



Universidade Federal da Bahia
Escola Politécnica
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica



ERICK BALEEIRO DA SILVA

**APLICAÇÃO DO ALGORITMO COLÔNIA DE FORMIGAS
NA RESTAURAÇÃO DE REDES ELÉTRICAS DE
DISTRIBUIÇÃO**

Salvador
2016

ERICK BALEEIRO DA SILVA

**APLICAÇÃO DO ALGORITMO COLÔNIA DE FORMIGAS
NA RESTAURAÇÃO DE REDES ELÉTRICAS DE
DISTRIBUIÇÃO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Bahia, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Prof. Nivaldo Roberto Ferreira, D. Sc.

Orientador

Salvador
2016

Dedico este trabalho a Deus e à minha família.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ser essencial em minha vida, autor do meu destino, meu guia.

Ao Professor Niraldo Roberto Ferreira pela excelência na orientação e dedicação dispensada para a realização deste trabalho, além das conversas e ensinamentos que muito contribuíram para minha vida profissional e pessoal.

À minha família, em especial à minha mãe, Custódia Baleeiro, meu pai Celso Henrique e minha irmã Andressa Baleeiro por todo apoio e incentivo dado durante o curso de Mestrado.

Aos meus amigos Thiago Lopes e Ronnye Peterson pelo tempo dispensado para o auxílio no desenvolvimento do trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Bahia, por todo suporte oferecido.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de estudo concedida.

RESUMO

Os sistemas de distribuição são muito susceptíveis à ocorrência de faltas que, por muitas vezes, provocam interrupções permanentes no fornecimento de energia elétrica em parte do sistema. A restauração do sistema ocorre por meio de operações de chaveamento que definem uma nova configuração durante o restabelecimento da energia. Essa nova configuração deve ser determinada de modo que se tenha o menor número de cargas não atendidas, respeitando as restrições operacionais e a topologia radial da rede. Diversas técnicas foram desenvolvidas para sanar este problema como subsídio ao operador do sistema, visto que a restauração é um procedimento complexo de decisão e controle que deve ser solucionado o mais breve possível. Matematicamente, a reconfiguração para restauração de redes pode ser tratada como uma questão de natureza combinatória que pode ser modelado como um problema de programação não linear de variável inteira mista. A explosão combinatorial para esses problemas é iminente devido sua dimensão estar relacionada com o número de chaves manobráveis, podendo o número de possibilidades ser determinada pela relação 2^n , onde n é o número de chaves. Logo, quanto maior o número de chaves manobráveis, maior a dimensão do problema e mais complexa a sua resolução. Diante da complexidade da situação já mencionada, métodos de otimização heurística são ferramentas atraentes para solucionar situações dessa categoria. Sendo assim, neste trabalho apresenta-se uma metodologia baseada em otimização por colônia de formigas – *Ant Colony Optimization* (ACO), para solucionar o problema de restauração de redes elétricas de distribuição, com o objetivo de minimizar a quantidade de consumidores não atendidos. Esse método é baseado no comportamento de colônia de formigas reais na busca por fontes de alimentos e tem se mostrado eficiente para solucionar problemas de natureza combinatória, localizando rapidamente soluções de boa qualidade. Na solução do problema, considera-se que as redes radiais de distribuição são trifásicas e balanceadas, e estão operando em regime permanente. Existem diversos trabalhos que utilizam da heurística ACO para a resolução do problema de restauração das redes elétricas de distribuição, no entanto, grande parte dispõe das variantes mais simples do algoritmo ou utiliza o ACO em conjunto com outra heurística. Desta forma, a escolha do método deste trabalho foi o *Ant Colony System* (ACS), por ter característica de busca maximizada quando comparada a outras versões implementadas para esta problematização, como a pioneira *Ant System* (AS). O algoritmo foi testado para sistemas encontrados na literatura, e os resultados obtidos são comparados com os de outros autores.

Palavras-chave: Otimização por colônia de formigas; restauração de redes de distribuição; computação bioinspirada; métodos heurísticos; método da soma de potência.

ABSTRACT

Distribution systems are very susceptible to the occurrence of faults that, frequently, cause permanent interruptions in electricity supply in the system. The system restoration occurs through switching operations that define a new configuration when power is restored. This new configuration must be determined so that it has the lowest number of missed loads, respecting the operational constraints and the radial network topology. Several techniques have been developed to solve this problem as a subsidy to the system operator, as the restoration is a complex decision process and control that must be solved as soon as possible. Mathematically, the reconfiguration for network restoration may be treated as a matter of combinatorial nature that can be modeled as a nonlinear programming problem with mixed-integer variable. The combinatorial explosion for these problems is imminent due to their size being related to the number of operable keys, whereby the number of possibilities being determined by the relation 2^n , where n is the number of Keys. So, greater the number of operable keys are, greater the extent of the problem are more complex its resolution. Given the complexity of the situation mentioned above, heuristic optimization methods are attractive tools to solve situations of that category. Therefore, this work presents an optimization-based methodology colony of ants - Ant Colony Optimization (ACO), to solve the problem of electrical distribution networks restoration, in order to minimize the amount of unserved consumers. This method is based on the real ant colony behavior in the search for food sources and has proven effective to solve combinatorial nature of problems, quickly locating of good quality solutions. In the solution of the problem, it is considered that the radial distribution networks are three-phase and balanced, and are operating at steady state. There are several works that use the heuristic ACO for solving the problem of restoration of electrical distribution networks, however, many of them have the simplest variant of the algorithm or use the ACO in conjunction with other heuristic. Thus, the choice of the method of this work was Ant Colony System (ACS) for having maximized search feature compared to other versions implemented for this problematic, as the pioneer Ant System (AS). The algorithm was tested for systems found in the literature, and the results obtained are compared with those of other authors.

Keywords: optimization by ant colony; distribution system restoration; bio-inspired computing; Heuristic methods; power sum method.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2	RESTAURAÇÃO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO.....	4
1.3	MOTIVAÇÃO.....	7
1.4	OBJETIVO.....	9
1.4.1	<i>Geral</i>	9
1.5	DIVULGAÇÃO DA PESQUISA	9
1.6	ORGANIZAÇÃO.....	9
2	METODOLOGIA.....	11
2.1	INTRODUÇÃO.....	11
2.2	MÉTODOS HEURÍSTICOS.....	11
2.3	METAHEURÍSTICAS	12
2.3.1	<i>Inteligência coletiva</i>	14
2.4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
3	OTIMIZAÇÃO POR COLÔNIAS DE FORMIGAS.....	17
3.1	INTRODUÇÃO.....	17
3.2	COMPORTAMENTO DAS FORMIGAS NA BUSCA POR FONTES DE ALIMENTOS	17
3.2.1	<i>Experimento da ponte dupla</i>	18
3.3	COMPARAÇÃO ENTRE AS FORMIGAS REAIS E ARTIFICIAIS.....	20
3.4	ACO APLICADO AO PROBLEMA DO CAIXEIRO VIAJANTE.....	21
3.5	ALGORITMOS INSPIRADOS NO ACO	23
3.5.1	<i>Ant System - AS</i>	23
3.5.2	<i>MAX-MIN Ant System – MMAS</i>	25
3.5.3	<i>Ant Colony System – ACS</i>	27
4	FLUXO DE POTÊNCIA.....	31
4.1	INTRODUÇÃO	31

4.2	MODELO DAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO	31
4.3	MÉTODO DA SOMA DE POTÊNCIAS – MSP	32
4.3.1	<i>Formulação matemática do problema</i>	34
5	ACO PARA A RESTAURAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO	38
5.1	INTRODUÇÃO	38
5.1.1	<i>Teoria dos Grafos aplicada à Análise de Redes Elétricas</i>	39
5.1.2	<i>Identificação de Barras Ilhadas no Sistema</i>	40
5.1.3	<i>Identificação de Laços do Sistema</i>	41
5.1.4	<i>Descrição do problema</i>	45
5.2	RESTAURAÇÃO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO VIA ACS	46
5.2.1	<i>Regra de Transição de Estados</i>	46
5.2.2	<i>Distribuição do Feromônio</i>	47
5.2.3	<i>Informação Heurística</i>	48
5.2.4	<i>Sorteio da ligação</i>	48
5.3	ALGORITMO DE SOLUÇÃO DO ACS PARA O PROBLEMA DA RESTAURAÇÃO DE REDES ELÉTRICAS	50
5.4	FLUXOGRAMA PARA O ALGORITMO DO ACS PARA O PROBLEMA DA RESTAURAÇÃO DE REDES ELÉTRICAS	52
6	TESTES E RESULTADOS NUMÉRICOS	53
6.1	INTRODUÇÃO	53
6.2	EXEMPLO DO DESLOCAMENTO DAS FORMIGAS – SISTEMA DEFEITUOSO DE 16 BARRAS	53
6.3	RESTAURAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO	57
6.3.1	<i>Sistema de 16 barras</i>	58
6.3.2	<i>Sistema de 33 barras</i>	62
7	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	69
7.1	CONCLUSÕES	69
7.2	PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	70
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71

APÊNDICE A	77
DADOS DOS SISTEMAS TESTADOS	77
<i>A1 Sistema de 16 barras</i>	77
<i>A2 Sistema de 33 barras</i>	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Histórico de Continuidade do Fornecimento do Brasil.....	3
Figura 1.2: Estados de Operações de um Sistema de Distribuição	6
Figura 1.3: Exemplo simples da operação de chaveamento para restauração do serviço	8
Figura 3.1: Deslocamento das formigas na busca do alimento	17
Figura 3.2: Experimento ponte de comprimentos iguais.	18
Figura 3.3: Experimento ponte de comprimentos diferentes.....	19
Figura 3.4: % do tráfego no ramo maior	19
Figura 3.5: Resultado obtido para o problema do caixeiro viajante para 30 cidades aplicando o AS	22
Figura 3.6: Construção da rota utilizando o AS	23
Figura 3.7: Escolha da rota.....	23
Figura 4.1: Rede de distribuição radial.....	33
Figura 4.2: Um trecho de um sistema de distribuição.	33
Figura 5.1: Diagrama unifilar de um sistema de distribuição radial simples	39
Figura 5.2: Sistema exemplo com defeito entre as barras 2 e 3	40
Figura 5.3: Árvore do sistema exemplo contendo falha entre as barras 2 e 3.....	41
Figura 5.4: Sistema teste operando normalmente.....	42
Figura 5.5: Árvore do sistema exemplo operando em situação normal	42
Figura 5.6: Grafo do sistema, exemplo com formação do laço na área tracejada.....	45
Figura 5.7: Escolha aleatória das ligações.....	49
Figura 5.8: Fluxograma do ACS para o problema de restauração.....	52
Figura 6.1: Sistema defeituoso de 16 barras - Reconfigurado.....	53
Figura 6.2: Exploração das formigas – estado inicial.....	54
Figura 6.3: Exploração das formigas – 1ª movimentação.	54
Figura 6.4: Sistema de 16 barras após a primeira movimentação das formigas.....	55
Figura 6.5: Formação do laço no sistema	56
Figura 6.6: Sistema defeituoso de 16 barras – Restabelecido.	57
Figura 6.7: Configuração inicial para o sistema de 16 barras	58
Figura 6.8: Sistema 16 barras - reconfigurado	59
Figura 6.9: Sistema defeituoso de 16 barras - Reconfigurado.....	59

Figura 6.10: Perfil de tensão inicial para o sistema de 16 barras reconfigurado antes da ocorrência da falta	61
Figura 6.11: Perfil de tensão das barras após a restauração para o sistema de 16 barras	61
Figura 6.12: Convergência do algoritmo ACS para o sistema de 16 barras.....	62
Figura 6.13: Configuração inicial para o sistema de 33 barras	63
Figura 6.14: Sistema de 33 barras reconfigurado	64
Figura 6.15: Sistema defeituoso de 33 barras - Reconfigurado.....	64
Figura 6.16: Perfil de tensão inicial para o sistema de 33 barras reconfigurado antes da ocorrência da falta	65
Figura 6.17: Perfil de tensão das barras após a restauração para o sistema de 33 barras com limite de tensão de 0.85 p.u.	66
Figura 6.18: Convergência do algoritmo ACS para o sistema de 33 barras com limite de tensão de 0.85 p.u.	66
Figura 6.19: Perfil de tensão das barras após a restauração para o sistema de 33 barras com limite de tensão de 0.95 p.u.	67
Figura 6.20: Convergência do algoritmo ACS para o sistema de 33 barras com limite de tensão de 0.95 p.u.	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 6.1: Parâmetros Utilizados.....	58
Tabela 6.2: Resultados para o sistema de 16 barras	60
Tabela 6.3: Comparação do resultado final do restabelecimento do sistema IEEE 33 barras .	65
Tabela 6.4: Comparação do resultado final do restabelecimento do sistema IEEE 33 barras - Limite inferior de tensão de 0,95 p.u.....	67

LISTA DE ABREVIações

ACO: *Ant Colony Optimization*

ACS: *Ant Colony System*

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

AS: *Ant System*

CCEE: Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

CH: Chaveamento

DEC: Duração de Interrupção por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão

DIC: Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão

DMIC: Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão

EPE: Empresa de Pesquisa Energética

FEC: Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão

FIC: Frequência Equivalente de Interrupção Individual por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão

GD: Geração Distribuída

HC-ACO: Hiper cubo com *Ant Colony Optimization*

MMAS: *MAX-MIN Ant System*

MSP: Método da Soma de Potência

ONS: Operador Nacional do Sistema

PNLIM: Programação Não Linear Inteira Mista

PNS: Potência Não Fornecida

SDEE: Sistema de Distribuição de Energia Elétrica

SE: Subestação

SEP: Sistema Elétrico de Potência

TSP: *Traveling Salesman Problem*

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O crescente desenvolvimento da sociedade e o conseqüente aumento do consumo de energia elétrica tornaram indispensáveis às empresas que integram o setor elétrico (geração, transmissão e distribuição) a constante melhoria na qualidade de seus produtos e serviços.

O Brasil impulsiona um mercado altamente competitivo, exigindo que as empresas concessionárias de energia elétrica sejam induzidas a propor estratégias que visem uma melhor eficiência dos serviços de distribuição, principalmente no que tange a confiabilidade e a redução das perdas de potência. Estas perdas representam custos adicionais para as concessionárias de distribuição, de forma que estes custos não podem ser eliminados, mas sim minimizados.

O objetivo de um sistema elétrico de potência (SEP), tendo em vista atender todas as exigências atuais é gerar, transmitir e distribuir a energia elétrica atendendo a todos os padrões exigidos de confiabilidade, disponibilidade, qualidade, segurança e custos, tendo o mínimo impacto ambiental. Entretanto, diversos fatores dificultam a realização destes objetivos, tais como: oscilações na demanda, falhas na geração, transmissão e distribuição, entre outros.

Os sistemas de distribuição são muito susceptíveis à ocorrência de faltas que, muitas vezes, provocam interrupções permanentes no fornecimento da energia elétrica em parte do sistema. Desta forma, faz-se necessário restabelecer o serviço a maior parcela que ficou sem atendimento e conseqüentemente isolar a menor área em que ocorreu a falta. A restauração do sistema ocorre através de operações de chaveamento que definem uma nova topologia de configuração durante o restabelecimento da energia. O processo de restauração deve preservar o cumprimento das restrições físicas e operacionais da rede durante a correção da falha. Posteriormente, a rede deve voltar a funcionar em seu estado normal. O estado restaurativo é o estado de operação da rede em que houve corte de carga e persiste enquanto os locais da falha estiverem isolados (MONTICELLI, 1983).

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é o órgão responsável por avaliar as empresas concessionárias no Brasil quanto à continuidade de fornecimento de energia elétrica com base nos indicadores coletivos e individuais. Os indicadores já mencionados podem ser calculados para períodos de apuração mensal, trimestral e anual. Estes indicadores são

considerados para interrupções com duração maior ou igual a três minutos, ou seja, de longa duração.

Para possibilitar a avaliação da continuidade na prestação do serviço de energia elétrica de cada unidade consumidora, foram criados os seguintes indicadores individuais: DIC (Duração de Interrupção por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão), FIC (Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão) e DMIC (Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão) (ANEEL, 2011).

Os cálculos dos indicadores para o acompanhamento individual das interrupções ocorridas em cada unidade consumidora atendida pela concessionária são descritas nas equações (1.1), (1.2) e (1.3).

- a) DIC: Intervalo de tempo que, no período de observação, cada unidade consumidora sofreu descontinuidade no atendimento de energia. Formalmente:

$$DIC = \sum_{i=1}^N t(i) \quad (1.1)$$

- b) FIC: Número de interrupções ocorridas, no período de observação em cada unidade consumidora. Formalmente:

$$FIC = n \quad (1.2)$$

- c) DMIC: Tempo máximo de interrupção contínua, do fornecimento de energia elétrica, para unidade consumidora qualquer. Formalmente:

$$DMIC = \max_{i=1, \dots, N} t(i) \quad (1.3)$$

Onde:

- N : Representa o número de interrupções da unidade consumidora considerada, no período da apuração;
 i : Representa o índice de interrupções da unidade consumidora no período de apuração, variando de 1 a N ;

$t(i)$: Representa o tempo de duração (i) da unidade consumidora considerada ou ponto de conexão, no período de apuração, expresso em horas e em centésimos de horas.

A Figura 1.1 mostra o histórico de continuidade do fornecimento de energia elétrica do Brasil, avaliando os indicadores DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão) e FEC (Frequência Equivalente de Interrupção Individual por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão). A composição desses indicadores é constituída pelos dados de 36 concessionárias de distribuição consideradas de grande porte, com mercado faturado anual de energia maior que 1 TWh (terawatt hora), e 26 concessionárias consideradas de menor porte, com o mercado faturado anual menor ou igual a 1 TWh (ANEEL, 2016).



Fonte: (ANEEL, 2016).

A agência divulgou que o consumidor ficou sem energia elétrica por 18,59 horas (ou 18 horas e 35 minutos) durante o ano de 2015, em 2014 foram 18,06 horas (18 horas e 4 minutos). Entretanto o FEC continua em queda e ficou em 9,86 vezes, contra as 10,09 vezes em 2014. É importante salientar que, a agência reguladora divulga o ranking nacional das concessionárias com a finalidade, também, de impulsioná-las para uma melhoria na qualidade do serviço proposto, de forma que, são estabelecidos limites decrescentes a cada ano fornecidas pela agência reguladora para os indicadores de continuidade individuais, para os períodos de apuração mensais, trimestrais e anuais, conforme observado na Figura 1.1. No ano de 2015, o limite para o DEC foi de 13,94 horas/ano e o FEC foi de 11,03 horas/ano (ANEEL, 2016).

Quando ocorre violação nos índices de continuidades do suprimento de energia individuais, a concessionária deve compensar financeiramente a unidade consumidora quando ocorre a violação nos índices de continuidades do suprimento de energia individual.

Apesar da redução dos indicadores no último ano avaliado, nota-se que, a duração da interrupção no fornecimento de energia ainda se encontra acima do limite previsto. Desta forma, é notável a necessidade de aprimorar os métodos de restauração de sistema de modo a garantir a continuidade do serviço à maior parcela que ficou sem atendimento, e consequentemente, isolar a menor área que ocorreu a falta.

1.2 RESTAURAÇÃO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

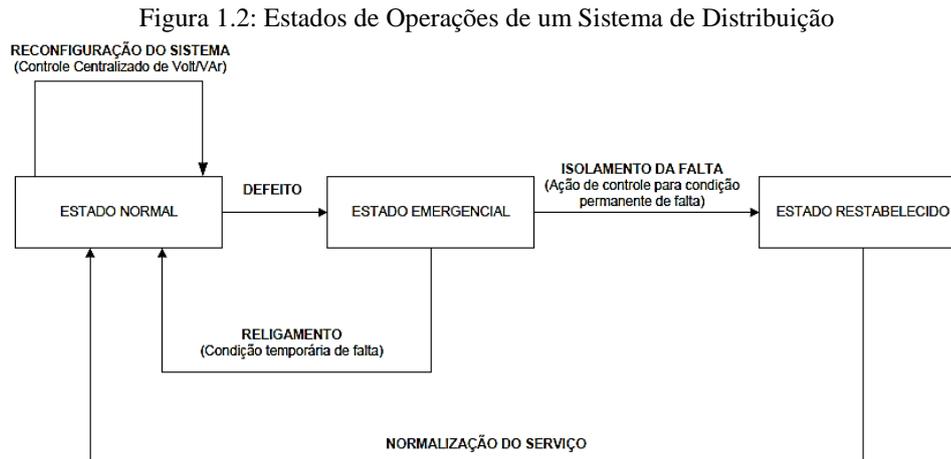
Em um sistema de distribuição de energia elétrica (SDEE), dois níveis de tensão fornecem alimentação para uma classe de consumidores distintos, podendo ser identificado como: primários (consumidores industriais e comerciais de médio porte alimentados pela rede de distribuição de média tensão) e secundários (pequenos comércios alimentados pelas redes de distribuição de baixa tensão). Estes sistemas são geralmente operados com a topologia radial, ou seja, sem formação de malhas ou *loops*. Com esta configuração, a coordenação do sistema de proteção é facilitada, contribuindo para a operação. Entretanto, uma rede radial é menos confiável quanto à continuidade do fornecimento de energia quando comparada com uma rede malhada. (BORGES, 2012).

A operação de um sistema de distribuição de energia elétrica deve satisfazer certas condições que são expressas sob a forma de dois conjuntos de restrições: carga e operação. O primeiro conjunto reflete que o sistema de distribuição deve satisfazer à demanda da carga, enquanto que o segundo enaltece a necessidade de se respeitar os limites operacionais do sistema. Desta forma, se ambas as restrições de carga e operação são satisfeitas, diz-se que o sistema está atuando no estado normal de operação (CARVALHO, 2015).

As redes aéreas com topologia radial possibilitam a transferência de blocos de carga entre circuitos para o atendimento da operação em situações de contingências ou para manutenção preventivo-corretiva.

A Figura 1.2 exemplifica alguns estados de transição inerentes à operação dos sistemas elétricos de distribuição do ponto de vista dos centros de controle (ARCANJO, 2014). Destacam-se:

- a) **Normal-Normal:** Situação quando o sistema se encontra em estado normal, ou seja, quando os limites emergenciais são satisfeitos. Entretanto, ocorre alguma violação no limite operativo ou simplesmente deseja-se aperfeiçoar o estado operativo da rede minimizando, por exemplo, as perdas. Pode-se adotar nesta situação um processo de reconfiguração.
- b) **Normal-Emergencial:** Este estado ocorre quando existe alguma falha na rede, como no caso de uma falta ou curto-circuito. Desta forma, para evitar correntes de falta com magnitude elevada, deve-se eliminar rapidamente a contingência.
- c) **Emergencial-Normal:** Caso em que a condição de falta é temporária. Os sistemas de distribuição atuais se dispõem de religadores automáticos para retornar o sistema de volta à normalidade.
- d) **Emergencial-Restabelecido-Normal:** Caso em que ocorre uma contingência permanente no sistema de distribuição, sendo necessário o restabelecimento do sistema operando resumidamente da seguinte forma:
 1. isolamento dos circuitos atingidos pela falta, através de abertura de disjuntores ou religadores;
 2. restauração da maior quantidade de consumidores sem atendimento, devido ao procedimento “1”, através de operações de fechamento de chaves de socorro (normalmente abertas “NA”) e abertura de chaves seccionadoras (normalmente fechadas “NF”), minimizando o custo da energia não suprida;
 3. reparo da contingência cujo tempo para tal procedimento irá depender de diversos fatores como: tipo da contingência, local da ocorrência e disponibilidade de equipe para o reparo;
 4. normalização do atendimento após a contingência ter sido reparada, respeitando o critério da radialidade e restrições operacionais do sistema.



Fonte: (ARCANJO, 2014).

Diversas técnicas foram desenvolvidas para sanar este problema como subsídio ao operador do sistema, visto que, a restauração é um procedimento complexo de decisão e controle e que deve ser resolvido o mais breve possível. As metodologias propostas na literatura buscam, acentadamente, a robustez do método e o melhor desenvolvimento computacional.

As técnicas podem estar baseadas em otimização clássica, que buscam a solução exata do problema, e em métodos heurísticos, que buscam soluções aproximadas e de relativa qualidade. A escolha de qual método aplicar na otimização do processo consiste de importantes fatores, tais como, o problema de explosão combinatorial, a impossibilidade da completa ou correta formulação matemática e algorítmica do problema, a capacidade computacional de processamento e memória, o tempo de processamento requerido, dentre outras (MONTICELLI, 1983; MATHIAS-NETO et al., 2000).

Quanto maior o número de barras do sistema elétrico, maior será o espaço de busca e mais difícil será obter a solução ótima. O problema da restauração possui natureza não linear, com variáveis contínuas e binárias. Portanto, originalmente é um problema de programação não linear inteira mista (PNLIM). Pode ter enfoque multiobjetivo, gerando grandes espaços de buscas e estando sujeito a muitas restrições fundamentais, o que torna difícil a sua implementação por otimização clássica (MONTICELLI, 1983; LIU, et al., 1988).

Algoritmos heurísticos são exploratórios e buscam soluções aproximadas, dispensando a representação formal do conhecimento sobre o problema que busca resolver. Uma tecnologia de inteligência artificial distribuída fornece uma estrutura de execução para coordenar o comportamento inteligente entre agentes autônomos. Um sistema multiagente pode ser pensado como um grupo de agentes que interagem trabalhando juntos para atingir um grupo de metas. O sistema mencionado é proposto neste trabalho. O algoritmo de otimização por colônia de formigas – *Ant Colony Optimization* (ACO) simula o comportamento natural do grupo bio-

lógico, tem as características da pesquisa heurística, que tem por objetivo encontrar boas soluções com *feedback* positivo e cálculo distribuído. Isto é o que faz com que seja aplicado com sucesso em diversos campos (LING. et al., 2005; CARVALHO, 2015).

Diversos métodos têm sido propostos para resolverem os problemas de restauração, de forma a proporcionar esforços computacionais cada vez menores. Alguns métodos podem ser citados, como por exemplo: colônia de formigas utilizando a variante hiper-cubo (WATANABE, 2005), *Simulated Annealing* (MATOS e MELO, 1999), busca de tabu (TOUNE, et al., 1998)(SILVA, et al., 2008), nuvem de partículas (LU, et al., 2006) e algoritmos genéticos (XIAOPING, C, et al., 2009)(FUKUYAMA; CHIANG, 1995).

Dentre esses métodos, o ACO vem se destacando devido à sua eficiência para resolução de problemas de otimização de natureza combinatória (DORIGO; STUTZLE, 2004). Nas últimas décadas, modificações e novas versões vêm sendo propostas no intuito de melhorar o desempenho dos Algoritmos de Formigas, tendo como principal desafio, a busca de uma melhor solução com esforço computacional aceitável.

1.3 MOTIVAÇÃO

Na década de 90, o Brasil sofreu uma reestruturação do setor elétrico criando a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o Operador Nacional do Sistema (ONS) e a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), já nos anos 2000, criou-se a Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Por meio desta iniciativa, intensificaram-se as buscas por melhorias na operação e planejamento do sistema através de investimentos em pesquisas e de uma regulamentação mais severa do setor. Diante disso, as concessionárias de energia buscaram operar o sistema de maneira mais eficiente, visando reduções de custos, que podem ser alcançadas por meio da diminuição das perdas técnicas e econômicas. Além disso, as concessionárias devem garantir que a qualidade da energia do serviço prestado esteja dentro dos limites estabelecidos pela ANEEL (ANEEL, 2014).

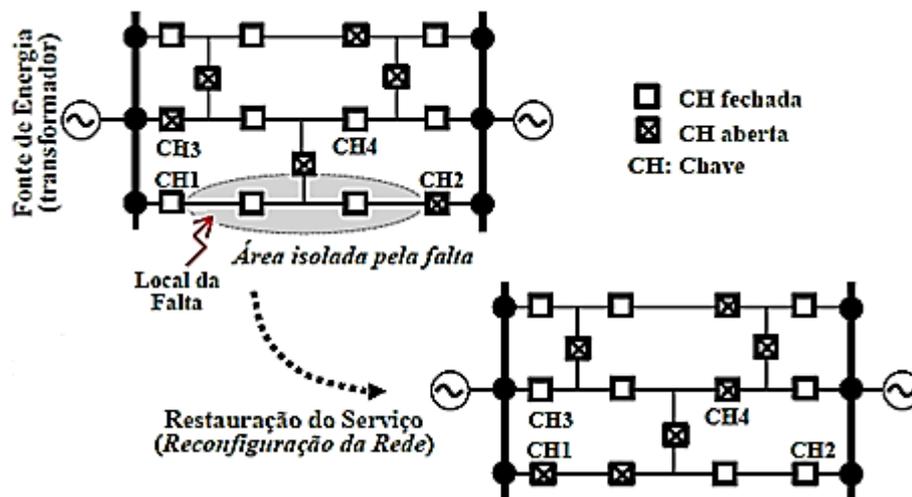
A qualidade e a confiabilidade dos serviços de fornecimento de energia elétrica são tratadas não apenas como um problema técnico e operacional, mas também, econômico e social, uma vez que a sociedade moderna está fundamentada e dependente destes serviços, no que diz respeito ao modo e ao padrão de vida dos indivíduos.

A restauração de redes de energia elétrica é um problema de controle *on-line*, cujo objetivo é viabilizar uma configuração factível após a ocorrência da interrupção no sistema elé-

trico. O plano de contingência deve ser elaborado e executado em prazos dependentes dos índices de continuidade (DEC, FEC, DIC, FIC) para impedir a ampliação de danos ou acidentes, ou até mesmo, evitar prejuízos financeiros. A Figura 1.3, ilustra um exemplo simples de operação de chaveamento, que restaura o serviço de fornecimento de energia elétrica na área que ficou desatendida decorrente da falta permanente no local indicado.

A metodologia empregada para a reconfiguração da rede é diferente nos dois contextos de planejamento de controle operacional: no planejamento de curto ou longo prazo e no planejamento em tempo real, mesmo compartilhando aspectos fundamentais. O problema da restauração do serviço está inserido em cenários operacionais geralmente mais críticos e possui características e objetivos particulares. Dentre as características, está a não integridade do sistema no estado operacional e restaurativo, e o caráter temporário, que, também é urgente do problema (MORELATO e MONTICELLI, 1989).

Figura 1.3: Exemplo simples da operação de chaveamento para restauração do serviço



Fonte: Adaptado de (WATANABE, 2005).

A nova configuração deve abranger a maior quantidade de consumidores e/ou cargas mais importantes, minimizando a quantidade de chaves manobradas, porque, quanto maior o número de manobras, maior o tempo de interrupção, além dos problemas transitórios causados pelo chaveamento. Este restabelecimento do sistema deve ser feito da melhor forma possível (WATANABE, 2005).

Em resumo, as meta-heurísticas possuem uma característica muito interessante: explora partes importantes do espaço de busca, encontrando boas soluções ou o ponto ótimo. O desenvolvimento do algoritmo exige do desenvolvedor (projetista) um elevado nível de conhecimento do problema. A codificação adotada, os parâmetros utilizados e os procedimentos de

melhoria local, devem ser baseados no conhecimento de domínio específico do problema a ser resolvido.

No próximo capítulo, vão ser mencionados alguns algoritmos que utilizaram a heurística colônia de formigas para solucionar o problema de restauração de redes de distribuição, aplicando as variantes *Ant System* (AS) e a *MAX-MIN Ant System* (MMAS). O algoritmo a ser implementado neste trabalho é o *Ant Colony System* (ACS), por possuir característica de busca interessante quando comparada a outros algoritmos da mesma heurística, e consequentemente, os algoritmos que utilizaram o ACO para a resolução do problema da restauração das redes elétricas de distribuição, que vale ressaltar, é o tema deste trabalho. Os detalhes do algoritmo estão explanados no Capítulo 4.

1.4 OBJETIVO

1.4.1 Geral

Este trabalho tem como objetivo contribuir para o problema da restauração em sistemas de distribuição de energia elétrica, utilizando método de otimização por colônia de formigas ACS, realizando uma avaliação quantitativa de sistemas radiais.

1.5 DIVULGAÇÃO DA PESQUISA

- SILVA, E.B.; CARVALHO, T.L.A.; FERREIRA, N.R. **Aplicação do Algoritmo Colônia de Formigas na Restauração de Redes Elétricas de Distribuição**. In: I Simpósio de Métodos Numéricos em Engenharia, Curitiba, PR, 2016.

1.6 ORGANIZAÇÃO

No Capítulo 2, encontram-se as principais metodologias que podem ser aplicadas na solução dos problemas de restauração, conceitos sobre heurísticas e metaheurísticas, e, uma revisão bibliográfica com os principais métodos para resolução do problema. O método ACO e alguns dos algoritmos mais conhecidos baseados em sua estrutura são apresentados no Capítulo 3. No Capítulo 4, é apresentado um método para cálculo de fluxo de potência em sistemas de distribuição. O Capítulo 5 apresenta a metodologia para resolução do problema da restauração via ACO, apresentando variações desse algoritmo. No Capítulo 6, é apresentada a

solução do problema de restauração de redes de distribuição de energia elétrica, utilizando algoritmo colônia de formigas e feitas aplicações a dois sistemas elétricos. Por fim, o Capítulo 7 traz as conclusões e propostas para futuros trabalhos. O Apêndice A apresenta os dados dos sistemas utilizados neste trabalho.

2 METODOLOGIA

2.1 INTRODUÇÃO

Os algoritmos de otimização podem ser classificados em dois grupos: métodos determinísticos e não determinísticos. Os métodos determinísticos são caracterizados por disporem de modelos matemáticos definidos para a identificação do problema a ser minimizado. Considerando a complexidade do problema a ser trabalhado, pode-se levar uma margem de tempo apreciável para obter a solução ótima. Esses métodos são baseados, em sua grande maioria, nos cálculos de derivadas de primeira e segunda ordem ou de uma aproximação dessas derivadas, possuindo como limitações (SU; LII, 2002):

- Dificuldade de trabalhar com variáveis discretas e de lidar com funções não diferenciáveis;
- Necessidade de que a função objetivo seja contínua, diferenciável e convexa no espaço de busca.

Já os métodos não determinísticos podem ter diversas soluções para certo dado de entrada. Este método busca solucionar o problema a ser minimizado através de fenômenos encontrados na natureza, a partir de um conjunto de regras e métodos que conduzem a uma resolução relativamente rápida, entretanto, não garantem que a resposta encontrada é o mínimo global da função. Os modelos não determinísticos utilizam a avaliação da função objetivo e introduzem no processo de solução de dados que tem origem em eventos aleatórios, além de não empregar o cálculo de derivadas, atuando diretamente na busca por soluções dentro do espaço viável (MEDEIROS; KRIPKA, 2012).

Na solução da restauração de redes de distribuição de energia elétrica, em decorrência da natureza combinatória desses problemas, a resolução por métodos clássicos de otimização torna-se pouco atraente (CARVALHO, 2015). Diante desse cenário, os métodos não determinísticos baseados em heurísticas são uma boa alternativa para solucionar esses problemas.

2.2 MÉTODOS HEURÍSTICOS

O termo “heurístico” está relacionado com a resolução de problemas reais dispondo somente dos conhecimentos disponíveis. Esse termo provém de uma palavra grega com um

significado próximo ao conceito de encontrar, sendo supostamente vinculada à expressão *eureka* de Arquimedes ao descobrir seu famoso princípio (MELIÁN, et al., 2003).

Um procedimento é classificado como heurístico quando se tem um alto grau de confiança, que se podem encontrar boas soluções para um problema de otimização a um custo computacional razoável, sendo, contudo, incapazes de garantir sua factibilidade ou a distância da solução até o ótimo (CARVALHO, 2015). Problemas de natureza combinatorial de grande porte são geralmente de difíceis soluções. Logo, os métodos heurísticos são utilizados, pois apresentam uma boa relação entre os resultados gerados e o tempo computacional necessário para gerar esses resultados.

2.3 METAHEURÍSTICAS

Por definição, as metaheurísticas são obtidas através do termo “heurístico” acrescidos de um prefixo “meta”, o qual caracteriza que se encontra em um nível superior (BLUM; ROLLI, 2003; MELIÁN et al., 2003). As metaheurísticas são destinadas como procedimentos a encontrarem uma boa solução, que por ventura, pode ser a ótima consistindo na aplicação, em cada passo, de uma heurística subordinada, a qual tem de ser modelada para cada problema (RIBEIRO, 2002). As metaheurísticas são estratégias inteligentes para projetar ou melhorar procedimentos heurísticos muito generalistas.

Devido ao fato das metaheurísticas serem mais genéricas, elas utilizam a busca por uma solução dentro de seu espaço de pesquisa e também ao redor de sua vizinha. É *mister* salientar que, devido ao conhecimento histórico dos resultados anteriormente adquiridos, as metaheurísticas podem usar estratégias para escapar de paradas prematuras dentro de ótimos locais, explorando assim partes importantes do espaço de busca (BIRATTARI, et al., 2001).

Em Melián, et al. (2003), as metaheurísticas foram classificadas em:

- Metaheurísticas de relaxação: são procedimentos de resolução de problemas que utilizam flexibilizações do modelo original (ou seja, modelos com modificações que tornam o problema mais fácil de resolver), cuja solução fornece a solução para o problema original;
- Metaheurísticas construtivas: baseia-se em procedimentos que tratam da obtenção de uma solução a partir da análise e seleção paulatina dos componentes que a formam;

- Metaheurísticas de busca: chama-se dessa forma qualquer método que percorra espaços de busca, compostos por soluções, levando em conta fundamentalmente, em cada passo, a vizinhança da solução obtida na iteração anterior;
- Metaheurísticas evolutivas: enfocam os métodos baseados em conjuntos de soluções que evoluem sobre o espaço de soluções;
- Metaheurísticas híbridas: são metaheurísticas intermediárias em relação aos quatro tipos anteriores ou combinação de métodos.

Apesar de aparentemente diferentes, as metaheurísticas compartilham de uma série de características comuns respeitantes, em especial dois elementos (DURVAL; BÉATRICE; JIN-KAO HAO, 2010):

- Codificação: as formas de representarem as soluções candidatas do espaço de busca;
- Avaliação da aptidão: a forma para se medir a qualidade das soluções candidatas.

A forma de exploração do espaço de busca por soluções permite dividir as metaheurísticas em, pelo menos, duas categorias: busca local e busca populacional (SUCUPIRA, 2007):

- A busca local é realizada por meio de deslocamentos aplicados sobre a solução atual, buscando uma solução de melhor qualidade em torno de sua vizinhança. Pode-se citar como exemplos de metaheurísticas de busca local: busca tabu, *simulated annealing*, método de pesquisa em vizinhança variável e busca reativa.
- As buscas populacionais reúnem um conjunto de soluções de boa qualidade e as combinam de diferentes maneiras. O objetivo é extrair bons atributos de cada solução e, com essas informações, buscar uma solução ainda melhor. Pode-se citar como exemplos de metaheurísticas de busca populacional: algoritmos genéticos, colônia de formigas, nuvem de partículas e algoritmos meméticos.

2.3.1 Inteligência coletiva

O termo inteligência coletiva é uma tradução livre para o termo em inglês “*Swarm Intelligence*” e nomeia uma subárea da Inteligência Artificial relacionada a projetos de sistemas multiagentes, inspirados no comportamento coletivo das colônias de insetos sociais e de outras sociedades animais.

A principal característica dos algoritmos baseados em inteligência coletiva é a utilização de agentes que cooperam através de comunicação indireta, executando movimentos no espaço de decisão. Estes agentes seguem algumas regras simples, que despertam o interesse de pesquisadores, que buscam entender o comportamento desses insetos sociais. Por meio de modelos abstratos que imitam esse tipo de comportamento, diversas aplicações baseadas em inteligência coletiva são introduzidas nas mais variadas áreas do conhecimento (SOUZA, 2013).

Nas colônias de formigas, as interações entre os agentes são feitas de maneira indireta, através de uma substância denominada feromônio. As abelhas se comunicam por meio de uma dança rítmica que indica para as abelhas ociosas, à distância e direção em que se encontram os alimentos. Quanto maior a duração e mais frequente é a dança, melhor é a fonte de alimento encontrada. Mesmo que as abelhas só vejam uma única dança antes de saírem em busca de alimento e, tendo em vista a inexistência de um mecanismo central que determine o controle da qualidade do alimento encontrado por todas elas, ainda assim, os agentes são capazes de perceber as diferenças no meio ambiente e otimizar a coleta de comida. (FRAGA, 2006).

Esse comportamento de esforço conjunto de vários subsistemas para realização de uma tarefa complexa pode ser chamado de sinergia. De forma genérica, a sinergia pode ser definida como o efeito resultante da ação de vários agentes que atuam em conjunto, onde o valor da ação coletiva resultante é mais significativo que a mera atuação individual de cada agente da colônia.

2.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Diversas pesquisas foram realizadas no século passado voltadas para o planejamento da geração e transmissão de energia devido a sua complexidade. Devido ao aumento constante do consumo de energia elétrica, o planejamento e a operação exigiram novas técnicas de análise para operar o sistema de forma adequada.

Os métodos de otimização são aplicados em larga escala e nas mais diversas áreas do setor. As perdas geram prejuízos às concessionárias de energia, e o estudo para a sua redução, sem dúvida, é amplamente explorado, apresentando benefícios técnicos e econômicos para o sistema elétrico. Contudo, problemas de otimização relacionados ao planejamento e operação do sistema de distribuição são complexos, normalmente são definidos dentro de domínios discretos para as variáveis de decisão. No entanto, para sistemas de distribuição reais, a natureza dimensional e/ou combinatória do problema de otimização torna impraticável o uso da busca exaustiva, pois o número de combinações seria excessivamente elevado para serem processados em razoável tempo de computação. Otimizações podem então ser resolvidas em termos de adoção de meta-heurísticas adequadas (CHICCO, 2011).

Diversas metas-heurísticas são propostas para a solução deste tipo de problema, apresentando princípios e estratégias distintas, dentre elas, algoritmo genético, busca de Tabu, recozimento simulado (*Simulated Annealing*), nuvem de partículas (*Particle Swarm*) e colônia de formigas.

Na literatura encontram-se diversos trabalhos que utilizam a metaheurística ACO com o propósito de resolver problemas de restauração em sistemas de distribuição de energia elétrica.

Em Luan, et al., (2002), é proposto um algoritmo genético utilizado para pesquisar uma estratégia de restauração de fornecimento em redes de distribuição. Um sistema de codificação é adotado para cada cromossomo e é feito uma lista dos índices das chaves. O estado de cada chave é decidido de acordo com a teoria dos grafos, sujeita a restrição de radialidade.

Já no trabalho proposto por Hsiao, et al., (2002), é realizado a implementação de um algoritmo baseado em lógica difusa (*fuzzy*), para solucionar o problema de restauração de redes de distribuição. A função objetivo é modelada com os conjuntos *fuzzy* para avaliar a sua aptidão.

O ACO é visto em Ling, et al., (2005), de forma a propor um modelo distribuído para a restauração do sistema de potência utilizando o ACO, de forma que, combina a versão AS do algoritmo de formigas com inúmeros agentes inteligentes de barra e um único agente inteligente de controle, empregando da interação entre eles para obter soluções ótimas locais, e, posteriormente, encontrar uma solução ótima global.

No modelo realizado por Watanabe (2005), o ACO é formulado com base em um quadro de Hiper Cubo (HC-ACO) que, realiza uma busca na sequência de comutação ideal e a solução fornece um serviço de restauração eficaz.

O ACO é melhorado em Yang, et al., (2009), utilizando-se da combinação do algoritmo com a árvore de abrangência estocástica. É implementado a versão MMAS do algoritmo ACO e é testado em três sistemas do IEEE.

Outro ACO é proposta em Karn, et al., (2011), utilizando a versão AS do algoritmo, onde são considerados separadamente dois tipos de interruptores, sendo controlados manual e automaticamente possuindo diferentes tempos de comutação.

Em Silva, et al., (2008), um algoritmo de busca de tabu reativa é implementado para elevar a confiabilidade do sistema de proteção, com o objetivo de facilitar a restauração em caso de contingência do sistema de energia.

Já em Shin, et al., (2004), é utilizado o algoritmo de busca de tabu combinado com algoritmo genético para encontrar uma solução global.

Outra metaheurística é exibida por Lu, et al., (2006), de forma que, um algoritmo de otimização em nuvem de partícula é proposto para a otimização do sistema de distribuição, mostrando que o método tem alta velocidade de cálculo e convergência e pode resolver o problema de restauração de energia de forma eficaz.

Um método que utiliza algoritmos genéticos de *simulated annealing* é proposta em Xiaoping, et al., (2009). A determinação dos pontos de restauração de carga é feita com base na reconfiguração da rede, na qual a frequência do sistema é calculada por análise de fluxo de energia prolongada e, as diversas restrições dos sistemas são tratadas por funções de penalidade.

3 OTIMIZAÇÃO POR COLÔNIAS DE FORMIGAS

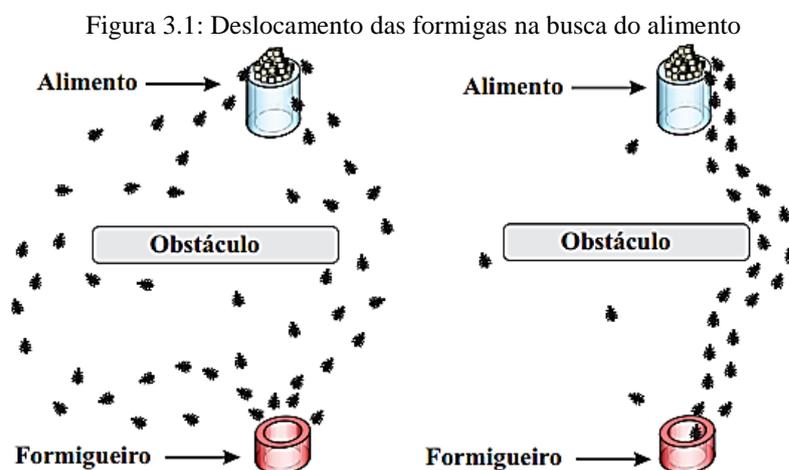
3.1 INTRODUÇÃO

Inteligência coletiva é uma abordagem recente quanto à resolução de problemas através de comportamentos sociais de animais. Em particular, diversos métodos e técnicas são inspirados no comportamento das formigas, denominada otimização por colônia de formigas (DORIGO, et al., 2006).

Na ciência temos diversos modelos matemáticos que, estão fortemente aplicados nas áreas como a física, a engenharia, dentre outros. Essas pesquisas tomaram uma importância significativa no meio científico, de tal forma que, existe uma área de conhecimento que é voltada ao estudo de métodos e técnicas bioinspiradas (BLUM e ROLI, 2003).

3.2 COMPORTAMENTO DAS FORMIGAS NA BUSCA POR FONTES DE ALIMENTOS

Os comportamentos coletivos agregados ao alto padrão de organização das formigas na natureza chamaram a atenção dos observadores. Isso porque, em seu habitat natural, as formigas sempre conseguem descobrir boas soluções para o menor caminho entre o formigueiro e uma fonte de alimento. As formigas ao andarem do formigueiro até o local da comida depositam no chão uma substância denominada feromônio. Outras formigas percebem a presença do feromônio e tendem a seguir caminhos onde a concentração de feromônio é mais elevada. Através deste mecanismo, as formigas são capazes de transportar os alimentos para o seu ninho de maneira extraordinariamente eficaz conforme mostra a Figura 3.1 (SOUZA, et al., 2010; SOUZA, et al., 2011).

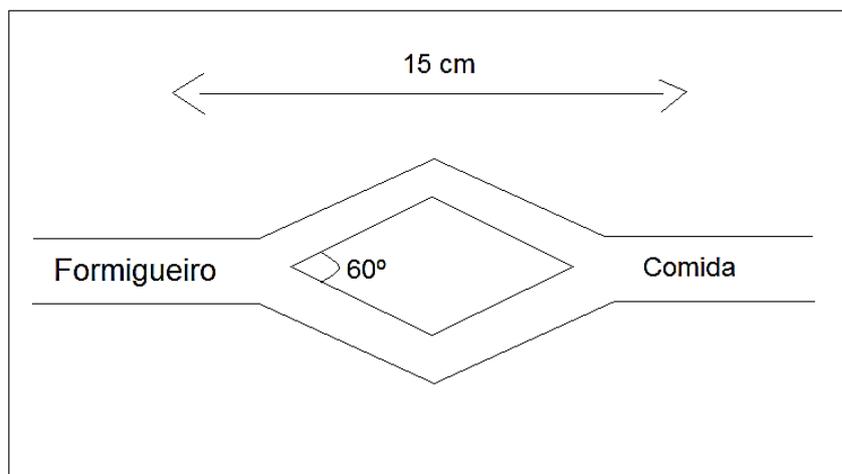


Fonte: (SANCA, 2013).

3.2.1 Experimento da ponte dupla

Em um estudo feito por Dorigo, et al., (2006), investigou-se o comportamento das formigas seguindo o feromônio. Em uma experiência denominada “experiência de dupla ponte”, de forma que o ninho de uma colônia de formigas argentinas foi ligado a uma fonte de alimento por duas pontes de comprimentos iguais, de acordo com a Figura 3.2. Inicialmente, as formigas tem movimento aleatório entre o formigueiro e a fonte de comida, visto que não há presença do feromônio nos caminhos, possuindo desta forma, a mesma probabilidade de serem escolhidos. Posteriormente com o deslocamento aleatório das formigas, um caminho será escolhido por um número maior de formigas, fazendo com que a quantidade de feromônio neste caminho seja maior, desta forma, com o passar do tempo toda a colônia converge para a mesma ponte.

Figura 3.2: Experimento ponte de comprimentos iguais.

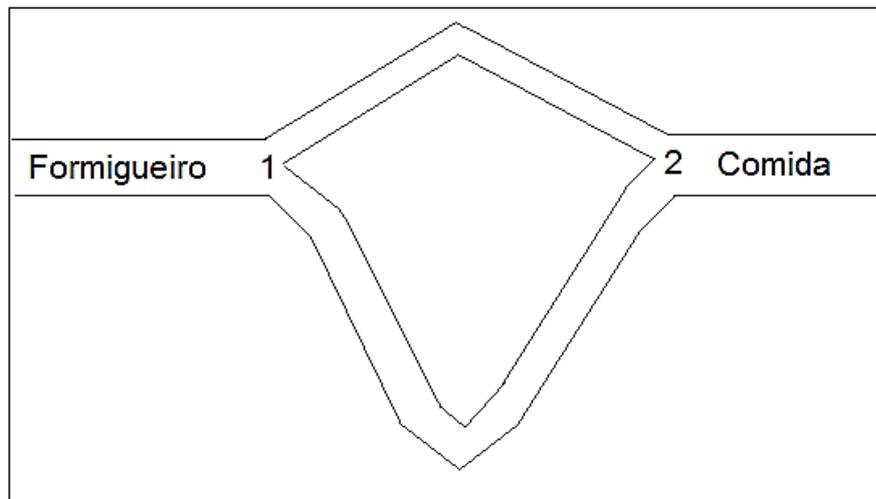


Fonte: Adaptado de (DORIGO, et al., 2006).

Em um segundo experimento, Dorigo, et al., (2006) considera uma variante da experiência de ponte dupla, de tal forma que, uma ponte oferece o caminho mais curto quando comparada à outra como pode ser visto na Figura 3.3. Nesta situação, as flutuações estocásticas na escolha inicial de uma ponte são muito reduzidas e um segundo mecanismo desempenha um papel importante: as formigas que por acaso escolheram a ponte curta, são as primeiras a chegar ao ninho. Portanto, a ponte curta recebe primeiramente uma maior quantidade de feromônio, estimulando mais formigas a seguirem pela mesma trilha.

Desta forma, quanto mais formigas seguem uma trilha, mais atrativa é a mesma. A probabilidade de um caminho ser escolhido aumenta com o número de formigas que, previamente, escolheram este mesmo caminho.

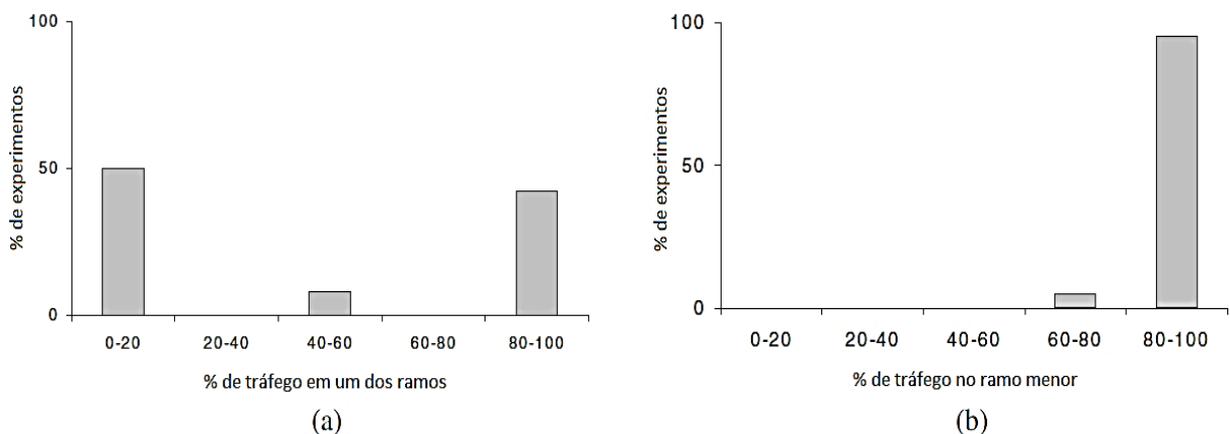
Figura 3.3: Experimento ponte de comprimentos diferentes.



Fonte: Adaptado de (DORIGO, et al., 2006).

O experimento de ponte dupla mostra claramente através da Figura 3.4, que as colônias têm incorporadas a capacidade de otimização, uma vez que, através do uso de regras probabilísticas com base em informações locais, elas podem encontrar o menor caminho entre dois pontos do ambiente. Vale ressaltar que, com o decorrer do tempo, o feromônio sofre o processo de evaporação, pois a substância é volátil e a concentração em caminhos menos visitados vai diminuindo, reduzindo também a influência desses caminhos nas decisões das formigas. Portanto, a partir da inspiração do experimento, é possível desenvolver formigas artificiais, tendo como modelo formigas reais, que conseguem encontrar o menor caminho entre a fonte de comida e o formigueiro, obtendo assim um processo de otimização eficiente (DORIGO, et al., 2006).

Figura 3.4: % do tráfego no ramo maior



Fonte: (DORIGO; STUTZLE, 2004).

3.3 COMPARAÇÃO ENTRE AS FORMIGAS REAIS E ARTIFICIAIS

As formigas “artificiais”, criadas para solucionar problemas de otimização via ACO, possuem muitas semelhanças e algumas diferenças com relação às formigas “reais” encontradas na natureza. Destacam-se como semelhanças (DORIGO et al., 1999; SANTOS NETO, 2014):

- A busca pelo caminho mais curto: as formigas reais ou artificiais buscam o caminho mais curto. As formigas reais escolhem o menor caminho entre o ninho e uma dada fonte de alimento, enquanto que as formigas artificiais, buscam menores caminhos a depender do problema a ser otimizado;
- Colônia de agentes cooperativos: tanto na natureza como no mundo virtual, as formigas agem de maneira cooperativa por meio da deposição e evaporação do feromônio, a qual se trata de uma substância química quando envolve formigas reais, já no caso das formigas artificiais, é utilizada como uma variável matemática que conectará o processo;
- Trilhas de feromônio: o feromônio depositado pelas formigas atua nas duas realidades, modificando o meio ambiente e, conseqüentemente, ratificando o aprendizado gerado pelas formigas;
- Inteligência coletiva: tanto na realidade como no ACO, a inteligência é obtida através da coletividade, visto que, o comportamento individual é insuficiente ou aleatório;
- Comportamento estocástico: a forma probabilística é característica das duas realidades.

Não obstante, existem algumas características que são próprias das formigas “artificiais”. Dorigo, et al. (1999) destacou:

- Natureza do movimento: as formigas artificiais se deslocam de maneira discreta, enquanto nas formigas reais os movimentos são contínuos;
- Feromônio: o depósito de feromônio no ACO ocorre baseado na qualidade da solução encontrada;

- Memória: as formigas reais não possuem uma estrutura de memória como no caso das virtuais, que as impeça de realizar movimentos.

3.4 ACO APLICADO AO PROBLEMA DO CAIXEIRO VIAJANTE

A primeira aplicação para um algoritmo baseado no comportamento das formigas foi o problema do caixeiro viajante ou *traveling salesman problem* (TSP). Existe um aspecto de fundamental importância no comportamento das colônias de formigas na busca por fontes de alimentos, que, após encontrar o menor caminho entre o ninho e a fonte de alimento, esta trilha é mantida pela colônia, desde que não haja nenhuma modificação no ambiente (BONABEAU, et al., 1999).

Este problema consiste em encontrar o menor caminho para percorrer um conjunto C de cidades que estão completamente conectadas entre si, isto é, para cada par de cidades, existe uma estrada que as liga, conforme a Figura 3.5, sendo a distância d entre elas conhecida. Dessa forma, o problema consiste em encontrar o menor caminho para percorrer todas as cidades uma única vez. O conjunto de todos os caminhos possíveis define o espaço de busca para este problema. Quando se trata de poucas cidades, 5 ou 6, é possível realizar o teste para todas as possibilidades com a finalidade de encontrar o menor caminho. Entretanto, o sistema se torna computacionalmente intratável para conjuntos maiores de cidades. Este fato despertou a necessidade de elaborar estratégias computacionalmente eficientes, mas que encontrassem soluções ótimas ou próximas delas, para este tipo de problema. Esta é a ideia principal por trás das metaheurísticas. São estratégias com a finalidade de explorar o espaço de busca de forma eficiente, encontrando soluções ótimas, ou próximas da melhor solução (SANCA, 2013).

Na solução desse problema, o ACO faz uma simulação com um número de agentes (formigas) se deslocando de uma cidade para outra através das rotas que as interligam. Para cada caminho que ligue duas cidades, é associada uma quantidade de feromônio virtual, que pode ser interpretado e modificado pelos agentes. O ACO é um algoritmo iterativo, e a cada iteração, um número N_a de agentes é considerado. Desse modo, cada agente constrói uma rota, deslocando-se pelas cidades, até que todas as cidades sejam visitadas. Esse processo é chamado de *ciclo*.

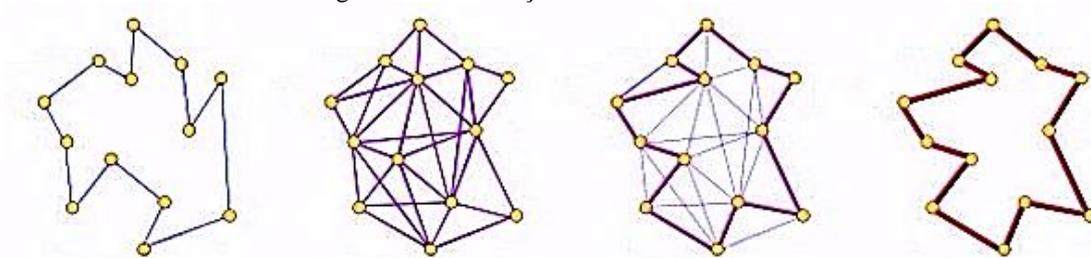
3.5 ALGORITMOS INSPIRADOS NO ACO

3.5.1 *Ant System* - AS

Para que seja possível um melhor entendimento sobre o método ACO, a seguir é apresentada a formulação do algoritmo AS. Esta metodologia foi aplicada para resolver o problema clássico do caixeiro viajante (TSP).

O TSP consiste em, por exemplo, dado um conjunto de cidades e dada também a distância entre elas, tem-se que determinar a menor rota para que contemple todas as cidades, passando uma única vez por cada cidade e retorne ao local de partida. A Figura 3.6 exemplifica a construção da rota.

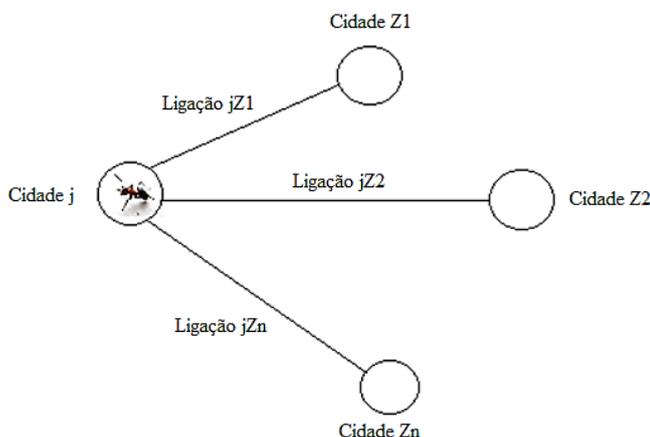
Figura 3.6: Construção da rota utilizando o AS



Fonte: Adaptado de (COLORNI, et al., 1996).

Durante a etapa de construção, a formiga deve escolher um caminho, dentre as possibilidades de trilhas, tendo como base o seu conhecimento individual (distâncias entre as cidades) e coletivo (quantidade de feromônio depositado nas ligações) conforme a Figura 3.7. A cada iteração o conhecimento coletivo é atualizado.

Figura 3.7: Escolha da rota



Fonte: Adaptado de (COLORNI, et al., 1996).

A escolha para a definição da ligação deve ser probabilística. Com isso, a probabilidade de um agente k , que se encontra em uma cidade j , possuindo Ψ (conjunto de cidades vizinhas de j que não foram visitadas pelo agente k), visitar uma cidade z utilizando uma determinada trilha é dada pela equação de transição:

$$P_{jz}^k = f(x) = \begin{cases} \tau_{jz}^\alpha \eta_{jz}^\beta / \sum_{l \in \Psi} \tau_{jl}^\alpha \eta_{jl}^\beta, & \text{se } z \in \Psi \\ 0, & \text{se } z \notin \Psi \end{cases}, \quad (3.1)$$

P_{jz}^k é a probabilidade do agente k visitar uma cidade z utilizando a trilha jz ; τ_{jz} é a quantidade de feromônio sobre a trilha jz ; η_{jz} é uma informação heurística dada pelo inverso da distância entre as cidades jz ; α e β são os pesos atribuídos ao feromônio e a informação heurística, respectivamente, e por fim, j compreende a cidade onde a formiga se encontra em um determinado instante (PEREIRA, 2010).

Nas fases iniciais da pesquisa, se forem definidos valores aleatórios para os feromônios, as formigas não terão orientação e iriam acabar tendo soluções iniciais com baixa qualidade, deste modo, a informação heurística tem como objetivo garantir que as formigas tenham uma boa solução desde a fase inicial. Ela pode existir ou não a depender do problema em questão (WATANABE, 2005).

A informação heurística pode ser dada por algumas formas, sendo bastante utilizado para a reconfiguração de redes elétricas como através da Equação (3.2) relacionada com a resistência elétrica do ramo, a Equação (3.3) com base no inverso da perda elétrica ativa no trecho em questão e a Equação (3.4), relacionada com a diferença entre as perdas em cada trecho.

$$\eta_x = \frac{1}{R_x} \quad (3.2)$$

$$\eta_x = \frac{1}{P_{Loss_{x(i,j)}}} \quad (3.3)$$

$$\eta_x = P_{Loss_{x(i,j)}(inicial)} - P_{Loss_{x(i,j)}(atual)} \quad (3.4)$$

Para este caso do caixeiro viajante este valor é representado por:

$$\eta_{(i,j)} = 1/d_{ij} \quad (3.5)$$

d_{ij} é a distância entre as cidades interligadas pela ligação jz .

A atualização tem como objetivo concentrar a pesquisa em regiões do espaço de busca com distâncias reduzidas. Devido a isto, após todas as formigas completarem o ciclo, as trilhas de feromônio são atualizadas pelo acréscimo e evaporação do feromônio, Equação (3.6), conhecida como regra de atualização global (DORIGO, et al., 2006). A evaporação é representada pelo coeficiente ρ , que pode estar entre zero e o valor unitário:

$$\tau(i,j) = (1 - \rho)\tau(i,j) + \Delta\tau(i,j) \quad (3.6)$$

$\Delta\tau(i,j)$, representa o depósito de feromônios de todas as formigas no caminho (i,j) , que se expressa da seguinte forma:

$$\Delta\tau(i,j) = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_k(i,j) \quad (3.7)$$

$$\Delta\tau_k(i,j) = \begin{cases} Q/L_k & \text{se } (i,j) \in \text{a rota da formiga } k; \\ 0 & \text{Caso contrário,} \end{cases} \quad (3.8)$$

Sendo, m a quantidade de formigas, Q a constante de peso para o depósito do feromônios, L_k o comprimento da rota k -ésima formiga.

A Equação (3.8) representa a quantidade de feromônios depositado nas trilhas pela formiga k . De tal modo que, a quantidade de feromônios depositado no menor caminho é proporcional à quantidade de formigas que passarem pela mesma, tornando esta rota mais atrativa.

3.5.2 MAX-MIN Ant System – MMAS

Na busca por alimento, as formigas inicialmente se movimentam sem direção preferencial. Mais tarde, as formigas que escolheram caminhos mais curtos entre o formigueiro e a fonte de alimento, completarão as expedições de forma mais rápida, isto faz com que haja reforço na trilha de feromônio. Portanto, as formigas tendem a escolher esta rota. Para evitar a

estagnação do algoritmo e as formigas ficarem presas a soluções locais, Stutzle e Hoos, (2000) apresentaram o algoritmo MMAS.

Neste algoritmo, a etapa de construção é praticamente idêntica a do AS, utilizando a mesma fórmula para calcular a probabilidade (3.1), o MMAS introduz quatro modificações no AS:

- i. Realiza o reforço do melhor caminho encontrado, somente da formiga k que possui a melhor solução;
- ii. Para evitar uma estagnação precoce do algoritmo causado por uma quantidade excessiva de feromônio nas trilhas de menor caminho, são definidos os limites mínimos e máximos para o depósito de feromônio $[\tau_{min}, \tau_{max}]$ nas trilhas;
- iii. A inicialização das trilhas do feromônio é realizada com um alto valor de feromônio, τ_{max} , que juntamente com um pequeno coeficiente de evaporação, favorece a exploração de novos caminhos já no início do processo iterativo;
- iv. As trilhas do feromônio são reinicializadas assim que ocorrer a estagnação em uma solução.

De acordo com Stutzle e Hoos, (2000), a utilização da melhor solução de uma iteração, aumenta o efeito de exploração das melhores soluções durante o processo de busca (STUTZLE e HOOS, 1997; STUTZLE e HOOS, 2000). Ao mesmo tempo, contribui para o efeito de intensificação do processo, utilizando sempre as melhores soluções em cada iteração para a atualização do feromônios.

No MMAS, existem limites superiores e inferiores para o nível de feromônio. Ao realizar uma atualização do feromônio (aumento e evaporação) num ramo, o seu valor não pode ultrapassar τ_{max} , nem ser inferior a τ_{min} .

Após cada iteração, se $\tau_{i,j} > \tau_{max}$, então $\tau_{i,j} = \tau_{max}$, se $\tau_{i,j} < \tau_{min}$, então $\tau_{i,j} = \tau_{min}$, além disso, $\tau_{min} > 0$, se $\eta_{i,j} < \infty$ para todas as componentes da solução. Pode-se dizer que, a proposta de impor limites à quantidade de feromônio, tem um efeito de intensificação no processo de busca da melhor solução (para encontrar um maior número de possibilidades).

Após todas as formigas terem construído suas turnês, a atualização do feromônio é implementada conforme a Equação (3.9):

$$\tau_{ij} \leftarrow [(1 - \rho)\tau_{ij} + \Delta\tau_{ij}^{best}]_{\tau_{min}}^{\tau_{max}} \quad (3.9)$$

A dificuldade é determinar quais são os valores aproximados para τ_{min} e τ_{max} , sendo que τ_{max} é determinado pela Equação (3.10) (STUTZLE e HOOS, 2000):

$$\tau_{max} = 1/\rho \cdot F_{melhor}^* \quad (3.10)$$

Sendo F_{melhor}^* o valor da melhor solução encontrada da função objetivo até o momento (melhor solução global) ou a melhor solução da iteração. Stutzle e Hoos (2000) também propõem inicializar o algoritmo fazendo $\tau_0 = \tau_{max}$, para obter uma intensa exploração das soluções no espaço de busca.

Quanto ao valor de τ_{min} , não há um completo acordo sobre como pode ser determinado. Dorigo, et al. (1996), diz que o valor de τ_{min} é determinado empiricamente, porém existe uma proposta analítica para determinar este valor, Equação (3.11):

$$\tau_{min} = \tau_{max} \cdot (1 - P_{dec})/k \cdot P_{dec} \quad (3.11)$$

k é a quantidade média de barras adjacentes que a formiga pode escolher em qualquer ponto de decisão, e P_{dec} é determinado pela Equação (3.12):

$$P_{dec} = \sqrt[n-1]{P_{melhor}} \quad (3.12)$$

P_{melhor} é a probabilidade de uma formiga construir o melhor caminho até agora, e n é o número de passos no caminho (número de barras).

3.5.3 *Ant Colony System* – ACS

O ACS segundo Dorigo e Gambardella, (1997a,b), diferencia-se do AS em dois pontos principais. Primeiramente, o feromônio é atualizado apenas para as trilhas (arcos) pertencentes à melhor rota. Em segundo lugar, cada vez que uma formiga se desloca de uma cidade i para uma cidade j , ela remove certa quantidade de feromônio do arco, com o objetivo de aumentar a exploração de caminhos alternativos (DORIGO; STUTZLE, 2004).

O ACS funciona da seguinte forma: as formigas são inicialmente posicionadas em algum local de acordo com uma regra de inicialização (por exemplo, aleatoriamente). Posteriormente, cada formiga segue um caminho aplicando uma regra de transição de estados. Du-

rante a construção do caminho de cada formiga, ela modifica também a quantidade de feromônio nas bordas visitadas através de uma regra de atualização local. Uma vez que todas as formigas tenham concluído o seu caminho, a quantidade de feromônio das bordas é atualizada novamente aplicando a regra de atualização global.

A probabilidade da formiga k se mover da cidade i para j é dada pela equação:

$$P_k = \begin{cases} \operatorname{argmax}_{j \in J_{k(i)}} \{[\tau(i, j)]^\alpha \cdot [\eta(i, j)]^\beta\}, & \text{se } q \leq q_0 \\ J, & \text{se caso contrário} \end{cases} \quad (3.13)$$

q é um número aleatório dentro do intervalo $[0,1]$, q_0 é o parâmetro com valor: $0 \leq q_0 \leq 1$; Com valores de q_0 mais próximos de 1, tem-se uma priorização da intensificação, enquanto que, com valores de q_0 mais próximos de 0, prioriza-se a diversificação, por conta da regra de decisão do AS ser utilizada com maior frequência. J_k é um conjunto das cidades ainda não visitadas pela formiga k e J representa a regra de probabilidade conforme Equação 3.1 com $\alpha = 1$.

Ajustando o valor de q_0 permite a modulação do grau de exploração e a escolha de se concentrar a busca em torno da melhor solução encontrada até o momento ou explorar outros caminhos.

A atualização global do feromônio é ligeiramente similar à do MMAS, onde apenas o feromônio das melhores turnês é atualizado:

$$\tau_{ij} \leftarrow \begin{cases} (1 - \rho)\tau_{ij} + \rho\Delta\tau_{ij}, & \text{se } (i, j) \text{ pertence a melhor rota;} \\ \tau_{ij}, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (3.14)$$

com $\Delta\tau_{ij} = 1/L_{best}$, onde L_{best} é o comprimento da melhor rota, que pode ser a melhor rota encontrada na iteração corrente ou a menor rota encontrada desde o início do algoritmo.

A maior contribuição do ACS, com toda certeza é a introdução da Regra de Atualização Local de Feromônio. A atualização local é realizada por todas as formigas, após cada passo na construção de uma solução. Assim que a formiga se desloca, a quantidade de feromônio no caminho deslocado é atualizado por:

$$\tau_{ij} \leftarrow (1 - \varphi)\tau_{ij} + \varphi\tau_0 \quad (3.15)$$

$\varphi \in (0,1]$ é o coeficiente de decaimento de feromônio e τ_0 a quantidade inicial de feromônio.

O objetivo da Regra de Atualização Local é retirar certa quantidade de feromônio no arco (i,j) , com o propósito de reduzir a probabilidade da próxima formiga visitar este mesmo caminho. Dessa forma, as formigas tendem a ampliar o espaço de busca com a finalidade de encontrar novas soluções. Na prática, o seu efeito é fazer com que o algoritmo não se prenda a ótimos locais.

Cabe ressaltar que, nos algoritmos das outras variantes do ACO, não faz diferença a quantidade de formigas trabalhando sequencialmente ou paralelamente. Entretanto, no ACS esse contexto é diferente em virtude da atualização local de feromônio.

4 FLUXO DE POTÊNCIA

4.1 INTRODUÇÃO

Grande parte dos estudos nas áreas de planejamento e operação de sistemas elétricos de potência utiliza o cálculo de fluxo de potência, para que se consiga de forma geral, obter o controle sobre a potência ativa e reativa do sistema, de modo que a demanda seja satisfeita e realize uma análise estática da estabilidade da tensão, que vem se tornando um ponto crítico para a operação dos sistemas de potência (LEITE; COSTA, et al., 2003).

Diversos métodos de fluxo de potência são encontrados na literatura. Para os sistemas de transmissão, os mais utilizados são os métodos de Newton-Raphson e suas variações. Porém, em se tratando de fluxo de carga para os sistemas de distribuição, que vale ressaltar é o foco dessa dissertação, o panorama é outro.

Os métodos de fluxo de carga para redes de transmissão, quando aplicados a redes de distribuição podem apresentar problemas de convergência. Estes problemas se devem a configuração distinta entre as redes. A rede de distribuição frequentemente possui estrutura radial, ou seja, ao contrário das redes de transmissão, elas não formam malhas, e possuem também características elétricas distintas das redes de transmissão, como por exemplo, uma elevada relação de resistência/reatância (HAFFNER, et al., 2009; GUIMARÃES, 2005; PEREIRA, 2010).

Existem na literatura diversos métodos propostos de algoritmos eficientes para problemas de fluxo de carga em redes de distribuição radiais. Duas linhas básicas para resolver este tipo de problema é o método de Newton Raphson desacoplado rápido com rotação de eixos e os métodos baseados em varredura direta e inversa (*Backward-Forward-Sweep*).

4.2 MODELO DAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO

Para realizar a formulação do modelo matemático dos sistemas de distribuição de energia elétrica, é considerado um sistema radial trifásico balanceado. É possível representar este modelo através de um equivalente monofásico.

Em redes de distribuição de energia em média tensão, em função da sua natureza diversa (configuração radial e relações R/X mais elevadas), para o modelo simplificado, as ca-

pacitâncias em derivação podem ser desprezadas em níveis típicos de tensões (HAFFNER, et al., 2008).

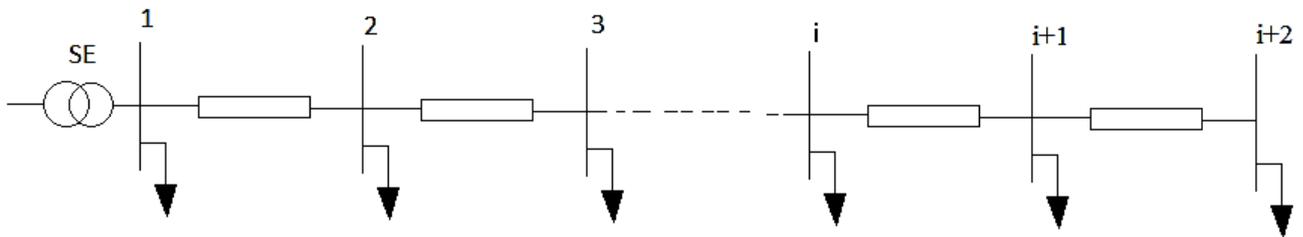
4.3 MÉTODO DA SOMA DE POTÊNCIAS – MSP

Dentre os métodos mais eficientes para cálculo do fluxo de potência, em redes de distribuição, o Método da Soma de Potência proposto por Cespedes (1990) utiliza um processo iterativo nas variáveis perdas de potência ativa e reativa do tipo *Backward-Forward-Sweep*, tendo os seguintes objetivos básicos:

- O módulo da tensão de cada barra deve ser a variável de maior interesse, prevalecendo sobre a sua fase. Isso, porque em sistemas de distribuição a diferença entre as fases das tensões de barra é pequena não excedendo alguns graus;
- O método deve permitir a definição do módulo de tensão em qualquer barra do sistema, para que as outras barras possam ser calculadas a partir desta;
- As cargas nas barras podem ser representadas como funções dos respectivos módulos das tensões nas barras;
- O método deve ser aplicado para fluxos radiais monofásicos e trifásicos;
- O algoritmo deve ter seu tempo de processamento e convergência compatíveis com outros métodos usualmente utilizados para a solução do problema de fluxo de potência.

Em uma rede com topologia radial, como pode ser visto da Figura 4.1, o MSP supõe que, inicialmente, as perdas em todos os trechos são nulas, e a cada iteração as estimativas dessas perdas melhoram. Quando a tensão da subestação é fornecida e as perdas são consideradas nulas, podem-se calcular as tensões das barras conectadas diretamente à subestação (SE). Esse processo permanece até que todas as tensões das barras sejam calculadas. Após concluir a primeira parte (*forward*), obtêm-se valores aproximados de todas as tensões das barras. Estes valores são ditos aproximados devido às perdas iniciais serem consideradas nulas. Conhecidos os valores de tensão, é possível calcular uma estimativa para as perdas em todos os trechos e, em seguida, corrigir os fluxos no processo (*backward*). O processo completo (*forward – backward*) permanece até que a variação, nas perdas totais, seja menor que uma tolerância pré-estabelecida, ou quando o limite de iterações for excedido.

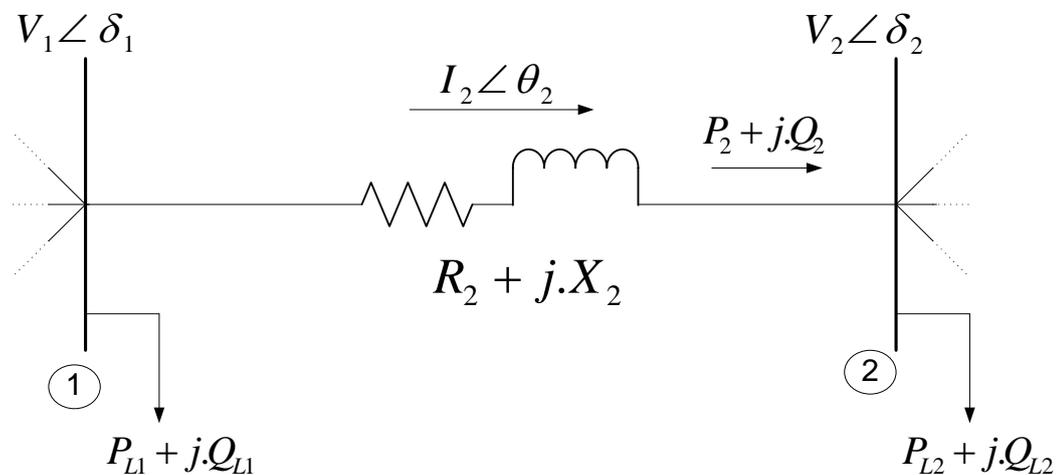
Figura 4.1: Rede de distribuição radial



A solução do problema do fluxo de carga em um sistema radial utilizando o método da soma de potências consiste em resolver para cada trecho do alimentador, uma equação biquadrada em termos da tensão nodal. O processo para o cálculo da potência consiste basicamente em somar os valores das potências que faz menção às cargas e as perdas relativas aos trechos que estão após o trecho de estudo, incluindo a própria carga (SANCA, 2013).

Para a modelagem da rede de distribuição, o sistema é dividido em diversos ramos, os quais são limitados por barras ou nós. Cada nó representa um ponto onde está instalado um transformador de distribuição. Na Figura 4.2 é apresentada a representação de circuitos elétricos de um trecho do sistema.

Figura 4.2: Um trecho de um sistema de distribuição.



Fonte: (SANCA, 2013).

Onde $V_1 \angle \delta_1$ e $V_2 \angle \delta_2$ são as tensões de cada barra; $I_2 \angle \theta_2$ é a corrente que atravessa o trecho 2; R_2 e jX_2 representam, respectivamente, a resistência e reatância série do trecho 2; enquanto que a carga, tipo potência constante, existente em cada barra, é representada por suas parcelas ativa e reativa ($P_{L1} + jQ_{L1}$, $P_{L2} + jQ_{L2}$). O fluxo de potência num trecho ($P_2 + jQ_2$) é definido como aquele que flui no final do mesmo, antes de seu nó terminal, desconsiderando as perdas do trecho (ΔP_2 e ΔQ_2). Esse fluxo é o que chega ao final do trecho, já descontadas as perdas do fluxo de potência no início do trecho.

4.3.1 Formulação matemática do problema

Na análise da Figura 4.2 pode-se extrair as seguintes equações (4.1) e (4.2).

$$I_2 = \frac{V_1 \angle \delta_1 - V_2 \angle \delta_2}{R_2 + jX_2} \quad (4.1)$$

$$S_2 = V_2 I_2^* \Rightarrow S_2^* = V_2^* I_2 \Rightarrow P_2 - jQ_2 = V_2^* I_2 \quad (4.2)$$

Igualando I_2 nas equações (4.1) e (4.2), obtém-se o seguinte desenvolvimento:

$$\frac{P_2 - jQ_2}{V_2^*} = \frac{V_1 \angle \delta_1 - V_2 \angle \delta_2}{R_2 + jX_2}$$

$$V_1 V_2 \angle (\delta_1 - \delta_2) - V_2^2 = (R_2 + jX_2)(P_2 - jQ_2)$$

$$V_1 V_2 [\cos(\delta_1 - \delta_2) + j \operatorname{sen}(\delta_1 - \delta_2)] = V_2^2 + R_2 P_2 + X_2 Q_2 + j(X_2 P_2 - R_2 Q_2)$$

Separando a parte real da imaginária tem-se:

$$V_1 V_2 \cos(\delta_1 - \delta_2) = V_2^2 + R_2 P_2 + X_2 Q_2 \quad (4.3a)$$

$$V_1 V_2 \operatorname{sen}(\delta_1 - \delta_2) = X_2 P_2 - R_2 Q_2 \quad (4.3b)$$

Elevando-se ao quadrado e somando-se as equações (4.3a) e (4.3b), obtém-se:

$$V_1^2 V_2^2 = (V_2^2 + R_2 P_2 + X_2 Q_2)^2 + (X_2 P_2 - R_2 Q_2)^2$$

$$V_1^2 V_2^2 = V_2^4 + 2V_2^2(R_2 P_2 + X_2 Q_2) + (R_2 P_2 + X_2 Q_2)^2 + (X_2 P_2 - R_2 Q_2)^2$$

$$\begin{aligned} V_2^4 + 2V_2^2 \left[(R_2 P_2 + X_2 Q_2) - \frac{1}{2} V_2^2 \right] + (R_2^2 P_2^2 + 2R_2 P_2 X_2 Q_2 + X_2^2 Q_2^2) \\ + (X_2^2 P_2^2 - 2X_2 P_2 R_2 Q_2 + R_2^2 Q_2^2) = 0 \end{aligned}$$

$$V_2^4 - 2 \left[\frac{1}{2} V_2^2 - (R_2 P_2 + X_2 Q_2) \right] V_2^2 + (R_2^2 + X_2^2)(P_2^2 + Q_2^2) = 0 \quad (4.4)$$

A Equação (4.4) pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$V_2^4 - 2AV_2^2 + B = 0 \quad (4.5)$$

onde:

$$A = \frac{1}{2} V_2^2 - (R_2 P_2 + X_2 Q_2) \quad (4.6)$$

$$B = (R_2^2 + X_2^2)(P_2^2 + Q_2^2) \quad (4.7)$$

Em sistemas de distribuição, as fases das tensões não são de grande importância, pois a diferença de fase entre a barra da subestação e a última barra do alimentador geralmente é de apenas alguns graus (CESPEDES, 1990; SANCA, 2013; CARVALHO, 2015). É importante observar que, a Equação (4.5) é uma equação biquadrada e possui quatro raízes. Logo, das duas soluções para V_2^2 , apenas a solução que considera o sinal positivo da raiz quadrada da solução fornece um valor de tensão possível de se calcular, o mesmo se aplica à raiz quadrada da solução para V_2 (CESPEDES, 1990).

Resolvendo a Equação (4.5) encontra-se:

$$V_2 = \sqrt{A + \sqrt{A^2 - B}} \quad (4.8)$$

Sendo que A e B estão indicados nas equações (4.6) e (4.7) respectivamente.

Essa formulação pode ser estendida para um trecho genérico. Dessa maneira, as equações (4.6), (4.7) e (4.8) podem ser reescritas para um determinado trecho i do alimentador, respectivamente:

$$V_i = \sqrt{A + \sqrt{A^2 - B}} \quad (4.9)$$

$$A = \frac{1}{2} V_{i-1}^2 - (R_i P_i + X_i Q_i) \quad (4.10)$$

$$B = (R_i^2 + X_i^2)(P_i^2 + Q_i^2) \quad (4.11)$$

Tendo calculado as tensões em todos os nós do sistema, é possível calcular as perdas ativa e reativa em cada trecho:

$$\Delta P_i = R_i I_i^2 \Rightarrow \Delta P_i = R_i \left[\frac{S_i}{V_i} \right]^2 \Rightarrow \Delta P_i = R_i \left[\frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \right]$$

$$\Delta Q_i = X_i I_i^2 \Rightarrow \Delta Q_i = X_i \left[\frac{S_i}{V_i} \right]^2 \Rightarrow \Delta Q_i = X_i \left[\frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \right]$$

Desse modo, as perdas de potência ativa e reativa em um trecho genérico i são fornecidas pelas seguintes equações:

$$\Delta P_i = R_i \left[\frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \right] \quad (4.12)$$

$$\Delta Q_i = X_i \left[\frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \right] \quad (4.13)$$

Através da figura (4.1) é possível determinar os fluxos de potência ativa e reativa utilizando-se as expressões:

$$P_i = P_{Li} + \sum_{k \in \Psi} (P_k + \Delta P_k) \quad (4.14)$$

$$Q_i = Q_{Li} + \sum_{k \in \Psi} (Q_k + \Delta Q_k) \quad (4.15)$$

em que P_{Li} e Q_{Li} são as potências da carga instalada no trecho i ; P_i e Q_i são os fluxos de potência ativa e reativa do trecho i ; e ΔP_k e ΔQ_k são as perdas ativa e reativa no trecho k ; Ψ é o conjunto de todos os trechos que derivam do trecho i . Quando a diferença entre duas perdas consecutivas for menor que uma tolerância pré-estabelecida, o algoritmo chegará ao fim.

Retomando a Equação (4.3b), é possível desenvolver uma expressão para o cálculo das fases das tensões nas barras.

$$\begin{aligned} V_1 V_2 \text{sen}(\delta_1 - \delta_2) &= X_2 P_2 - R_2 Q_2 \\ \text{sen}(\delta_1 - \delta_2) &= \frac{X_2 P_2 - R_2 Q_2}{V_1 V_2} \end{aligned}$$

$$\delta_2 = \delta_1 - \arcsen \left(\frac{X_2 P_2 - R_2 Q_2}{V_1 V_2} \right)$$

De forma genérica:

$$\delta_i = \delta_{i-1} - \arcsen \left(\frac{X_i P_i - R_i Q_i}{V_{i-1} V_i} \right) \quad (4.16)$$

A fase na subestação é considerada nula e este é o ponto de partida para o cálculo das demais fases das tensões nas barras. No próximo capítulo o MSP é aplicado em conjunto com o ACO para a resolução do problema de Restauração de Redes Elétricas de Distribuição.

5 ACO PARA A RESTAURAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO

5.1 INTRODUÇÃO

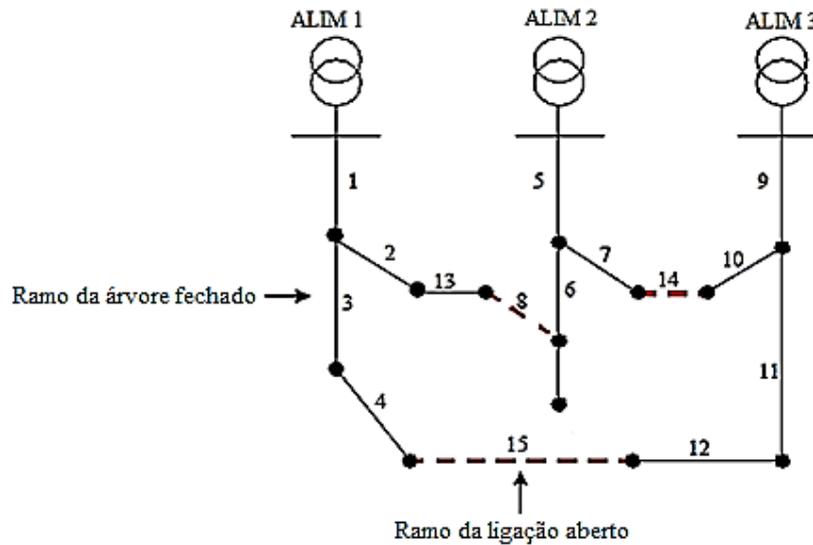
Interrupções no sistema de energia podem ocasionar um efeito muito grave, tanto no que se diz respeito aos aspectos técnicos quanto aos econômicos. Desta forma, é de grande importância à otimização em restaurar sistemas de energia de forma rápida e com segurança após as interrupções (LING, et al., 2005).

Os sistemas de Distribuição geralmente são operados em topologia radial, entretanto sua estrutura permite diversas configurações operacionais através do estado do interruptor do circuito (WATANABE, 2005). Na ocorrência de uma falta, algumas chaves seccionadoras do alimentador, normalmente fechadas, são abertas para isolar os trechos afetados. No entanto é uma combinação complexa e de grande escala, sendo um problema de otimização não linear (YANG, et al., 2009).

A topologia radial da rede elétrica de distribuição é equivalente a uma topologia em árvore, da teoria dos grafos. Desta forma, na operação radial, os circuitos que estão energizados correspondem aos ramos da árvore (representando chaves seccionadoras normalmente fechadas) e aqueles que estão desenergizados correspondem aos ramos de ligação (representando chaves de interconexão normalmente abertas), como mostra a Figura 5.1.

Duas condições básicas definem a radialidade do sistema: não é possível assumir estruturas malhadas, porque é acíclica; e com a ocorrência de uma interrupção em certo ponto, a rede deixaria de ser conexa a jusante do defeito, com a desenergização do ramo da árvore. Diante disso, uma parcela receberia energia e outra não (AMASIFEN, et al., 2005; PEREIRA JUNIOR, et al., 2012).

Figura 5.1: Diagrama unifilar de um sistema de distribuição radial simples



Fonte: Adaptado de (Amasifen, et al., 2005).

Para recuperar a conectividade do sistema, isola-se o defeito e são trocados os ramos da árvore por ramos de ligação que, necessariamente, possam ser alimentados por um nó raiz (tradicionalmente uma subestação). Desta forma, é possível alterar a configuração da rede mantendo a radialidade do sistema, mas não é possível garantir o restabelecimento de toda conectividade do sistema devido às restrições físicas e operacionais da rede (AMASIFEN, et al., 2005; PEREIRA JUNIOR, et al., 2012).

Diversos métodos foram formulados para sanar o problema de restauração de serviços de rede de distribuição. O método tradicional de otimização matemática pode alcançar a solução ótima global independente da estrutura da rede inicial, porém existem muitos problemas relacionados com o mesmo. (YANG, et al., 2009).

Nos últimos anos, algumas abordagens meta-heurística têm sido utilizadas para a restauração do serviço nos sistemas de distribuição, no entanto, durante o processo de restauração do serviço, encontrar uma nova configuração da rede de forma que minimize as perdas não é o único problema. É importante encontrar uma configuração com o número de manobras reduzido e preferencialmente, o sistema final com menor quantidade de perdas de potência ativa.

5.1.1 Teoria dos Grafos aplicada à Análise de Redes Elétricas

Para realizar a recomposição do sistema de distribuição, é necessário conhecer muito bem a topologia da rede. A primeira coisa que deve ser feita no problema em questão, é pri-

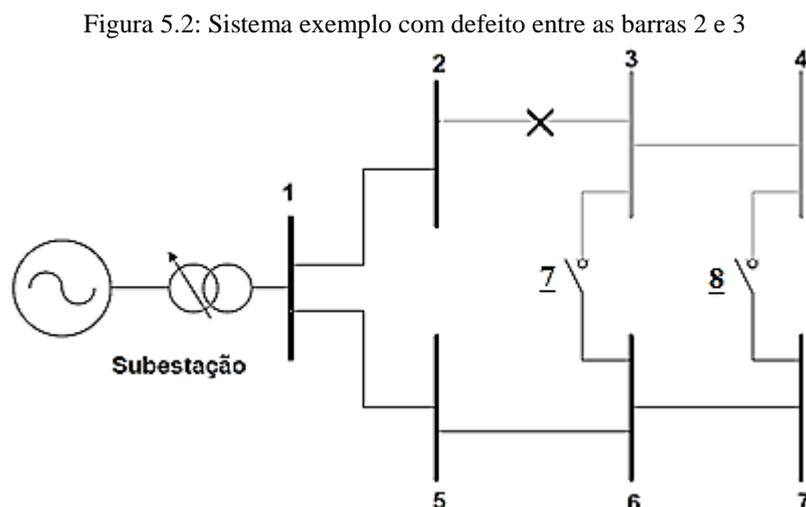
meiramente, isolar o local da falta e verificar quais as barras ficaram sem atendimento na situação pós-falha. Durante o processo de restauração, também é importante verificar se, no fechamento de uma chave, há a formação de laços, o que por sua vez, viola a restrição de radialidade do sistema.

Estes problemas podem ser solucionados utilizando a teoria dos grafos. Esta resolução é efetuada em diversos problemas na engenharia, principalmente, o que diz respeito a redes elétricas (BALABANIAN; BICKART; SESHU, 1969). Devido à dimensão das aplicações, vamos abordar algumas formulações que foram importantes para a resolução deste trabalho.

5.1.2 Identificação de Barras Ilhadas no Sistema

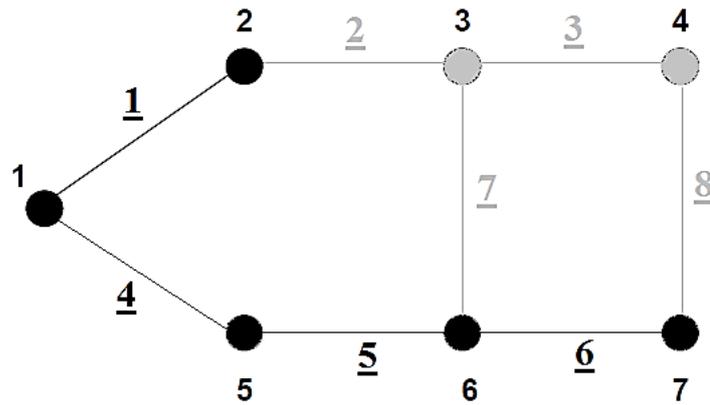
No problema de restauração dos sistemas elétricos de distribuição, devem-se conhecer as barras que ficaram sem atendimento após a ocorrência de uma falha em um dos circuitos. Para tanto, deve-se montar a árvore do sistema tendo como nó raiz a subestação, enquanto que, as barras terminais que não pertencem à raiz, vão ser as barras que ficaram sem atendimento, ou barras ilhadas do sistema.

A Figura 5.2 considera um sistema proposto em que se teve uma falta entre as barras 2 e 3. Dessa forma, as barras 3 e 4 ficaram desenergizadas.



A Figura 5.3 apresenta a árvore do sistema indicado na Figura 5.2. Note que, as barras 3 e 4 não fazem parte da árvore, correspondendo aos nós ilhados do grafo.

Figura 5.3: Árvore do sistema exemplo contendo falha entre as barras 2 e 3



Portanto, para determinar as barras isoladas em um sistema de distribuição, basta implementar uma busca em árvore, partindo do nó raiz até os nós terminais. Os nós do grafo que não pertencerem à raiz vão ser as barras ilhadas do sistema.

5.1.3 Identificação de Laços do Sistema

Durante o período restaurativo, em que houve falha em algum ponto do sistema elétrico de distribuição, é importante verificar se, no fechamento de uma chave, não há a formação de laços no sistema. Uma vez que a radialidade é uma das restrições do problema de restauração de redes elétricas de distribuição. Essa situação pode ocorrer durante o período restaurativo, em que existe a necessidade de se fechar duas chaves para tentar recompor parte do sistema ou para viabilizar os limites operacionais da rede.

De acordo com Balabanian e Bickart (1969), para um determinado grafo, existe uma relação de ortogonalidade entre sua matriz incidência A_f e sua matriz de circuitos fundamentais B_f^t , de tal forma que:

$$A_f B_f^t = 0 \quad (5.1)$$

A_f representa a matriz incidência reduzida;

B_f^t representa a matriz de circuitos fundamentais transposta.

A partir dos cálculos algébricos, a matriz de circuitos fundamentais pode ser representada pela equação:

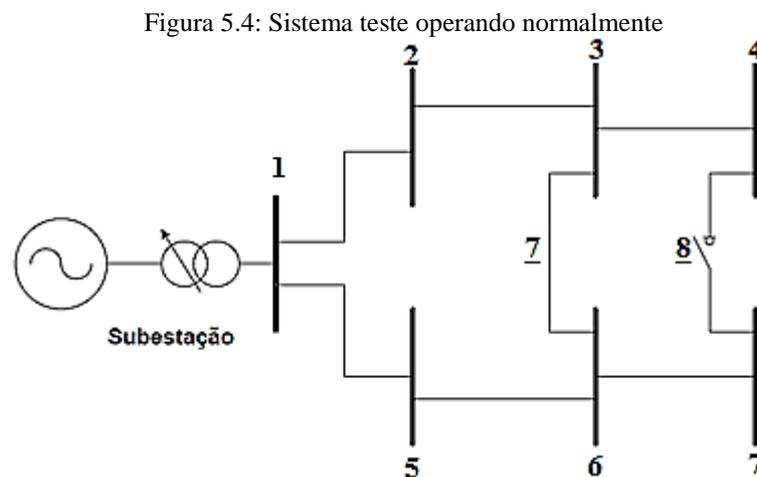
$$B_r^t = -A_r^{-1}A_e \quad (5.2)$$

B_r^t representa a matriz de circuitos fundamentais dos ramos transposta;

A_r representa a matriz incidência dos ramos;

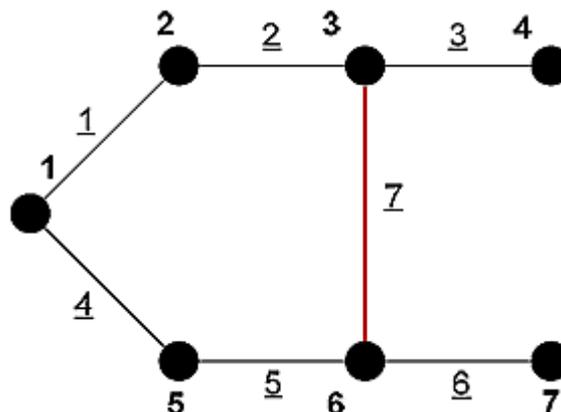
A_e representa a matriz incidência dos elos.

Para exemplo de aplicação dessa metodologia, a chave 7 localizada entre as barras 3 e 6 foi fechada no sistema exemplo, conforme apresentado na Figura 5.4.



De acordo com Balabanian e Bickart (1969), o primeiro passo é construir a árvore do sistema em questão. As arestas pertencentes à árvore do sistema são denominadas ramos, de forma que, as que não pertencem serão denominadas elos. A Figura 5.5 mostra a árvore do sistema, sendo que, o ramo de número 7 não pertence a essa árvore, sendo considerado um elo, ou seja, é uma chave que poderá formar um laço no sistema caso seja comutada.

Figura 5.5: Árvore do sistema exemplo operando em situação normal



Posteriormente, deve-se montar a matriz incidência completa do sistema, constituída por ramos e elos. Na Equação (5.3), verifica-se a matriz incidência da Figura 5.5, sendo as linhas representadas pelos vértices e as colunas, pelas arestas. Na Figura 5.5, verifica-se que a barra 1 (vértice 1) possui ligação com os trechos (arestas) 1 e 4, dessa forma na matriz incidência completa, esta correspondência entre os vértices e as arestas devem assumir valor lógico 1, enquanto as demais que não estiverem conectados assume valor lógico 0. A corrente está saindo da subestação (vértice 1) e entrando no vértice 2 através da aresta 1, portanto esta assume valor positivo. No entanto, após o fechamento da chave 7, forma-se um laço no sistema e a corrente retorna ao vértice 1 através da aresta 4, logo, esta assumirá valor negativo. Isto é feito para todos os vértices e arestas do sistema, construindo assim a matriz de incidência completa.

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{c}
 \text{a r e s t a} \\
 1 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \quad 5 \quad 6 \quad 7 \\
 v \quad 1 \\
 e \quad 2 \\
 r \quad 3 \\
 A_a = t \quad 4 \\
 i \quad 5 \\
 c \quad 6 \\
 e \quad 7
 \end{array}
 \begin{bmatrix}
 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\
 -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0
 \end{bmatrix}
 \end{array} \quad (5.3)$$

Entretanto, pode-se verificar que, efetuando o somatório de todas as linhas da matriz A_a resulta em uma linha nula. Esta característica é comum aos grafos, e se traduz em uma dependência linear entre as matrizes A_a . Pode-se eliminar esta restrição retirando-se uma linha da matriz. Nesse exemplo, o vértice 7 é retirado gerando a matriz A_f , denominada matriz incidência reduzida. Portanto, a matriz agora assume a forma:

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{c}
 1 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \quad 5 \quad 6 \quad 7 \\
 1 \\
 2 \\
 3 \\
 A_f = \\
 4 \\
 5 \\
 6
 \end{array}
 \begin{bmatrix}
 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\
 -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1
 \end{bmatrix}
 \end{array} \quad (5.4)$$

O passo seguinte é seccionar a matriz A_f entre submatrizes: matriz incidência dos ramos (A_r) e matriz incidência dos elos (A_e). Essas submatrizes podem ser vistas da seguinte forma:

$$A_f = [A_r \mid A_e] = \begin{array}{c} \begin{array}{cccccc|c} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ \hline 1 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 4 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 5 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 \end{array} \\ \begin{array}{l} \text{ramos} \\ \text{elo} \end{array} \end{array} \quad (5.5)$$

Ao aplicar as matrizes (A_r) e (A_e) na Equação (5.2) chega-se na matriz (B_r) que corresponde a submatriz de ramos da matriz de circuitos fundamentais (B_f). A partir da Equação (5.6), verifica-se que o sistema exemplo possui apenas um laço, que é formado pelos ramos 1, 2, 4 e 5.

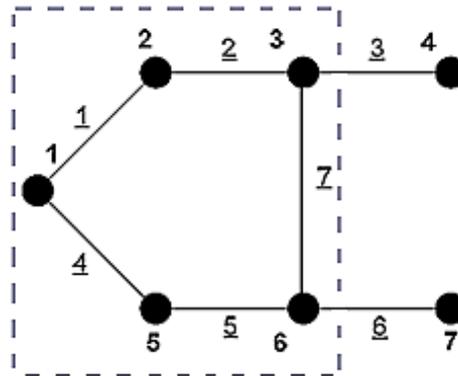
$$B_r = a \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

Adicionando a submatriz (B_r) à submatriz dos elos (B_e), é formada a matriz de circuitos fundamentais (B_f). Dessa forma, além dos ramos citados acima, o laço também é constituído pelo elo 7, de acordo com a Equação (5.7).

$$B_f = a \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

Na Figura 5.6, é representado o grafo do sistema proposto, de forma que a área tracejada destaca a formação do laço identificado através da metodologia proposta.

Figura 5.6: Grafo do sistema, exemplo com formação do laço na área tracejada



5.1.4 Descrição do problema

Na resolução do problema de restauração de redes elétricas de distribuição, além de se encontrar uma configuração que restaure grande quantidade de cargas, minimizando dessa forma a potência não fornecida (PNS) do sistema pós-falha, é interessante que este processo seja realizado com o menor número de manobras. Cabe enaltecer que o período restaurativo tem relação direta com a quantidade de chaveamentos (CH), uma vez que, as chaves operadas manualmente, necessitam de um determinado tempo para comutação – deslocamento da equipe e tempo de manobra (WATANABE, 2005). No processo de reconfiguração em redes de distribuição, buscam-se reduzir as perdas do sistema para a nova topologia, com isto, melhora a confiabilidade e qualidade da energia que será disponibilizado para o cliente. Portanto, torna-se válido a sua inclusão no cálculo da função objetivo para o problema da restauração no fornecimento de energia elétrica mediante uma falha no sistema.

Na Equação (5.8) é visto o problema de minimização, de forma a ponderar a quantidade de cargas não supridas, a relação da quantidade de chaveamentos e as perdas ativas do sistema.

$$\min f = \alpha PNS + \beta CH + \mu Perdas \quad (5.8)$$

tendo como restrições:

- i. configuração radial da rede;
- ii. capacidade das ligações $I_i \leq I_{max,i}$;
- iii. tensões nas barras $V_{min,i} \leq V_i \leq V_{max,i}$;
- iv. $\alpha + \beta + \mu = 1$;

Onde α é o fator de ponderação da PNS; β é o fator de ponderação da CH; já μ é o fator de ponderação das perdas ativas; I_i e $I_{max,i}$, magnitude da corrente e limite máximo de corrente em cada ramo i , respectivamente; V_i é o módulo da tensão na barra i ; V_{min} e V_{max} , limites mínimo e máximo de tensão nas barras. A primeira restrição aborda a admissibilidade de uma solução candidata; já a segunda e terceira restrições explanam a qualidade da solução encontrada. A última solução, por sua vez, são os fatores de ponderação fixados pelo pesquisador.

Após o MSP atingir a convergência, todas as tensões das barras são conhecidas, desta forma, é possível efetuar uma análise com o propósito de verificar se todas as barras do sistema atendem ao critério de tensão mínima, mencionada dentre as restrições. As barras que não respeitam os limites de tensão serão consideradas como “barras desenergizadas”, descrita da seguinte maneira:

$$PNS = \sum_{k=0}^{k-1} h_k \quad (5.9)$$

h_k são as barras desenergizadas depois de k -th operações de chaveamento.

5.2 RESTAURAÇÃO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO VIA ACS

O ACS foi proposto por Dorigo e Gambardella (1997ab), para solucionar o problema do TSP (DORIGO, et al., 2006). Este algoritmo caracteriza-se por atualizar o feromônio ao final da solução de cada formiga. As formigas decidem qual chave do sistema irão comutar através da regra de transição de estados bastante semelhante à Equação (3.1).

5.2.1 Regra de Transição de Estados

Durante o problema de restauração de redes elétricas de distribuição, a regra de transição de estado determina qual será a próxima chave a ser comutada pela formiga. Essa escolha deve ser probabilística. Com isso, um agente k , que se encontra em uma determinada ligação (i), possui a probabilidade $P_Z^{k(i)}$ de visitar uma ligação z , conforme a Equação (5.10):

$$P_Z^{k(i)} = f(x) = \begin{cases} \tau_z^\alpha \eta_z^\beta / \sum_{l \in \Psi} \tau_l^\alpha \eta_l^\beta, & \text{se } z \in \Psi \\ 0, & \text{se } z \notin \Psi \end{cases}, \quad (5.10)$$

tendo Ψ como conjunto de chaves que podem ser visitadas pelo agente k . Portanto o conjunto mencionado é constituído pela união entre os vetores restauração e radialidade. τ_z é a quantidade de feromônio relacionada à abertura/fechamento da chave z ; já η_z corresponde à informação heurística que será detalhada mais a frente; α e β são os pesos atribuídos ao feromônio e a informação heurística (PEREIRA, 2010).

5.2.2 Distribuição do Feromônio

A atualização do feromônio tem como objetivo concentrar a pesquisa em regiões do espaço de busca com distâncias reduzidas. O ACS dispõe de duas formas de atualização, a local e global. A atualização local do feromônio é realizada assim que uma formiga realiza a ação de abertura/fechamento de uma chave. Dessa forma a formiga remove certa quantidade de feromônio, de acordo com a Equação (5.11) que muito se assemelha com a Equação (3.15) já mencionada (DORIGO;GAMBARDELLA, 1997):

$$\tau_z \leftarrow (1-\varphi)\tau_z + \varphi\tau_0 \quad (5.11)$$

onde, $\varphi \in (0,1]$ é o coeficiente de decaimento de feromônio, e τ_0 a quantidade inicial de feromônio.

A regra de atualização global do feromônio é efetuada assim que uma formiga encontra uma solução assim como descrita na Equação (3.14), e pode ser descrita por:

$$\tau_z = \begin{cases} (1 - \rho)\tau_z + \rho\Delta\tau_z, & \text{se } (z) \text{ pertence a melhor rota;} \\ \tau_z, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (5.12)$$

$\Delta\tau_z$ representa o depósito de feromônios de todas as formigas na ligação z , semelhantes às Equações (3.7) e (3.8) referentes à *Ant System*, a qual se expressa da seguinte forma:

$$\Delta\tau_z = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_k(z) \quad (5.13)$$

$$\Delta\tau_k(z) = \begin{cases} Q/L_k & \text{se } k \in \text{a rota da formiga } k; \\ 0 & \text{Caso contrário,} \end{cases} \quad (5.14)$$

onde, m a quantidade de formigas, Q a constante de peso para o depósito do feromônios e L_k o comprimento da rota k -ésima formiga.

O ACS, devido ao incremento da atualização local, incentiva às formigas a percorrerem todo o espaço de busca, a fim de obter a solução ótima, isto é interessante com o propósito de evitar a estagnação precoce do algoritmo.

5.2.3 Informação Heurística

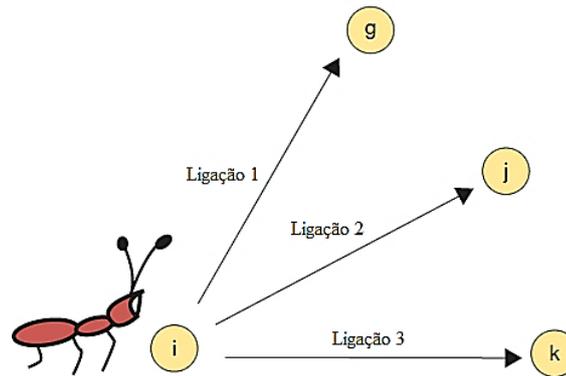
A informação heurística tem papel fundamental na escolha da decisão de qual barra será a próxima a ser visitada pela formiga. Na fase inicial do algoritmo, os feromônios, definidos com valores aleatórios, não orientam as formigas que, por sua vez, acabam construindo soluções de má qualidade. No problema clássico do caixeiro viajante, a informação heurística é definida como o inverso da distância entre as cidades. Este trabalho dispõe de dois vetores de feromônio e dois vetores de informação heurística, justificando o fato de que os critérios para ativar e desativar uma ligação são distintos.

O vetor de informação heurística, a ser utilizado no cálculo de probabilidade para ativar uma ligação, considera a quantidade de cargas que serão restauradas na barra a jusante desta ligação, auxiliando, assim, na problematização de minimização da função objetivo. Já o vetor de informação heurística que será utilizado para desativar uma ligação, utiliza o critério do nível de tensão, justificando o fato de que as barras terminais são candidatas aos piores níveis de tensão e, dessa forma, não atende as restrições. Portanto, estas barras devem ser alimentadas a partir de outro trecho.

5.2.4 Sorteio da ligação

Supondo uma formiga posicionada em determinado nó i , com a probabilidade das ligações 1, 2 e 3 calculadas através da Equação (5.10), em 25,6% (aproximado para 26%), 26,1% (aproximado para 26%) e 48,3% (aproximado para 48%) respectivamente, conforme a Figura 5.7.

Figura 5.7: Escolha aleatória das ligações



Fonte: Adaptado de (DORIGO et al., 2006).

Uma roleta é implementada para o sorteio das ligações com probabilidades calculadas, dessa forma, não necessariamente a formiga vai escolher a ligação com a maior probabilidade. Uma análise mais detalhada deste método permite verificar que, as aproximações realizadas nos cálculos podem proporcionar limitações quando o sistema possui principalmente muitas ramificações. No exemplo acima, a ligação 1 e 2 teriam a mesma probabilidade para a roleta.

Portanto, outro método é adotado a fim de evitar o procedimento de arredondamento dos valores de probabilidade, tornando o sorteio, por sua vez, mais justo. A estratégia propõe gerar um vetor de intervalos numéricos com base nas probabilidades calculadas.

Os intervalos são calculados tomando zero como referência e somando a probabilidade em cada trecho ao valor acumulado. Dessa forma, para a ligação 1, somando 0 e 25,6%, teremos o intervalo $[0 - 0,256]$. Para a ligação 2, somando-se 25,6% e 26,1% resulta no intervalo $(0,256 - 0,517]$ e para a ligação 3, somando-se 51,7% e 48,3% resulta no intervalo $(0,517 - 1)$. O procedimento é repetido para todas as ligações. Dessa forma, ao final do processo têm-se intervalos numéricos representativos de cada ligação. Suponha que para o presente exemplo, o número sorteado seja 0,784. A roleta faz as seguintes comparações:

1. $0,784 \leq 0,256?$ → NÃO. Compara com o próximo valor do vetor probabilidade calculada;
2. $0,784 \leq 0,517?$ → NÃO. Compara com o próximo valor do vetor probabilidade calculada;
3. $0,784 \leq 1?$ → SIM. Encerra as comparações.

Dessa forma, neste exemplo, a formiga vai escolher percorrer a ligação 3, chegando na barra k . Com a roleta implementada, torna-se possível explorar todas as trilhas, considerando até a com valores mais baixos, diversificando assim a busca do algoritmo.

5.3 ALGORITMO DE SOLUÇÃO DO ACS PARA O PROBLEMA DA RESTAURAÇÃO DE REDES ELÉTRICAS

Passo 1: Efetuar a leitura dos dados do sistema e dos parâmetros do algoritmo;

Passo 2: Isolar o local da falta, realizar o cálculo da potência não fornecida do sistema e fazer a atualização do vetor chaves de restauração;

Passo 3: Depositar uma quantidade inicial de feromônio em todas barras do sistema;

Passo 4: Incrementar o contador de ciclo do algoritmo;

Passo 5: Incrementar o contador de ciclo da formiga;

Passo 6: Atualizar o vetor chaves de restauração e escolher uma chave com probabilidade calculada através da regra de transição de estados para ser fechada e conectar as barras ilhadas ao resto do sistema;

Passo 7: Deslocar a formiga e fechar a chave selecionada;

Passo 8: Executar o MSP e verificar se atende ao critério de parada ($PNS = 0$ ou chaves do vetor restauração = 0?);

Passo 9: Se não atender ao critério de parada do passo 8, ir para o passo 10, caso contrário, ir para o passo 16;

Passo 10: calcular a potência não fornecida, atualizar o vetor chaves de restauração e escolher uma chave com probabilidade calculada;

Passo 11: Deslocar a formiga e fechar a chave selecionada através da regra da transição de estados;

Passo 12: Atualizar o vetor chaves de radialidade e escolher uma chave com probabilidade calculada para retornar o sistema de volta a configuração radial;

Passo 13: Deslocar a formiga e abrir a chave selecionada através da regra de transição de estados;

Passo 14: Efetuar a atualização local do feromônio para as chaves comutadas;

Passo 15: Retornar ao passo 8;

Passo 16: Calcular o valor da função objetivo para a configuração encontrada;

Passo 17: Armazenar o valor da função objetivo no vetor histórico da função objetivo e armazenar em outro vetor a configuração encontrada;

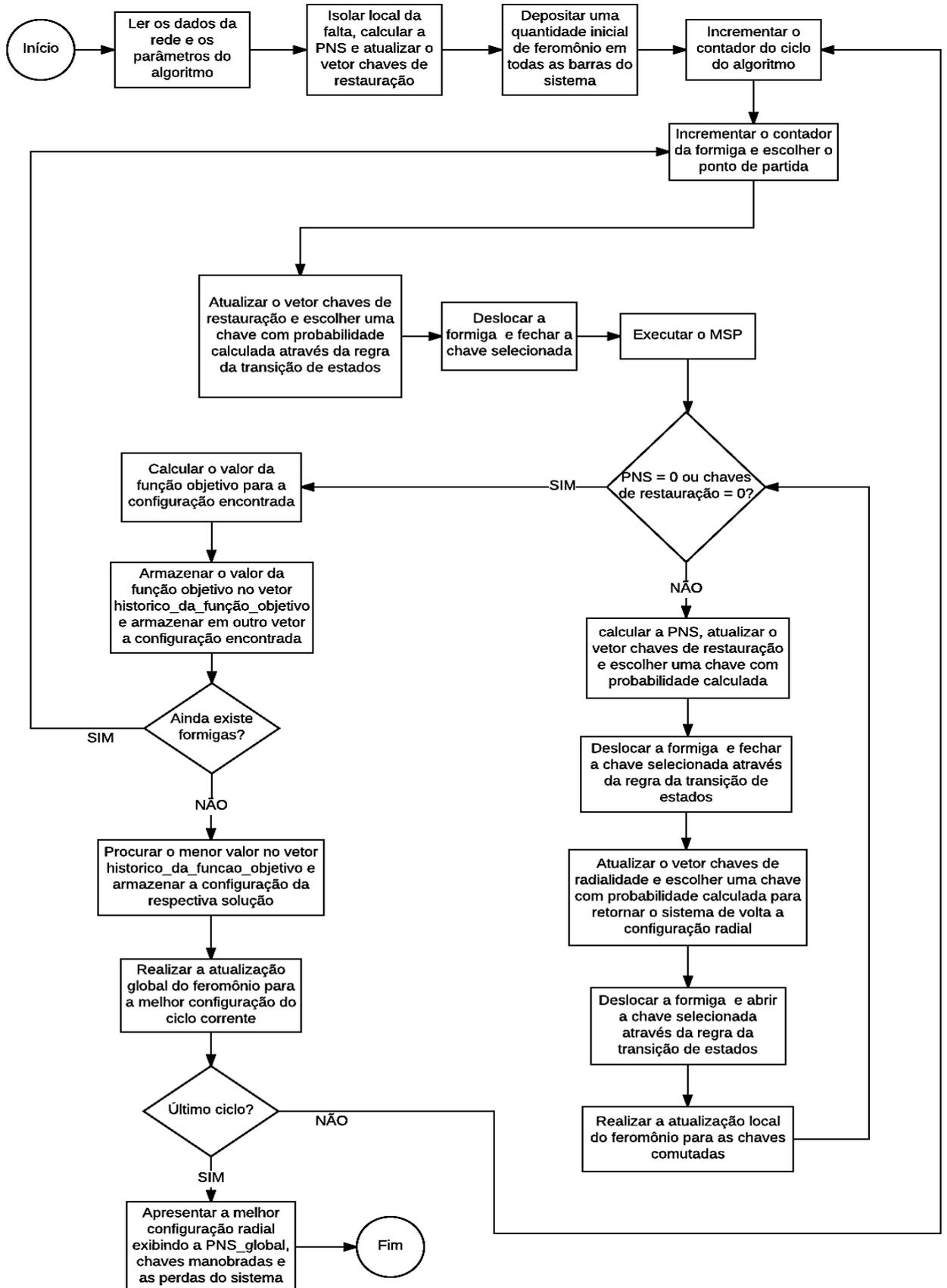
Passo 18: Verificar se ainda existem formigas a serem incrementadas no contador;

Passo 19: Se positivo o passo 18, retornar para o passo 5, caso contrário, ir para o passo 20;

- Passo 20:** Procurar o menor valor no vetor histórico da função objetivo e armazenar a configuração da respectiva solução;
- Passo 21:** Realizar a atualização global do feromônio para a melhor configuração do ciclo corrente;
- Passo 22:** Verificar se é o último ciclo;
- Passo 23:** Caso positivo o passo 22, retornar para o passo 4, caso contrário, ir para o passo 24;
- Passo 24:** Apresentar a melhor configuração radial, exibindo a potência não fornecida global, as chaves manobradas e as perdas do sistema.

5.4 FLUXOGRAMA PARA O ALGORITMO DO ACS PARA O PROBLEMA DA RESTAURAÇÃO DE REDES ELÉTRICAS

Figura 5.8: Fluxograma do ACS para o problema de restauração



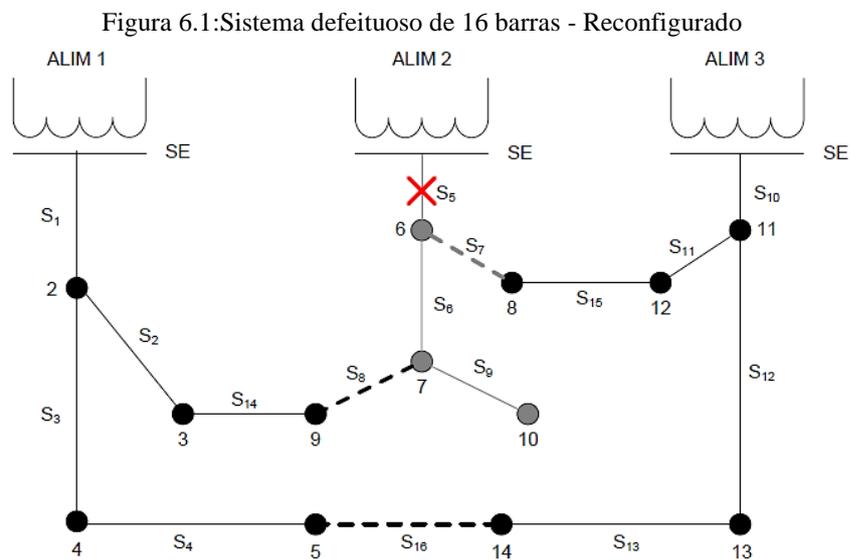
6 TESTES E RESULTADOS NUMÉRICOS

6.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados numéricos obtidos. Os algoritmos foram implementados em Matlab[®] R2015a para Windows 7 de 64 bits.

6.2 EXEMPLO DO DESLOCAMENTO DAS FORMIGAS – SISTEMA DEFEITUOSO DE 16 BARRAS

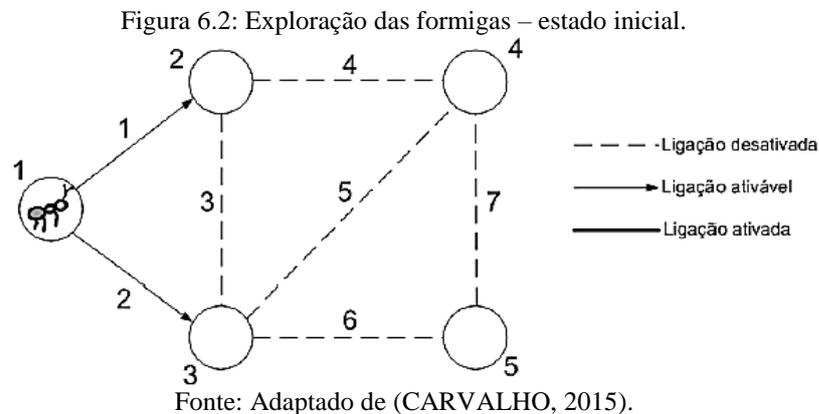
Para o melhor entendimento a respeito do deslocamento das formigas durante o processo restaurativo, utilizou-se um sistema físico de 16 barras proposto por Cinvalar, et al., (1988) e reconfigurado conforme ilustrado no trabalho de Arcanjo (2014), contendo 3 alimentadores (barras 1, 2 e 3), podendo ser visualizado pela Figura 6.1. Esse sistema possui 3 laços de interconexão e 16 chaves seccionadoras, sendo originalmente 13 chaves fechadas e 3 chaves abertas. Adotou-se a ocorrência do defeito no ramo S_5 . Após a atuação do sistema de proteção, as barras 6, 7 e 10 ficam desenergizadas.



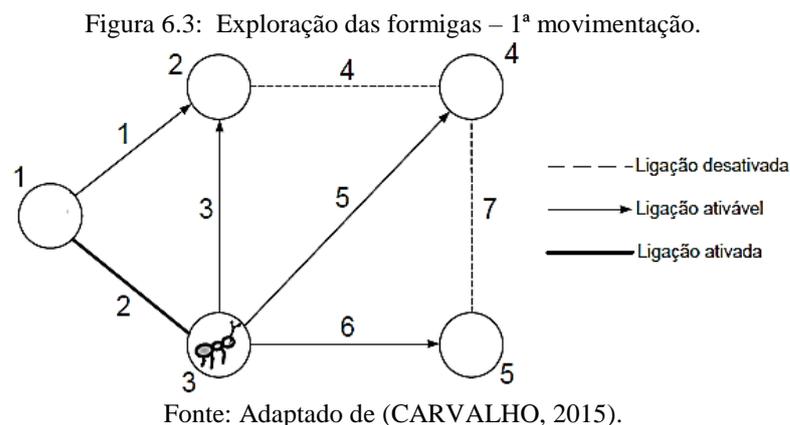
Fonte: ARCANJO, 2014.

A formiga possui movimentação de caráter discreto, portanto, pode ter como ponto inicial qualquer barra do sistema, por exemplo, alguma barra adjacente ao local da falta. A movimentação das formigas se dá uma por vez, e seus passos estão descritos no fluxograma da Figura 5.8.

Após o isolamento da falta, inicialmente, a formiga verifica qual a potência não fornecida do sistema a partir das barras ilhadas utilizando o MSP descrito no capítulo 4. Feito isso, a formiga conecta as barras ilhadas do sistema, ativando a ligação com a barra escolhida do “vetor restauração” a partir da regra de transição de estados explanada na Equação 5.10. A Figura 6.2 ilustra o deslocamento da formiga de forma hipotética, sendo as ligações desativadas, aquelas que não compõem as barras do vetor analisado em questão – neste caso o vetor restauração – e as ligações ativáveis são às ligações possíveis – que fazem parte do vetor – e, serão escolhidas mediante a regra de transição já mencionada.



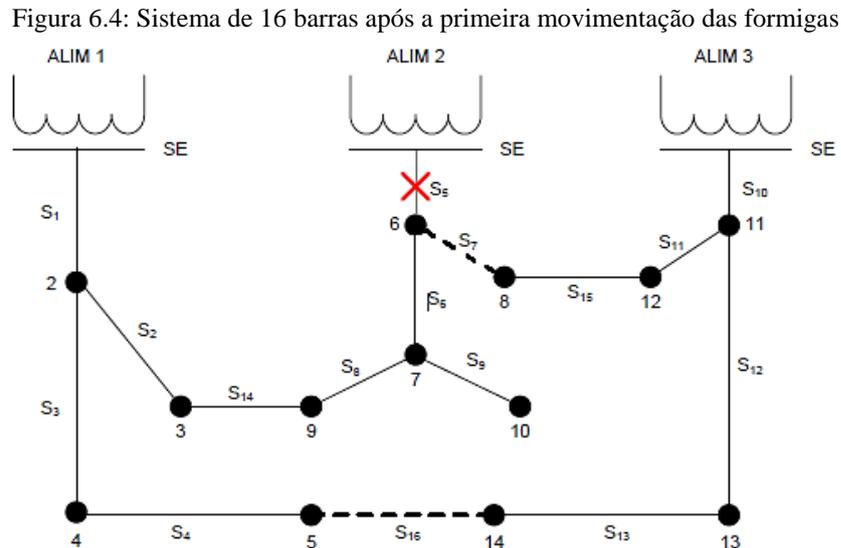
Após o sorteio, a formiga ativará o trecho contemplado pela roleta sem se preocupar com a formação de laços no sistema – devido às barras estarem ilhadas após a isolação da falta. Seu deslocamento funciona de acordo com a Figura 6.3.



No estudo do caso em análise, compõem o vetor restauração os trechos:

$$\text{vetor restauração} = \{S_7, S_8\}$$

Estes são os únicos trechos capazes de interligar as barras PNS com o resto do sistema, restabelecendo por sua vez, a conectividade. Como este sistema é pequeno, é possível verificar qual a melhor configuração. Desta forma, supondo que o trecho escolhido dentro do vetor restauração seja representado pela chave S_8 , o sistema ficaria de acordo com a Figura 6.4.



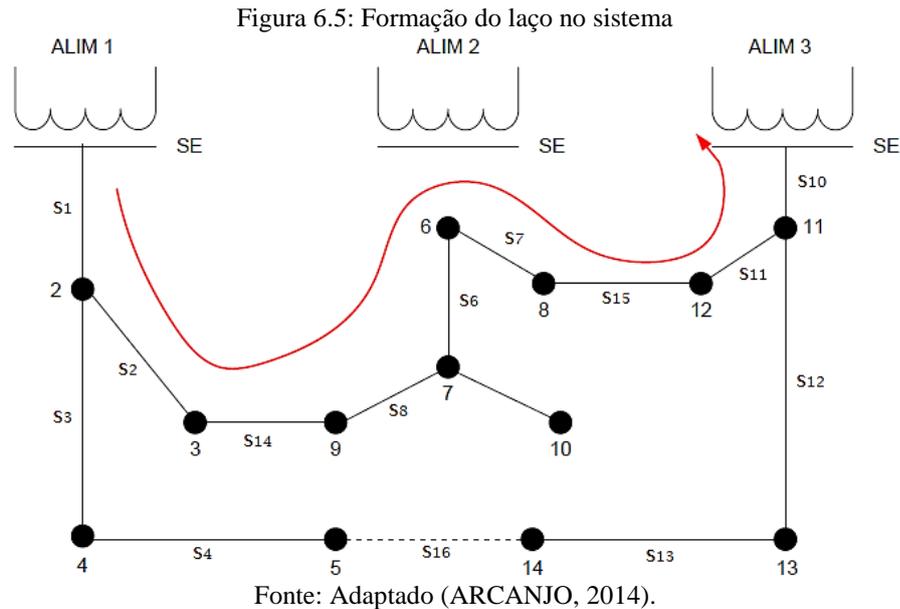
Fonte: Adaptado (ARCANJO, 2014).

Entretanto, não basta apenas conectar as barras que ficaram sem atendimento, se faz necessário também, verificar se às restrições foram satisfeitas através do MSP. No caso supracitado, verifica-se que algumas barras restringem às restrições, sendo consideradas, por sua vez, como barras PNS.

De acordo com o fluxograma da Figura 5.8, se após a ativação de um trecho o sistema não atender à condição de parada ($PNS = 0$) então é calculado, mediante a regra de transição de estados, outra chave do vetor restauração que ainda não foi operada. Neste caso, o vetor restauração dispõe unicamente da chave S_7 .

$$\text{vetor restauração} = \{S_7\}$$

Desta forma, a formiga ativará a ligação em questão, todavia, devido à configuração da rede, haverá a formação de um laço do sistema de acordo com a Figura 6.5.



Neste caso, houve a formação de um laço no sistema a partir da interligação entre os alimentadores 1 e 3. A partir da identificação de laços no sistema descrito no Capítulo 5, é possível verificar quais chaves representam os trechos que vão compor o “vetor radialidade”, este que será responsável pela identificação de todas as chaves que integram o laço formado e terão as seguintes chaves:

$$\text{vetor radialidade} = \{S_1, S_2, S_{14}, S_8, S_6, S_7, S_{15}, S_{11}, S_{10}\}$$

Desta forma, é implementada novamente a roleta, e a partir da regra de transição de estados a formiga vai desativar um trecho, retornando o sistema à configuração radial. Suponha-se que a chave escolhida foi a S_6 , desta forma o sistema ficará de acordo com a Figura 6.6.

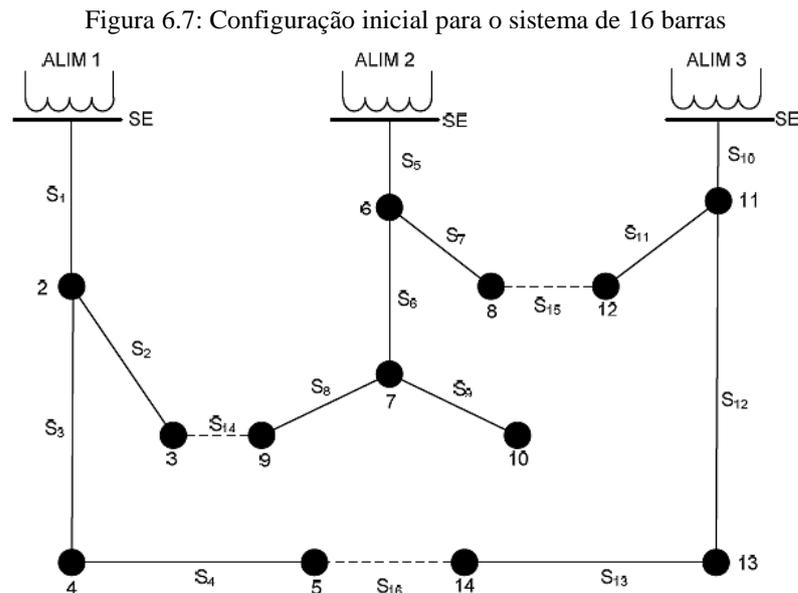
Tabela 6.1: Parâmetros Utilizados

Parâmetros	Símbolos	Valores	
		16 barras	33 barras
Quantidade de formigas	m	5	10
Peso do feromônio	α	1	1
Peso da inf. heurística	β	2	3
Taxa de evaporação	ρ	0,2	0,1
Taxa de decaimento	ϕ	0,1	0,1
Tolerância do MSP	ε	10^{-3}	10^{-3}
Feromônio inicial	τ_0	1	1
Nº de ciclos	<i>ciclos</i>	30	100

A formiga inicia seu movimento partindo de uma barra qualquer, considerando o movimento de caráter discreto. Este movimento segue às regras supracitadas mediante os vetores restauração e radialidade, e continua até construir a solução radial e obedecer ao critério de parada do algoritmo.

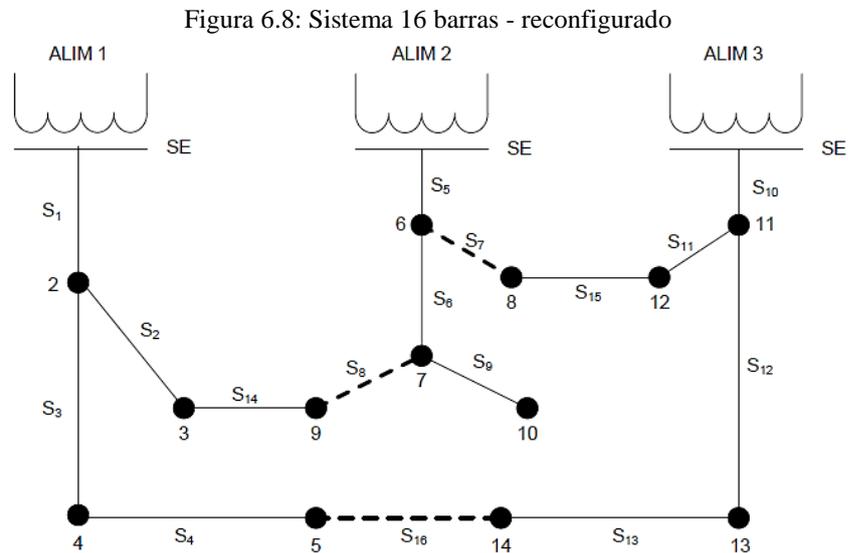
6.3.1 Sistema de 16 barras

O sistema teste de 16 barras (CIVANLAR et al., 1988), foi descrito na seção 6.2. A configuração inicial contém as chaves 14-15-16 abertas de acordo com a Figura 6.7 e apresenta perdas de potência ativa de 511,4 kW. Os dados desse sistema estão contidos no Apêndice A.



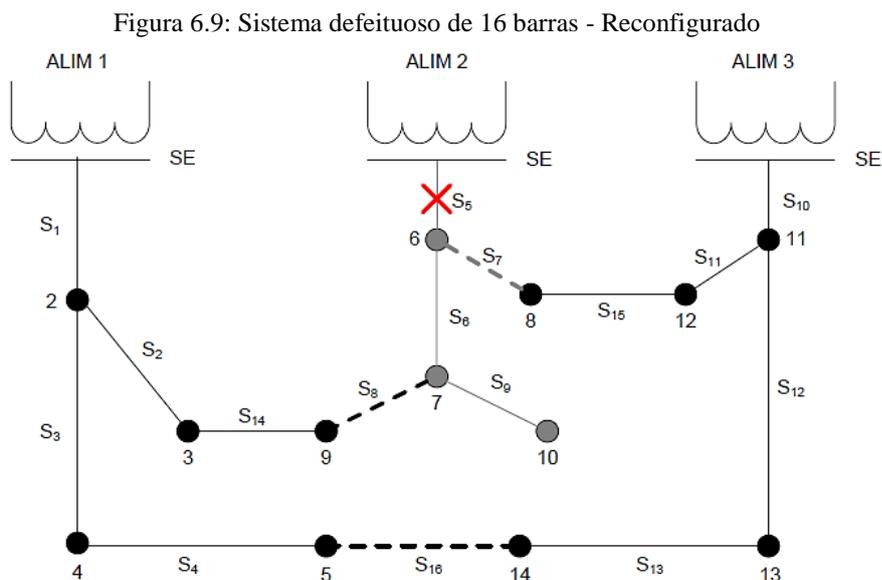
Fonte: CIVANLAR et al., 1988.

No entanto, para fins de comparação vai ser utilizado o sistema reconfigurado da Figura 6.8. Este sistema possui a reconfiguração ótima do sistema como descrito em (LIN; CHIN, 1998) e (BORGES, 2012) no problema de restabelecimento.



Fonte: CIVANLAR et al., 1988.

Adotou-se também da mesma forma que Lin e Chin (1998) e Borges (2012), a ocorrência do defeito no ramo S_5 . Após a atuação do sistema de proteção, as barras 6, 7 e 10 ficam desenergizadas, conforme mostra a Figura 6.9. Os limites de tensão nas barras foram considerados entre 0,95 p.u. e 1,05 p.u..



Fonte: ARCANJO, 2014.

Os resultados encontrados para o sistema de 16 barras são apresentados na Tabela 6.2, sendo comparados com o trabalho de Lin e Chin (1998), que utiliza uma nova abordagem para solucionar a reconfiguração aplicada à restauração de redes de distribuição utilizando Índices de Comutação Ideal, com o trabalho de Borges (2012) de forma a considerar variáveis discretas do problema como modelos de uma função contínua, permitindo que o problema possa ser resolvido utilizando-se o Método Primal-Dual de Pontos Interiores, e, também é comparado com o método de Busca Exaustiva proposta por Arcanjo (2014). Como não foi realizada a análise das perdas de potência ativa neste sistema, para fins de comparação, visto que a função objetivo é ponderada por três parâmetros, utilizou-se prioritariamente o fator de ponderação da potência não fornecida e do chaveamento, levando em consideração que o parâmetro de maior importância no caso da restauração de redes de distribuição é restabelecer o máximo possível de cargas sem atendimento de energia elétrica, portanto, o fator de ponderação da PNS tem peso maior que as demais, mesmo no caso da análise com perdas. Para o sistema de 16 barras, foram utilizados os seguintes fatores de ponderação da função objetivo: $\alpha = 0,7$; $\beta = 0,3$ e $\mu = 0$. Note que, para o sistema de 16 barras, os alimentadores 1, 2 e 3 foram considerados como a “barra 1” conforme a Figura 6.3.

Tabela 6.2: Resultados para o sistema de 16 barras

Experimentos	Chaveamento	Tensão mínima	Carga final restabelecida
Busca Exaustiva (ARCANJO, 2014)	Fechar S ₈ Fechar S ₇ Abrir S ₆	0,954 p.u. (Barra 10)	100%
Índices de Comutação Ideal (LIN;CHIN, 1988)	Fechar S ₇	0,950 p.u. (Barra 6)	67%
Método Primal-Dual de Pontos Interiores (BORGES, 2012)	Fechar S ₈ Fechar S ₇ Abrir S ₆	0,954 p.u. (barra 10)	100%
Método Proposto	Fechar S ₈ Fechar S ₇ Abrir S ₆	0,954 p.u. (barra 10)	100%

A Figura 6.10 e 6.11 mostra o perfil de tensão das barras para o sistema de 16 barras reconfigurado antes da ocorrência da falta e após a restauração, respectivamente.

Figura 6.10: Perfil de tensão inicial para o sistema de 16 barras reconfigurado antes da ocorrência da falta

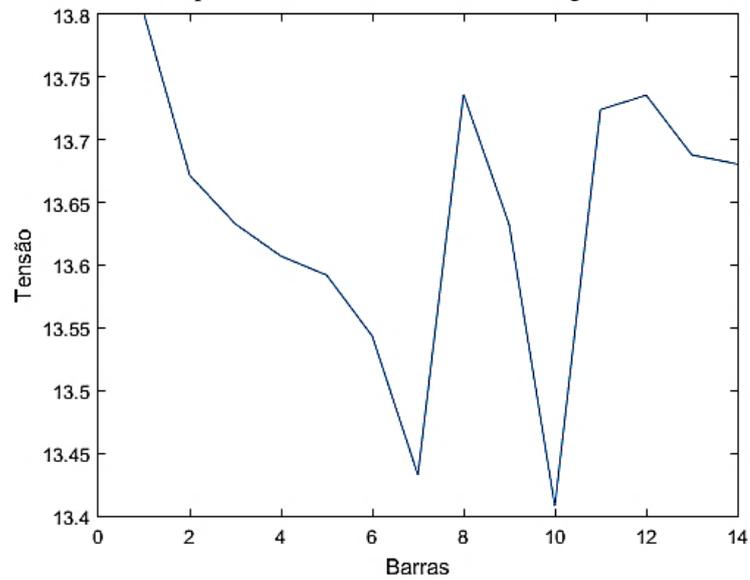
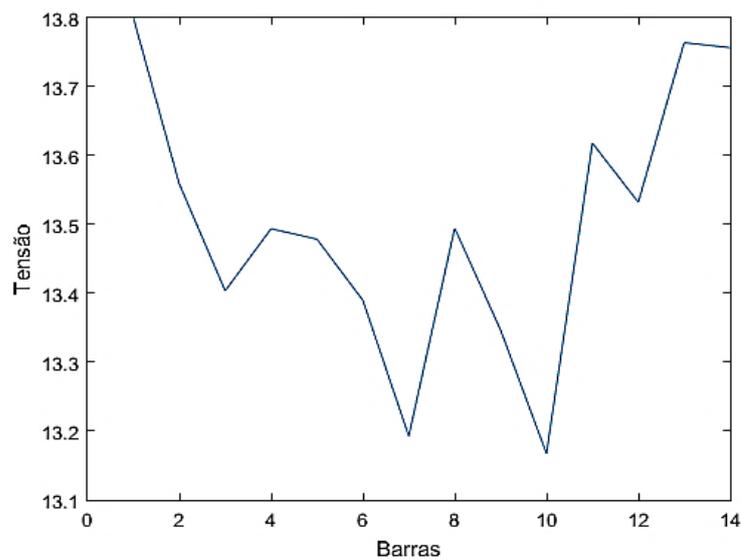
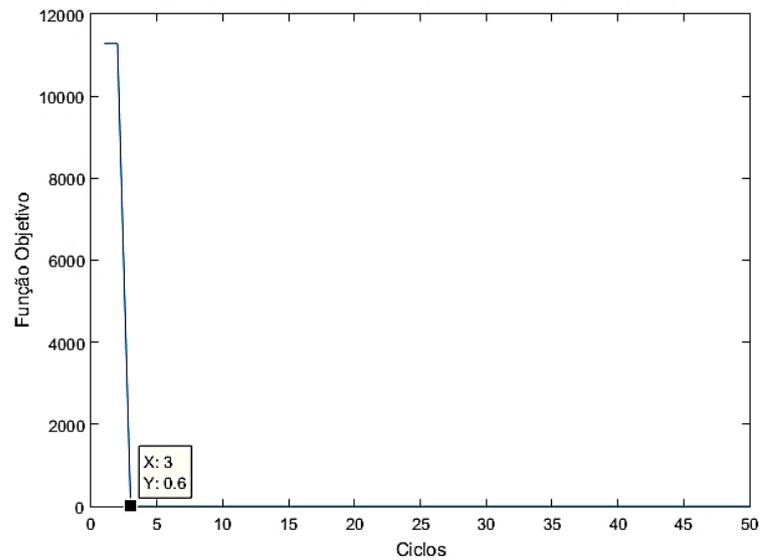


Figura 6.11: Perfil de tensão das barras após a restauração para o sistema de 16 barras



O desempenho do algoritmo quanto à convergência pode ser verificado na Figura 6.12. Diante da resposta apresentada pelo ACS, o número de ciclos deste algoritmo pode ser reduzido a um determinado valor, sem que houvesse perda da qualidade da solução encontrada.

Figura 6.12: Convergência do algoritmo ACS para o sistema de 16 barras

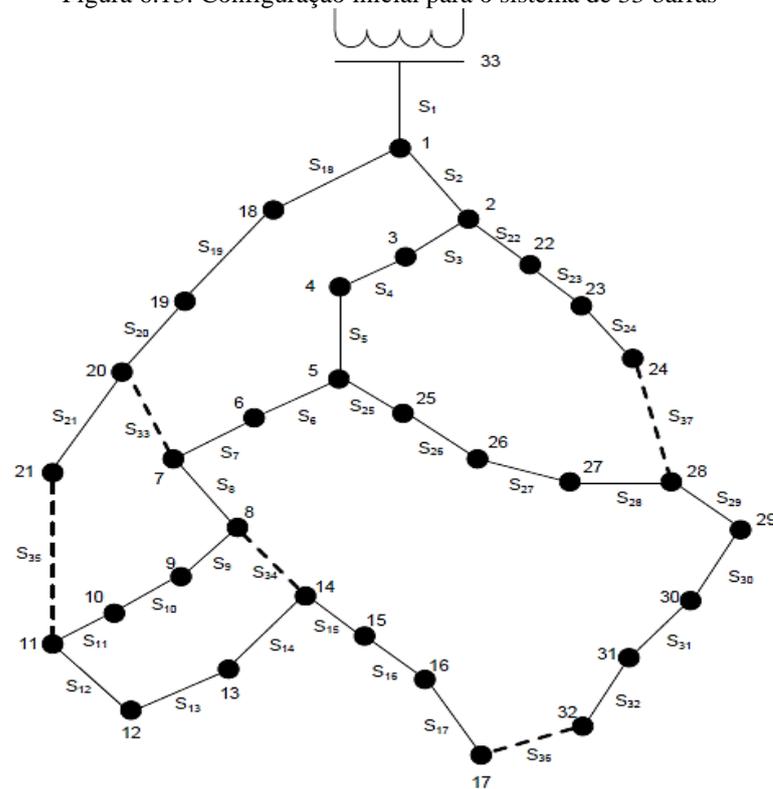


Para o sistema de 16 barras, a configuração final e o percentual de cargas restauradas estão de acordo com alguns valores encontrados na literatura. Os resultados foram comparados com três trabalhos Lin e Chin (1988), Borges (2012) e Arcanjo (2014). A metodologia proposta, assim como o método encontrado em Borges (2012) e Arcanjo (2014), restabelecem 100% das cargas do sistema chegando ao ótimo global para este problema. Já o método proposto por Lin e Chin (1988) restabelece apenas as cargas das barras 6 e 7 do sistema após o fechamento da chave S_7 . O perfil de tensão da solução encontrada por Lin e Chin (1988) é ligeiramente menor ao ótimo do problema.

6.3.2 Sistema de 33 barras

Muito utilizado na literatura sobre reconfiguração de sistemas elétricos de distribuição, o sistema de 33 barras Baran e Wu (1989) apresenta uma tensão nominal de 12,66 kV. Esse sistema possui 1 subestação (barra 1), 5 laços de interconexão e 37 chaves seccionadoras, sendo originalmente 32 chaves fechadas e 5 chaves abertas (chaves 33 a 37), conforme a Figura 6.13. A configuração inicial do sistema apresenta perdas ativas totais de 202,68 kW. Os dados desse sistema podem ser vistos no Apêndice A.

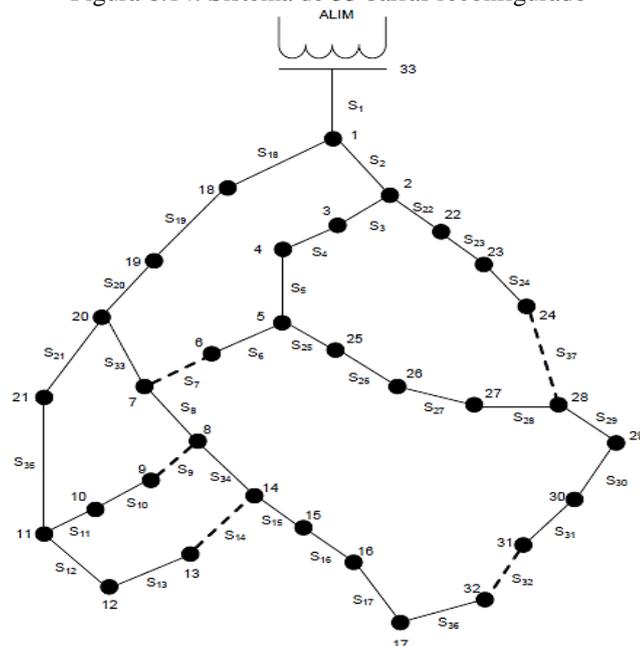
Figura 6.13: Configuração inicial para o sistema de 33 barras



Fonte: BARAN, WU, 1989.

Com o propósito de se verificar a qualidade dos resultados obtidos pelo algoritmo ACS em comparação com os trabalhos de Lin e Chin (1998) e Borges (2012), já mencionados, e também com o trabalho de Zidan e El-Saadany, (2011), que utiliza de um algoritmo dispondo de Índices de Comutação com integração de Geração Distribuída, entretanto, para os sistemas comparados, não é utilizada a geração. Para este sistema também foi realizado um comparativo das perdas ativas de cada trabalho. O sistema a ser reconfigurado é o de 33 barras, conforme a Figura 6.14. Este sistema apresenta as seguintes chaves normalmente abertas: S_7, S_9, S_{14}, S_{32} e S_{37} .

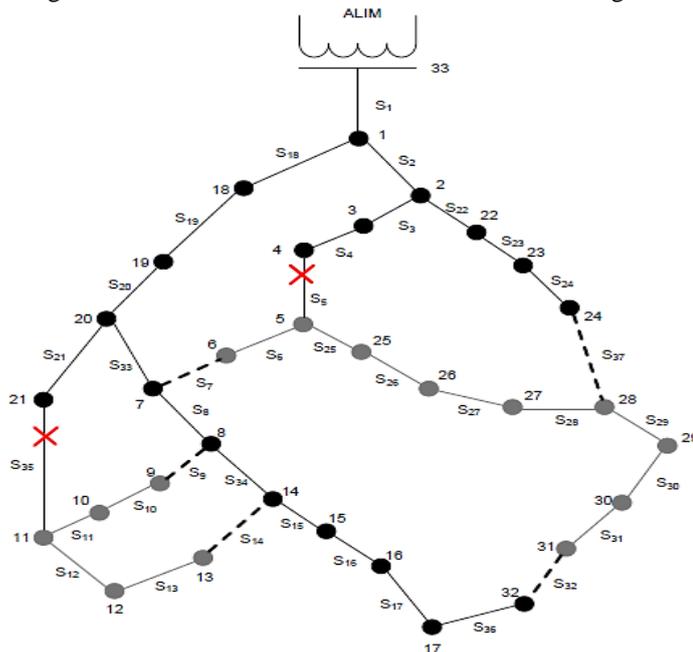
Figura 6.14: Sistema de 33 barras reconfigurado



Fonte: (LIN;CHIN, 1998)

No trabalho de restabelecimento do fornecimento de energia elétrica feita por Lin e Chin (1998), foram aplicados defeitos permanentes e simultâneos nos circuitos, S_5 e S_{35} . Em consequência, as barras 5, 6, 9, 10, 11, 12, 13, 25, 26, 27, 28, 29, 20 e 31 ficam desenergizadas, totalizando 1.465 kW de potência não fornecida. Para o sistema de 33 barras com limite de tensão de 0,85 p.u., utilizaram-se os seguintes valores para os fatores de ponderação da função objetivo: $\alpha = 0,5$; $\beta = 0,3$ e $\mu = 0,2$. A Figura 6.15 representa o sistema mencionado.

Figura 6.15: Sistema defeituoso de 33 barras - Reconfigurado



Fonte: (ARCANJO, 2014)

A Tabela 6.3 mostra os resultados obtidos para o sistema de 33 barras com um limite de tensão de 0,85 p.u..

Tabela 6.3: Comparação do resultado final do restabelecimento do sistema IEEE 33 barras

Experimentos	Chaveamento	Tensão mínima	Carga final restabelecida	Perdas Ativas
Busca Exaustiva (ARCANJO, 2014)	Fechar S_{37} Fechar S_9	0,928 p.u. (Barra 6)	100%	189 kW
Índices de Comutação Ideal (LIN;CHIN, 1988)	Fechar S_7 Fechar S_9	0,842 p.u. (Barra 31)	100%	301 kW
Índices de Comutação Ideal (ZIDAN; EL- SAADANY, 2011)	Fechar S_{37} Fechar S_{14}	0,928 p.u. (barra 6)	100%	195 kW
Método Primal-Dual de Pontos Interiores (BORGES, 2012)	Fechar S_{37} Fechar S_9	0,928 p.u (barra 6)	100%	189 kW
Método Proposto	Fechar S_{37} Fechar S_9	0,928 p.u.(barra 6)	100%	189 kW

A Figura 6.16 e 6.17 mostra o perfil de tensão das barras para o sistema de 33 barras reconfigurado antes da ocorrência da falta e após a restauração com limite de tensão de 0,85 p.u, respectivamente. Apesar de ser considerável o limite de tensão, a resposta do sistema teve o seu pior resultado na barra de número 6, cuja tensão é 0,928 p.u..

Figura 6.16: Perfil de tensão inicial para o sistema de 33 barras reconfigurado antes da ocorrência da falta

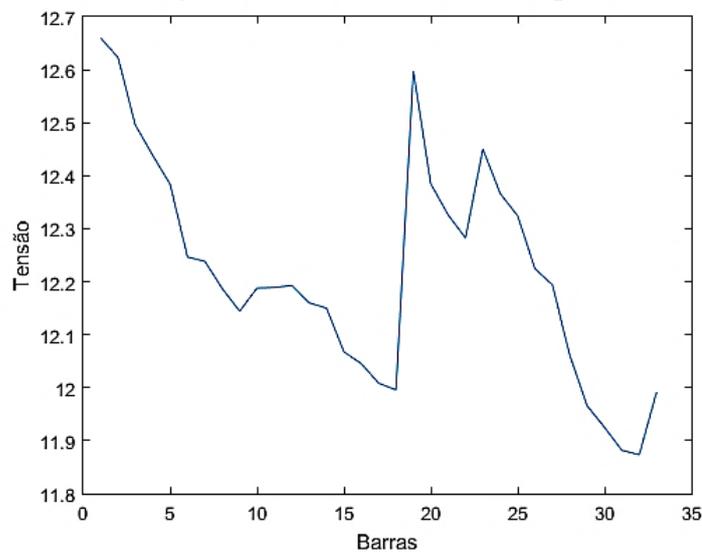
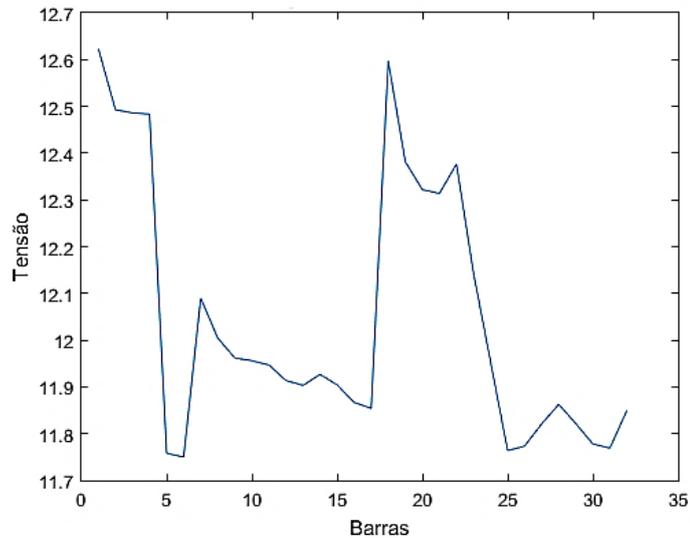
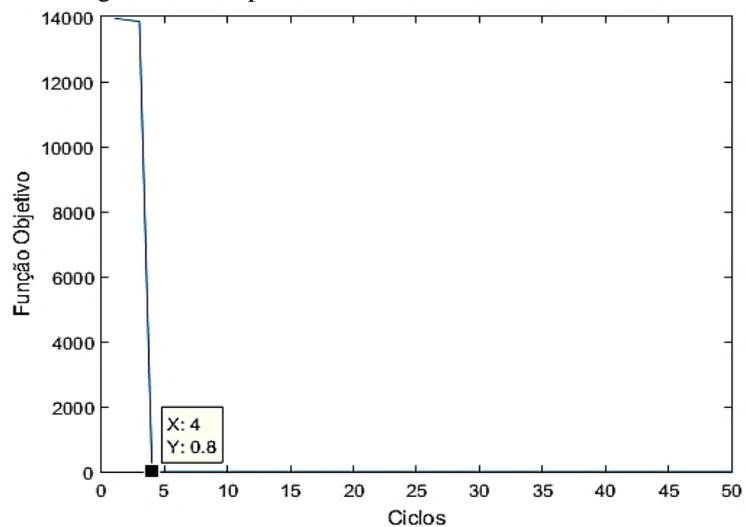


Figura 6.17: Perfil de tensão das barras após a restauração para o sistema de 33 barras com limite de tensão de 0.85 p.u.



O perfil de convergência do algoritmo pode ser observado na Figura 6.18 para o limite de tensão de 0.85 p.u..

Figura 6.18: Convergência do algoritmo ACS para o sistema de 33 barras com limite de tensão de 0.85 p.u.



A metodologia proposta, assim como os trabalhos (BORGES, 2012) e (ARCANJO, 2014), indica o restabelecimento ótimo para esse sistema nas condições consideradas. Embora as metodologias restaurem 100% da carga final, a metodologia proposta, assim como trabalhos já mencionados, resolve a problematização, com a ressalva de que o sistema resultante tem um quantitativo menor de perdas.

A Tabela 6.4 realiza a comparação dos algoritmos propostos para o problema já mencionado, entretanto, dispõe de um limite de tensão mais rigoroso, no valor de 0,95 p.u. Para este sistema, utilizaram-se os seguintes valores para os fatores de ponderação da função obje-

tivo: $\alpha = 0,5$; $\beta = 0,25$ e $\mu = 0,25$. O perfil de tensão pode ser visto na Figura 6.19 e a convergência do algoritmo na Figura 6.20.

Tabela 6.4: Comparação do resultado final do restabelecimento do sistema IEEE 33 barras - Limite inferior de tensão de 0,95 p.u.

Experimentos	Chaveamento	Tensão mínima	Carga final restabelecida	Perdas Ativas
Índices de Comutação Ideal (LIN;CHIN, 1988)	Fechar S_7 Fechar S_9	0,951 p.u. (Barra 32)	8%	48 kW
Índices de Comutação Ideal (ZIDAN; EL-SAADANY, 2011)	Fechar S_{37} Fechar S_{14}	0,950 p.u. (barra 6)	55%	94 kW
Método Primal-Dual de Pontos Interiores (BORGES, 2012)	Fechar S_{37} Fechar S_9 Fechar S_{32} Abrir S_{17} Fechar S_7 Abrir S_{25}	0,952 p.u. (barra 16)	64%	97 kW
Método Proposto	Fechar S_{37} Fechar S_9 Fechar S_{32} Abrir S_{17} Fechar S_7 Abrir S_{25}	0,952 p.u. (barra 16)	64%	97 kW

Figura 6.19: Perfil de tensão das barras após a restauração para o sistema de 33 barras com limite de tensão de 0.95 p.u.

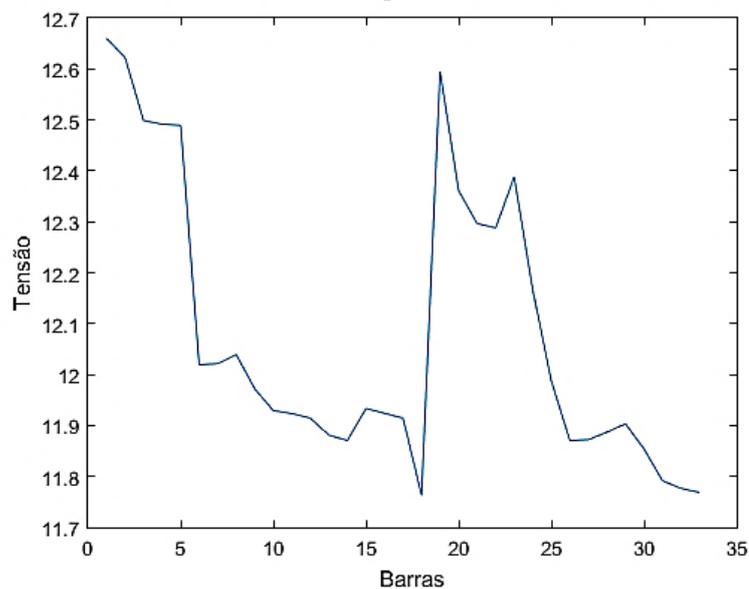
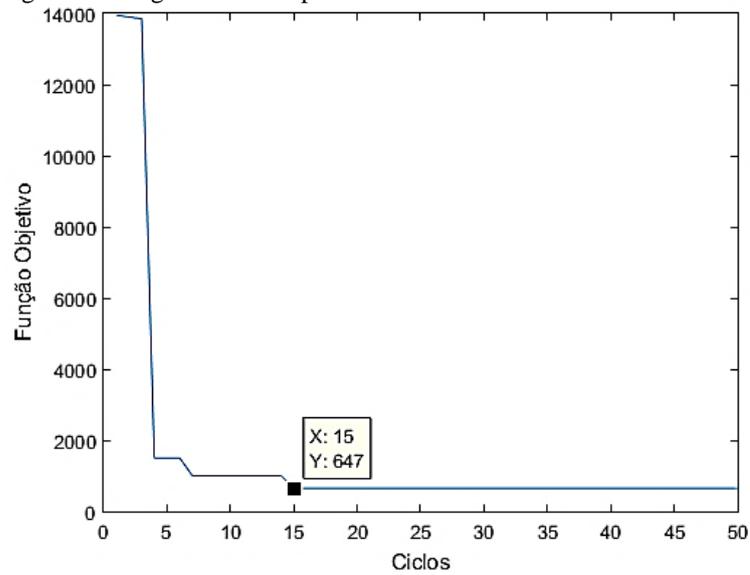


Figura 6.20: Convergência do algoritmo ACS para o sistema de 33 barras com limite de tensão de 0.95 p.u.



A partir da Tabela 6.4, é possível verificar que o método proposto em Lin e Chin (1988) restabeleceu apenas 8% da carga do sistema; enquanto que, a metodologia adotada por Zidan e El-Saadany (2011) restaurou 55%. Continuando a análise, percebe-se que a metodologia proposta, assim como visto em Borges (2012), restabeleceram 64% com uma perda de 97 kW.

7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

7.1 CONCLUSÕES

A proposta deste trabalho foi implementar um algoritmo baseado em colônia de formigas para solucionar o problema de restauração de redes elétricas de distribuição. Muitos autores propuseram solucionar esta questão utilizando diversos algoritmos, entre eles, o algoritmo colônia de formigas, no entanto, sua grande maioria utiliza o ACO em conjunto com outro método e/ou dispuseram apenas da versão mais simples do algoritmo, como a AS. Outros autores dispuseram da variante MMAS. Por consequência, este trabalho teve como objetivo implementar a variante ACS para solucionar o problema de restabelecimento de energia elétrica em redes de distribuição com o seguinte propósito: efetuar uma análise comparativa do algoritmo implementado com outros trabalhos encontrados na literatura para comprovar a eficácia do método proposto.

Nessa metodologia, denominada de Otimização por Colônias de Formigas, as formigas exploram o meio ambiente (rede de distribuição) e em cooperação vão à busca de uma solução que apresente o menor valor de potência não fornecida em conjunto com o menor número de manobras de chaveamento e menor perda do sistema restabelecido. Encontrar uma solução de boa qualidade atingindo valores viáveis dos itens já mencionados constituiu parte das diretrizes desse trabalho.

Para verificar o desempenho do algoritmo na solução do problema de restauração, foram utilizados sistemas de distribuição do IEEE de 16 e 33 barras. Os resultados dos algoritmos foram satisfatórios e de acordo com os resultados apresentados por bons trabalhos encontrados na literatura. Para as simulações feitas com o sistema de 16 barras o método proposto conseguiu efetuar a recomposição do sistema restaurando 100% das cargas sem atendimento a energia elétrica. Para o sistema de 33 barras, simulando 2 locais de falta consecutivos em pontos distintos, deixando por sua vez o total de 1.465 kW de potência não suprida, e, adotando um limite de tensão de 0,95p.u., o algoritmo restabeleceu 64% das cargas desenergizadas com apenas 97kW de perdas ativas.

Portanto, o algoritmo implementado nesse trabalho pode ser empregado como meio para solucionar os problemas de restauração em sistemas elétricos de distribuição. Os estudos comparativos podem servir como parâmetros para trabalhos futuros e podem ser empregados como importantes ferramentas na melhoria do desempenho do ACO nas soluções desses problemas.

7.2 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

- Efetuar a implementação da metodologia em linguagem orientada a objetos utilizando linguagem computacional eficiente como C++ ou Python;
- Aplicação do algoritmo baseados em otimização por colônia de formigas em sistemas trifásicos desbalanceados, utilizando fluxo de potência trifásico;
- Representação de Geração Distribuída (GD) no sistema, para auxílio inclusive do processo restaurativo;
- Consideração de corte de carga dos consumidores fora da área afetada pelo defeito.
- Combinar o Algoritmo de Formigas com outras metaheurísticas e aplicar na solução dos problemas abordados nesse trabalho;
- Criar uma rotina automática de otimização para obter os parâmetros do algoritmo como citado na página 51;
- Utilizar otimização multiobjetivo;
- Modelar cargas de outra forma que não seja de potência constante.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMASIFEN, J. C. C.; MANTOVANI, J. R. S.; ROMERO, R. **Algoritmos evolutivos dedicados à reconfiguração de redes radiais de distribuição sob demandas fixas e variáveis – estudo dos operadores genéticos e parâmetros de controle.** Revista Controle & Automação, Vol. 16, n. 3, 2005.
- ANEEL. **Nota técnica nº 0022/2011-SRD/ANEEL.** Brasília, 2011. Disponível em: www.aneel.gov.br.
- ANEEL. **Ranking de qualidade das distribuidoras de energia.** Brasília, 2016. Disponível em: www.aneel.gov.br.
- ARCANJO, D. N. **Metodologia multi-estágio para restabelecimento de sistemas elétricos de distribuição utilizando algoritmos bio-inspirados.** Tese de Mestrado. Juiz de Fora – MG, Brasil. Universidade Federal de Juiz de Fora, 2014.
- BALABANIAN, N.; BICKART, T. A.; SESHU, S. **Electrical network theory.** New York. Wiley, 1969.
- BARAN, M. E.; WU, F. F. **Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing.** IEEE Transactions on Power Delivery, v. 4, p.1401-1407, 1989.
- BIRATTARI, M., PAQUETE, L., STRUTZLE, T., & VARRENTRAPP, K. **Classification of metaheuristics and design of experiments for the analysis of components tech.** Rep. AIDA-01-05. 2001.
- BLUM, C.; ROLI, A. **Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison.** ACM Computing Surveys (CSUR), v. 35, n. 3, p. 268-308, 2003.
- BORGES, T. T. **Restabelecimento de sistemas de distribuição utilizando fluxo de potência ótimo.** Tese de Doutorado. Rio de Janeiro – RJ. Brasil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.
- BONABEAU, E.; DORIGO, M.; THÉRAULAZ, G. **From natural to artificial swarm intelligence.** Oxford University Press, 1999.
- CARVALHO, T. L. A. **Aplicação de algoritmos colônia de formigas na reconfiguração e alocação de bancos de capacitores em redes elétricas de distribuição.** Dissertação de Mestrado, UFBA, Salvador, 2015.
- CESPEDES, R. G. **New method for the analysis of distribution networks.** IEEE Transactions on Power Delivery, v.5, n.1, p.391-396, 1990.
- CHICCO, G. **Ant colony system-based applications to electrical distribution system optimization, ant colony optimization - methods and applications.** INTECH Open Access Publisher, 2011.

- CIVANLAR, SEYHAN, et al. **Distribution feeder reconfiguration for loss reduction**. IEEE Trans. Power Del.:(United States) 3.3, 1988.
- COLORNI, A; DORIGO, M; VITTORIO, M. **Ant system: optimization by a colony of cooperating agents**. Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions, vol 26, nº 1, p. 29-41, 1996.
- DORIGO, M.; CARO, G. D.; GAMBARDELLA, L. M. **Ant algorithms for discrete optimization**. Artificial Life, v.5, n.2, p.137–172, 1999.
- DORIGO, M.; GAMBARDELLA, L. M. **Ant colonies for the traveling salesman problem**. BioSystems, v.43, n.2, p.73–81, 1997a.
- DORIGO, M.; GAMBARDELLA, L. M. **Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem**. IEEE Transactions on Evolutionary computation, v.1 n.1, p.53-66, 1997b.
- DORIGO, M.; MANIEZZO, V.; COLORNI, A. **Ant system: optimization by a colony of cooperating agents**. IEEE Transaction of Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics, v.26, p.29-41, 1996.
- DORIGO, M.; STUTZLE, T. **Ant colony optimization**. MIT Press, 2004
- DORIGO; MARCO, M; BIRATTARI, T; STUTZLE, T. **Ant colony optimization-artificial ants as a computational intelligence technique**. Universit Libre de Bruxelles, IRIDIA Technical report Series, Belgium, 2006.
- DURVAL; BÉATRICE; JIN-KAO HAO. **Advances in metaheuristics for gene selection and classification of microarray data**. Briefings in bioinformatics 11.1: 127-141. 2010.
- FRAGA, M. C. P. **Uma metodologia híbrida colônia de formigas – busca tabu – reconexão por caminhos para resolução do problema de roteamento de veículos com janelas de tempo**. Dissertação de Mestrado em Modelagem Matemática e Computação, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.
- PEREIRA, F. S. **Reconfiguração ótima de sistemas de distribuição de energia elétrica baseado no comportamento de colônia de formigas**. Tese de Doutorado. São Paulo, Brasil, Universidade de São Paulo, 2010.
- FUKUYAMA, Y; CHIANG, H. **A parallel genetic algorithm for service restoration in electric power distribution systems**. International Joint Conference of the Fourth IEEE, International Conference on Fuzzy Systems and The Second International Fuzzy Engineering Symposium IEEE, p. 275-282, 1995.
- GUIMARÃES, M. A. N. **Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando algoritmos de busca de tabu**. 2005. 108f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2005.

- HAFFNER, S; PEREIRA, L. A; GASPERIN, L. **Modelo aproximado para representação de redes de distribuição de energia elétrica.** XVII Congresso Brasileiro de Automática, 2008.
- HAFFNER, S; GASPERIN, L. V; PEREIRA, L. A; BARRETO, L. **Alocação de bancos de capacitores em redes de distribuição de energia visando eliminar violações de tensão.** Revista Controle & Automação, São Paulo, vol 20, nº 4, 2009.
- HSIAO, Y.T.; CHIEN, C.Y. **Enhancement of restoration service in distribution systems using a combination fuzzy-GA method.** IEEE Transactions on Power Systems 15.4: 1394-1400, 2000.
- KARN, R; KUMAR, Y; AGNIHOTRI, G. **Development of aco algorithm for service restoration in distribution system.** International Journal on Emerging Technologies, Bhopal, p. 71-77, 2011.
- LEITE, L; COSTA, V. **Fluxo de potência continuado via equações de injeção de corrente.** Sba Controle & Automação, Campinas, Vol 14, nº 4, 2003.
- LUAN, W. P.; MALCOLM R. IRVING; JEREMY S. **Genetic algorithm for supply restoration and optimal load shedding in power system distribution networks.** IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution 149.2: 145-151, 2002.
- LIN, W. M; CHIN, H. C. **A new approach for distribution feeder reconfiguration for loss reduction and service restoration.** IEEE Transactions on Power Delivery 13.3, 1998.
- LING, L; GANG, W; SHAOXIAN, H; ZHIGWEI, L. **A distributed model for power system restoration based on ant colony optimization algorithm.** Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, IEEE/PES, Dalian, p. 1-5, 2005.
- LIU, C.C.; LEE, S. J.; VENKATA, S. S. **Na expert system operational aid for restoration and loss reduction of distribution systems.** IEEE Transactions on Power Systems, Vol.3, N. 2, 1988.
- LU, Z; DONG, Y. **Distribution system restoration based on improved binary particle swarm optimization.** Automation of Electric Power Systems, v. 24, p. 007, 2006.
- MATOS, M. A; MELO, P. **Multiobjective reconfiguration for loss reduction and service restoration using simulated annealing.** Electric Power Engineering, PowerTech Budapest 99, International Conference IEEE, p. 213, 1999.
- MATHIAS-NETO, W. P.; LEÃO, F. B.; MANTOVANI, J. R. S. **Distribution system restoration in a dg environmet using a heuristic constructive multi-start algorithm.** IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, pp. 86 – 91, São Paulo, Brazil, 2010.
- MEDEIROS, G. F.; KRIPKA, M. **Algumas aplicações de métodos heurísticos na otimização de estruturas.** Revista CIATEC – UPF, v.4, p.19-32, 2012.

- MELIÁN, B.; PÉREZ, J. A. M.; VEGA, J. M. M. **Metaheuristics: a global view**. Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial (Asociación Española de Inteligencia Artificial), v. 7, n. 19, p. 7-28, 2003.
- MONTICELLI, A. J. **Fluxo de carga em redes de energia elétrica**. São Paulo: Edgard Blucher, 1983.
- MORELATO, A. L.; MONTICELLI, A. J. **Heuristic search approach to distribution system restoration**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 4, n. 4, p. 2235-2241, 1989.
- PEREIRA JÚNIOR, B. R.; COSSI, A. M.; MANTOVANI, J. R. S. **Proposta de uma metodologia baseada em busca de tabu para restauração automática de sistemas de distribuição de energia elétrica**. Congresso Brasileiro de Automática, CBA, 2012.
- PEREIRA, F. S. **Reconfiguração ótima de sistemas de distribuição de energia elétrica baseado no comportamento de colônia de formigas**. Tese de Doutorado. São Paulo, Brasil, Universidade de São Paulo, 2010.
- RIBEIRO, C.C. **Metaheuristics and applications**. In Advanced School on Artificial Intelligence, Portugal, 2002.
- SILVA, L. G.; WESTZ et al. **Optimised placement of control and protective devices in electric distribution systems through reactive tabu search algorithm**. Electric Power Systems Research, v. 78, n. 3, p. 372-381, 2008.
- SU, C. T; LII, G. R. **"Reliability design of distribution systems using modified genetic algorithms"**, Elect. Power Syst. Res., vol. 60, pp. 201-206, 2002.
- SANCA, H. S. **Reconfiguração Ótima de sistemas de distribuição de energia elétrica aplicando o algoritmo MAX-MIN Ant System**. 2013. 110f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2013.
- SANTOS NETO, M. P.; FERREIRA, N. R. **Reconfiguração de sistemas elétricos de distribuição utilizando algoritmo de formigas com método de aceleração**. In: V Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Paraná, 2014.
- SHIN, DONG-JOON, et al. **Optimal service restoration and reconfiguration of network using genetic-tabu algorithm**. Electric Power Systems Research 71.2 : 145-152, 2004.
- SILVA, L; PEREIRA, R. A. F; ABBAD, J; MANTOVANI, J.R.S. **Optimised placement of control and protective devices in electric distribution systems through reactive tabu search algorithm**. Electric Power Systems Research, Elsevier, vol 78, p. 372-381, 2008.
- SOUZA, B. A; SILVA, J. P. S; FERREIRA, N. R. **Configuração ótima de redes de distribuição aplicando um algoritmo colônia de formigas**. IEEE PES Transmission and Distribution Latin America Conference and Exposition, São Paulo, 2010.
- SOUZA, B. A; FERREIRA, N. R. **Aplicação de algoritmo colônia de formigas na reconfiguração de redes elétricas de distribuição**. Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. São João Del Rei – MG, p. 1-6, 2011.

- SOUZA, R. G. **Arquitetura multiagente baseada em nuvem de partículas para hibridização de metaheurísticas.** Tese de Doutorado em Ciência da Computação, UFRN, Natal – RN, 2013.
- STUTZLE, T.; HOOS, H. H. **MAX-MIN Ant System.** *Future generation computer systems*, v.16, n.8, p.889–914, 2000.
- STUTZLE, T.; HOOS, H. **MAX-MIN Ant System and local search for the traveling salesman problem.** *Proceedings Of 1997 Ieee International Conference On Evolutionary Computation (ICEC '97)*, Indianapolis, In, p.309-314, abr. 1997.
- SUCUPIRA, I. R. **Um estudo empírico de hiper-heurísticas.** Dissertação de Mestrado em Matemática e Estatística. Instituto de Matemática e Estatística, USP, São Paulo, 2007.
- TOUNE, S; FUDO, H; GENJI, T; FUKUYAMA, Y; NAKANISHI, Y. **A reactive tabu search for service restoration in electric power distribution systems.** In *Evolutionary Computation Proceedings, IEEE World Congress on Computational Intelligence, IEEE International Conference*, p. 763-768, 1998.
- WATANABE, I. **An aco algorithm for service restoration in power distribution systems.** *Evolutionary Computation, Congress IEEE, Japão*, vol. 3, p. 2864-2871, 2005.
- XIAOPING, C; XUEPING, G. **Determination of the load restoration plans based on genetic simulated annealing algorithms.** *Transactions of China Electrotechnical Society, CNKI Journal, China*, 2009.
- YANG, L; YING, W; LU, W. **An Improved ACO algorithm for service restoration in power distribution systems.** *Power and Energy Engineering Conference, Asia and Pacific, IEEE/PES. Wuhan*, p. 1-4, 2009.
- Zidan, Aboelsood, and E. F. El-Saadany. **Service restoration in balanced and unbalanced distribution systems with high DG penetration.** 2011 IEEE power and energy society general meeting. IEEE, 2011.

APÊNDICE A

DADOS DOS SISTEMAS TESTADOS

A1 Sistema de 16 barras

Ramo	De	Para	Resistência do ramo (pu)	Reatância do ramo (pu)	Carga barra final (MW)	Carga barra final (Mvar)	Capacitor barra final (Mvar)
1	1	2	0,075	0,1	2	1,6	0
2	2	3	0,08	0,11	3	1,5	1,1
3	2	4	0,09	0,18	2	0,8	1,2
4	4	5	0,04	0,04	1,5	1,2	0
5	1	6	0,11	0,11	4	2,7	0
6	6	7	0,08	0,11	5	3	1,2
7	6	8	0,11	0,11	1	0,9	0
8	7	9	0,11	0,11	0,6	0,1	0,6
9	7	10	0,08	0,11	4,5	2	3,7
10	1	11	0,11	0,11	1	0,9	0
11	11	12	0,09	0,12	1	0,7	1,8
12	11	13	0,08	0,11	1	0,9	0
13	13	14	0,04	0,04	2,1	1	1,8
14	3	9	0,04	0,04			
15	8	12	0,04	0,04			
16	5	14	0,09	0,12			

A2 Sistema de 33 barras

Ramo	De	Para	Resistência do Ramo (Ω)	Reatância do ramo (Ω)	Carga barra final (kW)	Carga barra final (kVar)
1	33	1	0,0922	0,047	100	60
2	1	2	0,493	0,2511	90	40
3	2	3	0,366	0,1864	120	80
4	3	4	0,3811	0,1941	60	30
5	4	5	0,819	0,707	60	20
6	5	6	0,1872	0,6188	200	100
7	6	7	0,7114	0,2351	200	100
8	7	8	1,03	0,74	60	20
9	8	9	1,044	0,74	60	20
10	9	10	0,1966	0,065	45	30
11	10	11	0,3744	0,1238	60	35
12	11	12	1,468	1,155	60	35
13	12	13	0,5416	0,7129	120	80
14	13	14	0,591	0,526	60	10
15	14	15	0,7463	0,545	60	20
16	15	16	1,289	1,721	60	20
17	16	17	0,732	0,544	90	40
18	1	18	0,164	0,1565	90	40
19	18	19	1,5042	1,3554	90	40
20	19	20	0,4095	0,4784	90	40
21	20	21	0,7089	0,9373	90	40
22	2	22	0,4512	0,3083	90	50
23	22	23	0,898	0,7091	420	200
24	23	24	0,896	0,7011	420	200
25	5	25	0,203	0,1034	60	25
26	25	26	0,2842	0,1447	60	25
27	26	27	1,059	0,9337	60	20
28	27	28	0,8042	0,7006	120	70
29	28	29	0,5075	0,2585	200	600
30	29	30	0,9744	0,963	150	70
31	30	31	0,3105	0,3619	210	100
32	31	32	0,341	0,5301	60	40
33	7	20	2	2		
34	8	14	2	2		
35	11	21	2	2		
36	17	32	0,5	0,5		
37	24	28	0,5	0,5		