction. *IEEE Transactions on Power Delivery*, New Orleans, v. 3, n. 3, p. 1217 – 1223, 1988.
- DELBEM, A. C. B. CARVALHO, A. de; POLICASTRO, C. A; PINTO, A. K. O.; HONDA, K.; GARCIA A. C. *Node-depth encoding for evolutionary algorithms applied to network design*. São Carlos: Escola de engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 2004. p. 678-687.
- EL-KHATTAN, W.; SALAMA, M. Distributed generation technologies, definitions and benefits. *Electric Power Systems Research*, Lausanne, v. 71, n. 2, p. 119-128, Oct. 2004.
- GLOVER, F. Tabu search-part i. *ORSA Journal on Computing*, Baltimore, v. 1, n. 3, p. 190-206, 1989.
- GLOVER, F. Tabu search-part ii. *ORSA Journal on Computing*, Baltimore, v. 2, n 1, p. 4-32, 1990.
- GOMEZ, J. C.; MORCOS, M. M. Distributed generation: exploitation of islanding operation advantages. In: TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION: LATIN AMERICA, 2008, Bogotá. *Proceedings...* Bogotá: IEEE, 2008. p. 1-5.

HATTORI, M; KANESHIGE, Y; SHIMADA, K; TAKAHASHI, K. A new distribution power network restoration algorithm based on modern heuristic method. In: POWER ENGINEERING SOCIETY SUMMER MEETING, 2000, Seattle. Proceedings... Seattle: IEEE, 2000. p. 169 – 171.

HSU, Y. Y.; HUANG, H. M.; KUO, H. C.; PENG, S.; CHANG, C.; CHANG. Distribution system service restoration using a heuristic search approach. *IEEE Transactions on Power Delive*, New York, v. 7, n. 2, p. 734-740, 1992.

HUANG, C, M. Multiobjective service restoration of distribution systems using fuzzy cause-effect networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 18, n. 2, 2003. p. 867-875.

INAGAKI, J; NAKAJIMA, J.; HASEYAMA, M. A multiobjective service restoration method for power distribution systems. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CIRCUITS AND SYSTEMS ISCAS, 2006, Island of Kos. *Proceedings...* New York: IEEE, 2006. p. 1-4.

KYEONG JUN MUN ; SOUTH KOREA; PARK, J. H.; HYUNG-SU KIM; JUNG-IL SEO. Development of real-time-service restoration system for distribution automation system. INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INDUSTRIAL ELECTRONICS- ISIE, 2001, Pusan. *Proceedings...* New York: IEEE, 2001.v. 3, p. 1514 – 1519.

LOPES LEZAMA, J. M. *Avaliação de localização e preço de contrato de geração distribuída em um ambiente competitivo*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”- UNESP, Ilha Solteira, 2011.

MANTOVANI, J. R. S.; CASARI, F.; ROMERO R. Reconfiguração de sistema de distribuição radiais utilizando o critério de queda de tensão. *SBA Controle e Automação*, Porto Alegre, v. 11, n. 2, p. 150-159, 2000.

MATHIAS-NETO, W. *Restauração automática de redes de distribuição de energia elétrica de grande porte com geração distribuída*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”- UNESP, Ilha Solteira, 2011.

MATHIAS-NETO, W. *Restauração de sistemas de distribuição de energia elétrica*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”- UNESP, Ilha Solteira, 2014.

MORELATO, A; MONTICELLI, A. Heuristic search approach to distribution system restoration. *IEEE Transactions on Power Delivery*, New York, v. 4, n. 4, p. 2235 – 2241, 1989.

RUPOLO, D. *Reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica através de um algoritmo de busca dispersa*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”- UNESP, Ilha Solteira, 2013.

SANCHES, D. S. *Algoritmo evolutivo multi-objetivo para reconfiguração de redes em sistemas de distribuição de energia elétrica*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)- Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo - USP, São Carlos, 2013.

SANTOS, A. C.; NANNI M.; MANSOUR, M. R., DELBEM, A. C. B.; LONDON JUNIOR, J. B. A.; BRETAS, N. G. *A power flow method computationally efficient for large-scale distribution systems*. In: TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION: LATIN AMERICA, 2008, Bogotá. Proceedings... New York: IEEE/PES, 2008. p. 1-6.

SEDANO, E.C. *Restauração de redes de distribuição de energia elétrica usando algoritmo de busca tabu reativa*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”- UNESP, Ilha Solteira, 2005.

SHIRMOHAMMADI, D. A.; HONG, H. W.; SEMLEY, A.; LUO, G. X. A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, Montreal, v. 3, n. 2, p. 753-762, 1988.

SONG, Z.; DEMAREE, K. ; JING, L. Restoration of a smart distribution system. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEM TECHNOLOGY - POWERCON, 2010, Hangzhou. *Proceedings...* New York: IEEE, 2010. p. 1-5.

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*, New York, v. 17, n. 1, p. 173-181, 2002.