



XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2008 - 06 a 10 de outubro

Olinda - Pernambuco – Brasil

Reconfiguração da Rede de Distribuição da COSERN para Recomposição do Serviço¹

Rudson Oliveira	José Luiz da Silva Jr.	J. Tavares de Oliveira
COSERN	DEE-UFRN	DEE-UFRN
rudson.oliveira@cosern.com.br	joseluiz@ct.ufrn.br	jtavares@ct.ufrn.br
Estefane G. M. de Lacerda	Rafaela Vilela França	M. Firmino de Medeiros Jr.
PPgEEC-UFRN	PPgEEC-UFRN	DCA-UFRN
estefane@dca.ufrn.br	rafaelavf@dca.ufrn.br	firmino@dca.ufrn.br

Palavras-chave

Recomposição de serviço
Reconfiguração de redes de distribuição
Metaheurísticas
Colônia de formiga
Métodos de otimização

Resumo

Este trabalho descreve um método para o problema da restauração do abastecimento elétrico para seções isoladas de uma rede de distribuição. Este problema é conhecido como problema de recomposição de serviço. A recomposição é realizada por meio de operações de chaveamento (i.e., pela abertura e fechamento de chaves) que modificam a topologia da rede. Assim, seções isoladas podem ser alimentadas por circuitos alternativos. Um algoritmo de otimização de colônia de formiga é proposto, a fim de minimizar o número de operações de chaveamento. Experimentos com um sistema de distribuição de 130-barras foram realizados e os resultados correspondentes são apresentados neste artigo.

1. Introdução

As empresas distribuidoras de energia elétrica possuem atualmente um elevado grau de compromisso e responsabilidade com a manutenção de um elevado padrão de qualidade nos serviços prestados aos usuários consumidores, seja por imposições legais do órgão regulador, seja pela necessidade de preservação da imagem frente a esses consumidores ou, ainda, pelos cuidados que elas devem ter com a saúde financeira.

Neste contexto, seus centros de operação adquiriram uma enorme importância, pelas operações neles realizadas. Operações essas que deixaram de ser rotineiras e que passaram a exigir rapidez e precisão na tomada de decisões sobre as constantes alterações que ocorrem nas configurações dos sistemas de distribuição, visando assegurar um desempenho cada vez mais eficiente.

¹. Os autores agradecem à COSERN pelo suporte financeiro, bem como pelo apoio técnico e co-participação na sua realização, tendo em vista que este trabalho é parte integrante do programa de P&D da Empresa.

É fundamental, portanto, que esses centros disponham de ferramentas que propiciem aos seus operadores a realização de manobras com a segurança necessária para as equipes de manutenção e com redução de tempo de atendimento aos consumidores que ficaram privados do fornecimento de energia elétrica.

Os antigos planos de manobras, manuais construídos a partir do diagrama unifilar da uma rede de distribuição primária, que indicavam os procedimentos necessários ao operador, foram substituídos por importantes ferramentas computacionais que informam, com a rapidez, a precisão e a segurança necessárias, os passos que devem ser adotados pelos operadores do sistema, sempre obedecendo aos critérios técnicos de qualidade e de continuidade do fornecimento e aos critérios econômicos de minimização de custos, além de outros critérios considerados relevantes no seu desenvolvimento.

Quaisquer que sejam as metodologias adotadas no desenvolvimento dessas ferramentas, deve-se ter em mente que o primeiro passo a ser adotado é o da isolação daquelas barras do sistema que devem permanecer desenergizadas enquanto perdurar a manutenção, seja em decorrência de algum distúrbio no sistema de distribuição ou em caso de manutenções preventivas.

Os operadores de Sistemas de Distribuição devem restaurar o abastecimento elétrico tão rapidamente quanto possível. Em muitas situações práticas, tomam-se decisões imediatamente, confiando em experiência passada sobre operações de chaveamento (SHIMOHAMMADI, 1992). Por causa disso, não se tem, em geral, uma preocupação com a otimização do número de operações. Não obstante, na maioria dos sistemas de distribuição, o número de operações de chaveamento é um requisito essencial, pois muitas chaves são operadas manualmente e os alimentadores operam proximamente à capacidade de transmissão. O problema de minimização do número de operações de chaveamento é um problema de programação não-linear inteira mista (AOKI; SATOH; ITOH; KUWABARA; KANEZASHI, 1988), para o qual não há um método para encontrar sua solução exata (exceto para exemplos de problemas de pequeno porte).

Os algoritmos denominados de Metaheurísticas têm obtido sucesso considerável em problemas dessa natureza. Meta-heurísticas como o Algoritmo Genético, Tabu Search, e Simulated Annealing foram propostos para solucionar o problema de restauração do fornecimento de energia a trechos de rede isolados (recomposição de serviço), em decorrência de defeitos (TOUNE; FUDO; GENJI; FUKUYAMA; NAKANISHI, 2002; NARA; SHIOSE; KITAGAWA; ISHAHARA, 1992; JEON; KIM, 2000). Outras publicações apresentam algoritmos de Otimização por Colônia de Formigas (Ant Colony Optimization – ACO) para reconfiguração de redes (SUA; CHANGB; CHIOU, 2005). A maioria desses trabalhos, entretanto, enfatizam a otimização de objetivos outros, como por exemplo, a minimização das perdas de energia e balanceamento de carregamento entre alimentadores.

Este trabalho apresenta um algoritmo de ACO para resolver o problema específico de recomposição do serviço, com a minimização do número de operações de chaveamento (embora possa ser adaptado para otimizar outro objetivo).

Os algoritmos de ACO foram inspirados no comportamento natural de colônias de formiga e foi aplicado com sucesso a inúmeros problemas difíceis de otimização, incluindo o problema do caixeiro-viajante (TSP) (DORIGO; STÜTZLE, 2004). As formigas artificiais são simples agentes implementando heurísticas construtivas. A idéia básica de heurísticas construtivas é construir soluções, de forma incremental, adicionando, em cada etapa, um componente da solução a uma solução parcial até que uma solução completa seja formada. A cooperação é o elemento chave de algoritmos de ACO uma vez que boas soluções são resultantes da interação cooperativa de diversas formigas artificiais durante a construção das soluções. Uma motivação para usar algoritmos de ACO neste trabalho se prende ao fato de já existir, na literatura de Sistemas de Potência, eficientes heurísticas construtivas para reconfiguração de redes (SHIMOHAMMADI, 1992; SUA; CHANGB; CHIOU, 2005).

O método, descrito em Shimohammadi (1992) é inicializado com todas as chaves fechadas e, em

cada etapa, abre-se uma única chave. Uma proposição de solução se completa no instante em que a rede se torna radial. Mcdermott, Drezga e Broadwater (1999), descrevem este esquema invertido. Isto quer dizer, o método começa com todas as chaves (operáveis) abertas e, em cada etapa, fecha-se uma única chave, até que todas as cargas estejam atendidas, sem, entretanto, construir qualquer laço de circuito.

Apesar de sua eficiência, esses métodos não estão aptos a encontrar o ótimo global porque eles são algoritmos *gulosos*. O algoritmo de ACO aqui proposto usa o mesmo esquema de abertura de chave apresentado em Shimohammadi (1992), mas usa uma informação heurística diferente e computacionalmente barata para escolher chaveamentos. O ACO proposto confia na cooperação entre formigas para guiar a abertura de chaves, de maneira a assegurar a *visitação* de diferentes regiões do espaço de busca. Este artigo é organizado como segue. As hipóteses e restrições utilizadas na pesquisa são formuladas na seção 2. A seção 3 apresenta a metodologia e o algoritmo usados para isolar as barras sob defeito. Um algoritmo simplificado para reconfiguração de redes é apresentado na seção 4. Na seção 5 é apresentado o problema da otimização da reconfiguração de redes. A seção 6 apresenta uma curta introdução ao algoritmo de Colônia de Formigas - ACO. O algoritmo de ACO proposto é apresentado na Seção 7. A Seção 8 apresenta resultados experimentais. Finalmente, na Seção 9, apresentam-se as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2. Hipóteses Norteadoras da Pesquisa

Utilizando-se da rede elétrica digitalizada e georeferenciada da concessionária contendo todas as informações do sistema, considerando a mesma atualizada, equipamentos com medição em tempo real e histórico de consumo das unidades de cargas, tentar-se-á desenvolver um sistema capaz de avaliar em um determinado instante, durante uma interrupção do fornecimento de energia elétrica de um trecho determinado, a melhor configuração do sistema para transferência de cargas, assim como a seqüência de chaveamentos que o operador do sistema elétrico tem que realizar para a normalização mais rápida da interrupção.

Algumas restrições precisam ser observadas e respeitadas:

I- Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC)/Duração de Interrupção por Unidade Consumidora (DIC);

Existindo mais de um trecho que possa ser normalizado, após isolado o defeito, considerar prioritário a normalização daquele em que o DEC estiver com meta mais comprometida. Quando DEC não for fator determinante, considerar se existem unidades consumidoras com DIC comprometido.

II- Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC)/ Frequência de Interrupção por Unidade Consumidora (FIC);

Existindo mais de uma opção de chaveamento para normalização do sistema, e as metas de FEC do trecho que assumirá a cargas estejam comprometidas, considerar prioritário aquele em que o chaveamento possa realizar-se com cargas. Quando FEC não for fator determinante, considerar se existem unidades consumidoras com FIC comprometido.

III- O nível de tensão do fornecimento de energia elétrica deve satisfazer limites de variação definidas na portaria 047 de 17 de abril de 1978 do DNAEE;

As cargas que forem transferidas devem ser supridas com nível de tensão que satisfaça aos limites de qualidade.

IV- A interrupção no fornecimento de energia elétrica ocasiona diminuição na receita da concessionária;

Trechos com cargas em que o consumo seja mais acentuado, devem ser normalizados mais rapidamente.

V- Hospitais e consumidores com necessidades de fornecimento de energia ininterruptos; Prioridade de normalização de trechos que atendam a consumidores especiais e hospitais.

VI- Carregamento e capacidade de carga dos trechos envolvidos na contingência;
A estimativa de carga dos trechos envolvidos na contingência ocorrida no sistema elétrico deve ser considerada, bem como a curva de carga estimada. O sistema deve poder indicar se a carga a ser normalizada sobrecarregará trecho supridor e se existe restrições de horário.

As restrições apontadas acima devem ser avaliadas e combinadas quando tiverem grande influência nos trechos envolvidos, embora em muitos casos prevaleçam somente uma ou duas dessas restrições.

O funcionamento do sistema ocorrerá em tempo real, de maneira que, para uma interrupção no fornecimento de energia na rede de distribuição, o sistema apresentaria um plano de manobra considerando as restrições mencionadas anteriormente. Com isto, espera-se que a atuação do operador do sistema seja agilizada e o sistema fique configurado de forma a não comprometer a qualidade no fornecimento de energia.

Espera-se com este trabalho diminuir o tempo de interrupção no fornecimento de energia, garantir a qualidade do fornecimento e otimizar a ação do operador, de forma a agilizar os procedimentos de recomposição. Como consequência, pretende-se conseguir uma diminuição de perda de faturamento, dotar o centro de operação com plano de contingência otimizado, melhorar a qualidade do fornecimento de energia e os índices de avaliação da concessionária.

3. Isolação do Defeito

Os sistemas de distribuição são constituídos por alimentadores aéreos, normalmente radiais, com vários dispositivos de proteção (disjuntores, religadores, seccionadores e chaves fusíveis) e de manobra (chaves seccionadoras manuais ou automáticas, para operação sob carga, ou sem carga).

Em caso de saída por defeitos ou em casos de manutenção, um ou mais trechos de um alimentador precisam ser isolados. Os outros trechos podem ser energizados através do próprio alimentador, ou através de outros alimentadores, abrindo-se as chaves de proteção e/ou manobra que ficam a montante e a jusante do trecho sob manutenção ou sob defeito e, logo em seguida, fechando-se outras chaves do próprio alimentador ou de outros alimentadores que se interligam com o que está sob intervenção das equipes de manutenção, o que provavelmente permitirá uma redução significativa do número de consumidores prejudicados pela falta de energia elétrica.

Se os dispositivos de proteção estão coordenados, quando ocorre um defeito em um alimentador radial, o dispositivo mais próximo do local onde aconteceu este defeito deverá atuar, desenergizando todos os trechos do alimentador que se encontram a jusante desse dispositivo. Ocorre que, entre o dispositivo e o local da ocorrência do defeito, poderá existir uma chave de manobra manual ou automática. Será esta chave, e não o dispositivo de proteção, a primeira a ser aberta para isolar o defeito. Após a abertura dessa chave, o dispositivo poderá novamente ser fechado, o que já provocará o atendimento a alguns consumidores que ficaram prejudicados.

3.1. Metodologia utilizada

Para que a metodologia possa ser adotada, os dados de trechos dos alimentadores deverão conter a informação da existência da chave (normalmente aberta – NA ou normalmente fechada – NF). Em caso de inexistência de chave, deverá ser informado que o trecho é “permanentemente fechado” – PF.

Utilizou-se como exemplo a rede apresentada em Shimohammadi (1992), pelo grau de dificuldade que ela oferece para isolação das barras. Além desta rede, o sistema foi testado em uma rede mais real com duas subestações de três alimentadores em cada SE, com várias chaves de interligação entre os alimentadores.

Para iniciar a busca das barras pertencentes a trechos que ficarão isolados enquanto ocorre a manutenção do trecho defeituoso, deve-se informar inicialmente qual a subestação, qual o alimentador, qual a barra de início e a barra final do trecho onde se deseja fazer a intervenção.

O número de ligações de cada barra deve ser inicialmente determinado porque se constitui em um instrumento de controle do algoritmo na inclusão ou não de barras de geração na “relação de barras sob defeito” e na sinalização de que uma barra deve ser incluída nessa mesma relação, como se perceberá a seguir.

A partir da barra inicial do trecho sob defeito, procede-se uma busca a montante, localizando-se o primeiro trecho com chave NF. Se a barra de início do trecho que contém a chave é de geração, inclui esta barra na “relação de barras sob defeito” se o número de ligações dessa barra é maior que 1. Isto porque, mesmo sendo barra de geração ligada a um disjuntor ou religador, por exemplo, poderão existir outros alimentadores ligados à mesma barra de geração. A figura 1 mostra bem o caso em que um único alimentador divide-se em vários ramos. Observe o trecho 0-1 do alimentador único. A partir da sua barra final, partem três ramos. A barra de geração não poderia ser incluída na relação de barras excluídas porque ela alimenta os vários ramos.

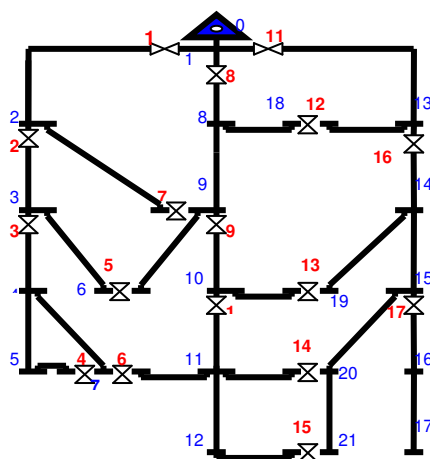


Figura 1 – Rede para exemplificar a isolação de um defeito

No caso da chave NF ser apenas uma chave de manobra, pode-se, opcionalmente, continuar a busca a montante, até que se encontre e se identifique a chave de proteção que deverá ter atuado, se a proteção é coordenada, em função de um defeito.

Em seguida, inclui-se o número e o tipo de chave ‘NF’ que deve ser aberta na “relação de chaves a abrir” para isolar os trechos que estão sob defeito. Observe-se que, mesmo não sendo este o propósito da metodologia, essa relação tem que ter início neste momento, pois obrigatoriamente essas chaves deverão ser abertas “a priori”, qualquer que seja o processo ou método adotado para a reconfiguração da rede. Supondo que ocorreu o defeito no trecho 13-14, a chave 16 é a chave que vai isolar o trecho a jusante desse defeito.

Claro que, sendo a chave NF uma chave a abrir, a barra final do trecho a que pertence a chave deverá ser incluída na “relação de barras sob defeito”. Assim sendo, a barra de número 14 será incluída nessa relação.

A partir da barra final do trecho sob análise, faz-se uma busca em largura nos trechos a jusante que partem dessa barra, identificando as chaves NA ou NF e os trechos que são PF. Os trechos analisados serão os trechos 14-15 e 14-19.

Se a chave do trecho for NA, decrementa-se uma ligação no número de ligações da barra considerada e verifica outro trecho a partir da mesma barra. Se a chave for NF, inclui-se o número e o tipo de chave na “relação de chaves a abrir” para isolar o defeito e decrementa-se uma ligação no número de ligações da barra. Se a chave no trecho sob análise é PF, acrescenta-se a barra de final de trecho na “relação de barras sob defeito”. Dessa forma a primeira barra a ser acrescentada será a barra 15.

Verifique-se que barras que foram inicialmente incluídas na “relação de barras sob defeito” ainda não foram analisadas. Sendo assim, tem-se que analisá-las a partir do número de ligações de cada uma delas. Ou seja, cada uma delas será transformada em uma barra de início de trecho e cada trecho que dela parte, deve sofrer a mesma avaliação.

A princípio, pode-se imaginar que o processo estaria concluído com essa análise. Entretanto, há de se considerar que a barra final de um trecho que possui chave NF pode estar ligada a um trecho que possua uma chave NA e que este último se interliga com uma barra que já se encontra na “relação de barras sob defeito”, ou com outro alimentador. Neste caso, a barra, ou as barras que estão entre a chave NF e a chave NA têm que ser adicionadas à “relação de barras sob defeito”. Não se adotando esse procedimento, corre-se o risco de barras sob defeito serem energizadas por outro trecho ou outro alimentador.

Deve-se considerar ainda que a isolação de barras é feita mesmo no caso de trechos com redundância, ou trechos paralelos, sendo um com uma chave NA e outro com chave NF. Cita-se o exemplo da Figura 1, onde se encontram os trechos 4-5, 4-7 e 5-7. A isolação será correta mesmo com defeitos em qualquer dos trechos.

Desta forma, deve-se criar uma “relação de barras isoladas auxiliar” com as barras finais dos trechos que possuem chaves NF e, a partir dessa nova relação, verificar se existe algum trecho que se interliga com barra sob defeito, contando sempre o número de ligações de cada uma delas. Repete-se o processo, considerando cada uma dessas barras como barra de início.

Findo este processo, a “relação de barras sob defeito” estará finalizada. A “relação de chaves a abrir” deverá ser complementada pelo processo adotado para promover a reconfiguração da rede, qualquer que seja o processo.

3.2 Algoritmo

Esse algoritmo descreve, sucintamente, os passos para implementação de uma rotina que permita a isolação das barras defeituosas de um alimentador.

1. Contar o número de ligações de cada barra do alimentador sob defeito.
2. Localizar o trecho onde ocorreu o defeito. Se não encontrar, escreve a mensagem “O ALIMENTADOR NAO TEM O TRECHO ESPECIFICADO. PROGRAMA ENCERRADO”.
3. A partir do trecho defeituoso, localizar o primeiro trecho com chave ‘NF’. Verifica se a barra de início é de geração, incluindo-a, se for o caso, na “relação de barras sob defeito”.
4. Incluir o número e o tipo de chave ‘NF’ que deve ser aberta na relação de chaves a abrir para isolar os trechos que estão sob defeito.
5. Incluir a barra final do trecho na relação de barras sob defeito.
6. A partir da barra final do trecho sob análise, fazer uma varredura nos trechos que partem dessa barra, identificando as chaves ‘NA’ ou ‘NF’ e os trechos que são ‘PF’.
 - 6.1. Se a chave do trecho é ‘NA’, verificar outro trecho a partir da mesma barra.
 - 6.2. Se a chave é ‘NF’, incluir o número e o tipo de chave na relação de chaves a abrir para isolar o defeito.
 - 6.3. Se a chave no trecho sob análise é ‘PF’, acrescentar a barra de final de trecho na “relação de barras sob defeito. Incluir a barra de final de trecho na relação de barras a isolar. Se, neste trecho com chave ‘PF’, o número de ligações é igual a 1, faz-se a barra de início igual à barra final e reinicia-se o passo 6.
7. As barras incluídas na relação de barras sob defeito e que possuem no. de ligações maior que 1, são transformadas em barras a pesquisar. Volta-se ao passo 6.
8. Varre a relação de barras isoladas e cria uma relação de barras isoladas auxiliar (ibaux1) com as barras de final de trecho dos trechos com chaves ‘NF’. Para cada barra acrescentada à relação de barras auxiliares, conta-se o número de ligações.

9. A partir da barra final do trecho com chave 'NF', se o próximo trecho a jusante possui uma chave 'NA' que se interliga com uma barra sob defeito, então se inclui essa barra final na "relação de barras sob defeito" e volta ao passo 6.
10. Se o trecho não possui chave 'NA', então se inclui a barra de final de trecho na relação de barras auxiliares, conta-se o número de ligações e se volta ao passo 9.
11. Identificar qual das barras, na relação de barras auxiliares, ainda não foi verificada e voltar ao passo 9.
12. Após a verificação de todas as barras auxiliares, assegurar que estas barras não possuem qualquer ligação através de chaves de interligação ou de chaves 'NA' com o restante do alimentador. Não existindo, acrescentar a lista à "relação de barras sob defeito".
13. Imprimir a relação de barras sob defeito.

Em todos os métodos de reconfiguração de redes de distribuição, é fundamental aplicar o processo de identificação e isolamento de barras que ficarão sob manutenção para possibilitar uma rápida aplicação desses métodos e facilitar o trabalho dos despachantes dos centros de distribuição. Pode ser utilizado tanto em redes radiais, como em redes radiais com socorro, com apenas um alimentador, com vários alimentadores ou várias subestações. Este método foi testado para várias redes base e apresentou resultados satisfatórios em todos eles, constituindo-se em um processo rápido e de fácil implementação em qualquer linguagem de programação.

4. Algoritmo Simplificado

Problemas de recomposição, em que poucas possibilidades de chaveamento estão presentes na rede (poucos pontos de *encabeçamento* e transferência de carga) podem ser tratados através de um algoritmo simplificado, como o especificado a seguir:

1. Identificar e localizar a chave acionada que eliminou o defeito;
2. Localizar o ponto de defeito e isolar o trecho defeituoso;
3. Localizar as chaves que possibilitam a reenergização do sistema-ilha não suprido;
4. Estimar a curva de carga do sistema-ilha, a partir da curva de carga prevista para o alimentador defeituoso;
5. Para o tempo estimado para eliminação do defeito (conserto), executar um cálculo de fluxo de carga, para cada intervalo de tempo discretizado, e para cada topologia resultante de reenergização por chaveamento simples (variante de chaveamento);
6. Testar, para cada variante de chaveamento o atendimento aos limites operacionais de tensão e de corrente admissível. A corrente admissível de cada trecho do alimentador deverá ser definida de acordo com a base de proteção ajustada para o trecho; na falta desta, considerar-se-á o seu limite térmico.
7. Caso existam soluções factíveis identificadas no passo (6), atribuir uma nota para cada uma delas e exibir as melhores como alternativas de solução, para que o operador decida ter aquele que lhe inspira maior confiança;
8. Para as soluções infactíveis identificadas no passo (6), deve-se avaliar o acréscimo de carga que cada ponto (chave) capaz de efetuar a reenergização pode assumir, sem violar restrições operacionais. No caso de existirem apenas variantes de chaveamento simples infactíveis, deve-se enumerar as alternativas de divisão do sistema-ilha em dois, quer através de chaves reais existentes, quer através de chaves virtuais (abertura de "pulos") previamente identificadas.
9. Adotar algoritmo para busca de soluções com variantes de chaveamento com duplo acionamento, em substituição ao passo (5) e adotar os passos seguintes, repetindo esses procedimentos, com o número de chaveamentos aumentado em uma unidade, até que uma solução factível seja encontrada.

Naturalmente, problemas com muitas possibilidades (variantes de chaveamento) devem ser tratados

através de métodos de busca mais sistemáticos, como por exemplo as metaheurísticas.

5. Formulação do Problema de Otimização

O problema de recomposição do serviço consiste em reenergizar instalações de clientes consumidores, cujo suprimento de energia foi interrompido, em decorrência de algum defeito na rede de distribuição. Como proposição da pesquisa, na qual resultou o presente trabalho, além da referência [10], o problema foi reformulado, de maneira a atender a um objetivo adicional, que consiste em minimizar n_{ops} , o número de operações de chaveamento. Isto é:

$$\text{minimizar } f = n_{ops} \quad (1)$$

Executando operações de chaveamento, a topologia da rede é modificada e requisitos adicionais devem ser observados, de maneira que restrições operacionais sejam respeitadas. Para tratar com estas restrições, alguns termos de penalidade são adicionados à função objetivo. Assim, o problema de otimização é ampliado para:

$$\text{Minimizar } f = n_{ops} + \lambda_c g_c + \lambda_v g_v \quad (2)$$

onde g_c e g_v são penalidades associadas à violação de capacidade de corrente e queda de tensão, respectivamente. λ_c e λ_v são coeficientes de penalidade. Essas penalidades são dadas por:

$$g_c = \sum_{k=1}^{n_{ramos}} \max(|I_k| - I_{(k,max)}, 0)^2 \quad (3)$$

$$g_v = \sum_{k=1}^{n_{nós}} \left[\max(|V_k| - V_{máx}, 0)^2 + \max(V_{\min} - |V_k|, 0)^2 \right] \quad (4)$$

onde, n_{ramos} , $n_{nós}$ são o número de ramos e o número de nós da rede de distribuição; $|I_k|$ e $I_{(k,max)}$ são respectivamente a corrente e a corrente máxima admissível do ramo k ; $|V_k|$ é o módulo da tensão na barra k ; V_{\min} , V_{\max} são, respectivamente, os limites mínimo e máximo de tensão admissíveis nas barras. Note que os termos de penalidade crescem, quando as restrições são violadas e eles são iguais a zero, quando as restrições não são violadas.

6. Otimização via Colônia de Formigas

Uma formiga real começa a busca por fonte de comida vagueando aleatoriamente até encontrar o alimento. Depois disso, retorna a sua colônia, depositando feromônio (uma substância química) sobre o trajeto P entre a colônia e a fonte do alimento. Se novas formigas encontram o trajeto P , elas seguem o trajeto P com uma determinada probabilidade de acordo com o nível do feromônio deixado no trajeto. Essas formigas reforçam o trajeto P depositando mais feromônio em P . Futuras formigas escolherão esse trajeto com mais elevada probabilidade, devido ao aumento do seu nível de feromônio.

O algoritmo ACO imita esse comportamento, com as formigas artificiais caminhando em torno de um grafo, representando componentes de solução do problema em consideração. Andando em torno do grafo, a formiga constrói uma solução candidata ao problema. Isto quer dizer, em cada etapa, a formiga caminha entre dois nós adjacentes do grafo e adiciona um componente da solução à solução parcial. Este processo termina quando a solução está completamente construída. Esse grafo é

comumente chamado *grafo de construção*. Em cada nó do grafo, a formiga toma uma decisão probabilística, a fim de escolher o próximo nó para ir. Esta decisão depende de dois tipos de informação: i) o nível de feromônio (representando o desejo de um componente da solução) e ii) a *informação heurística* (representando, a priori, informação sobre o problema ou informação de tempo corrido fornecido por uma fonte, diferente das formigas). Assim que as formigas construíram sua solução, elas retornam ao longo da trilha (isto é, o trajeto) usada para construir a solução e nele depositar o seu feromônio. Um algoritmo de ACO básico é mostrado na Figura 2.

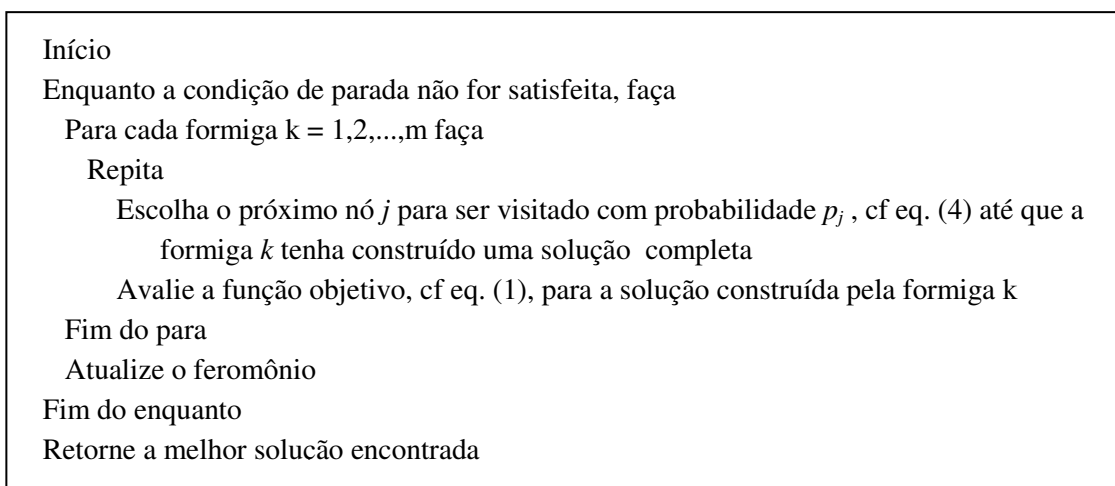


Figura 2 – Algoritmo de Otimização via Colônia de Formigas

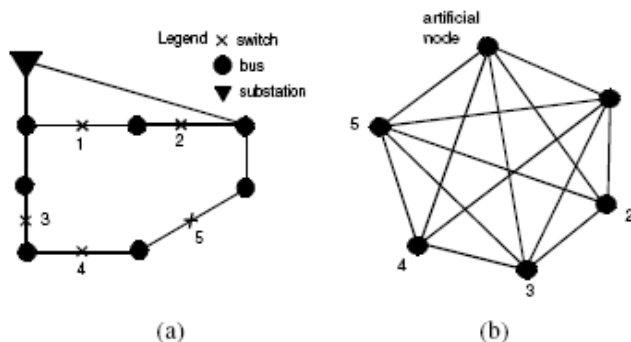


Figura 3 – (a) rede de distribuição e (b) o *grafo de construção* associado.

De acordo com o algoritmo ACO, as formigas andam nos nós do grafo de construção. Em cada nó visitado, a chave correspondente é aberta. Se uma formiga, começando pelo nó artificial, visitar o nó 2 e o nó 5, então a rede malhada inicial transforma-se uma rede radial.

7. Uma Metodologia ACO para Recomposição do Serviço

A seguir está a descrição de cada componente da metodologia de ACO proposta.

Representação de Solução. Uma solução do problema de recomposição de serviço é representada por um vetor de bits $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_{ns})$, aonde ns é o número de chaveamentos da rede. A variável x_k é associada com o chaveamento k , que tem valor um se a chave k está fechada, e zero se ocorre o contrário.

Grafo de Construção. O conjunto de nós do gráfico corresponde ao conjunto de chaves (abertas e fechadas) da rede mais um nó artificial em que todas as formigas começam sua excursão. O nó artificial é necessário a fim de especificar, sem polarização, qual chave será aberta primeiramente. O conjunto de conexões do grafo conecta inteiramente o conjunto de nós. Na Figura 3, mostra-se uma

rede de distribuição com 5 chaves e o grafo de construção associada com 6 nós (onde cinco deles correspondem aos chaveamentos).

Construção da Solução. Inicialmente todos os chaveamentos da rede são fechados criando uma rede engrenada. Em seguida, todas as formigas são colocadas no nó artificial de partida. Passo a passo, cada formiga interativamente visita um nó e abre o chaveamento correspondente. A construção da solução termina uma vez que a formiga abriu um número suficiente de chaveamentos. Conseqüentemente, depois de sua excursão, a formiga construiu uma rede radial cujos chaveamentos abertos correspondem aos nós visitados e os chaveamentos fechados correspondem aos nós não visitados. Em cada etapa da construção, a formiga toma uma decisão probabilística a fim de escolher o próximo nó para ir. A formiga usa a denominada *regra proporcional aleatória*, para decidir qual chave abrir. Mais precisamente, a probabilidade p_j da formiga k escolher ir para nó j é dada por:

$$p_j^{(k)} = \frac{(\tau_j)^\alpha (\eta_j)^\beta}{\sum_{k \in N_i^k} (\tau_k)^\alpha (\eta_k)^\beta}, \text{ se } j \in N^{(k)}$$

onde τ_j é o nível de feromônio no nó j e η_j é a informação heurística associada ao mesmo nó, e α, β são fatores de escalonamento. O denominador em (4) é um fator normalizante. N_k é a vizinhança possível da formiga k , que é o conjunto de nós que é permitido de ser visitado pela formiga k e é definido no próximo parágrafo.

Restrições. Algumas restrições são impostas às caminhadas no gráfico da construção. Cada nó é visitado no máximo uma vez. Um nó não pode ser visitado se isso implica em abrir uma chave que desenergiza uma seção da rede. Seja L o número de nós a ser visitado. Neste trabalho, L é dado por:

$$L = n_{malhada} - n_{nós} + n_{alimentadores}$$

onde $n_{malhada}$ é o número das ramos da rede malhada inicial, $n_{nós}$ é como já definido e o $n_{alimentadores}$ é o número de alimentadores da rede de distribuição. Ou seja, L é igual ao número de chaves que devem ser abertas para converter a rede malhada inicial (isto é, a rede com todas as chaves fechadas) em um conjunto de alimentadores radiais.

Trilhas do Feromônio e Informação Heurística. O feromônio é depositado nos nós do grafo de construção (em vez de depositar nas conexões como é feito no problema de TSP [2]). Então, trilhas do feromônio τ_i é associado assim somente com o chaveamento i e refere-se à *propensão* em abrir a chave i . A informação heurística é dada por:

$$\eta_i = \begin{cases} w, & \text{se } x_i^{(inicial)} = 0; \\ 1, & \text{em caso contrário.} \end{cases}$$

onde $x_i^{(inicial)}$ indica o estado da chave i antes de acontecer a falta que origina o problema da restauração de serviço. Se $x_i^{(inicial)} = 0$, então é desejável que a chave i seja aberta, pois não se gera uma operação de chaveamento (uma vez que a chave estava inicialmente aberta). O fator $w > 1$ representa o nível de propensão (neste artigo $w = 10$). Vale mencionar que em Shimohammadi (1988), um chaveamento é selecionado se sua ramificação apresentar a menor amplitude de corrente. Tal critério necessita de um cálculo de fluxo de carga, em cada etapa da construção, para avaliar as correntes. Se esse critério fosse usado como uma informação heurística, resultaria em um algoritmo de ACO com grande tempo computacional. Não obstante sua simplicidade, a informação heurística proposta em (6) é computacionalmente barata e por isso foi adotada neste trabalho.

Atualização das Trilhas do Feromônio. Depois que todas as formigas construíram suas redes de distribuição, as trilhas do feromônio estão atualizadas. Dois eventos ocorrem na atualização:

evaporação e depósito de feromônios. A evaporação reduz o nível de feromônio em todas as chaves, de um valor constante, como segue:

$$\tau_j = (1 - \rho)\tau_j^{anterior}, \text{ para } j = 1, 2, \dots, n_s$$

onde $0 < \rho \leq 1$ é a taxa de evaporação do feromônio. A evaporação evita acumulação excessiva de feromônio e assim evita uma rápida convergência do algoritmo para soluções sub-ótimas. Além disso, a evaporação é uma forma de esquecer aberturas de chaves ruins, realizadas por formigas anteriores.

No segundo evento, as formigas depositam feromônio nas chaves que elas abriram, como segue:

$$\tau_j = \tau_j^{anterior} + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_j^{(k)}, \text{ para } j = 1, 2, \dots, n_s$$

onde $\Delta\tau_j^{(k)}$ é a quantidade de feromônio que a formiga k deposita na chave que abriu, que é dada por:

$$\Delta\tau_j^{(k)} = \begin{cases} 1/f^{(k)}, & \text{se } x_j^{(k)} = 0 \\ 0, & \text{em caso contrário;} \end{cases}$$

onde $x_{j_k} = 0$ indica que a formiga k abriu o chaveamento j e f_{j_k} é o valor da função objetiva (ver Equação (1)) para solução encontrada pela formiga k .

8. Resultados Experimentais

Resultados experimentais foram realizados com uma rede de 130 barras, mostrada na figura 4. Essa rede possui 5 subestações, 77 seções de chaveamento e 29 nós chaveados. O algoritmo ACO foi implementado em Java. Os parâmetros do ACO foram: 100 formigas, número máximo de iterações = 150, $\alpha = 1$, $\beta = 2$, e $\rho = 0.5$. A falha mais significativa aconteceu no trecho E01-E02, que deixou um grande número seções sem fornecimento de energia elétrica. O número mínimo global de operações de chaveamento é três. O algoritmo ACO encontrou esta solução em 135.3s, usando Linux com o processador AMD Sempron 2800. Outros resultados estão sintetizados na Tabela 1.

Tabela 1. Resultados de aplicação do algoritmo para diferentes ramos sob defeito.

Ramo excluído	Tempo para encontrar a melhor solução	Número de operações de chaveamento
E01 – E02	135 s	3
C04 – C05	173 s	3
A06 – A07	80 s	1
A09 – A010 e E10 – E11	85 s	2

9. Conclusões

Este artigo propôs uma nova metodologia para o problema de recomposição de serviço com a meta-heurística do algoritmo de otimização de colônia de formigas. A metodologia usa o esquema de abertura sequencial de chaves de Shimohammadi (1988), como um algoritmo construtivo para ACO. Apesar do algoritmo ACO proposto usar uma informação heurística muito simples, reduz-se significativamente o tempo computacional, pelo fato de evitar inúmeros cálculos de fluxo de carga, conforme se apresenta no esquema original de Shimohammadi (1988). Os experimentos mostraram que o algoritmo ACO resolve satisfatoriamente o problema de recomposição do serviço, em tempo aceitável, para uma rede com 5 subestações, 130 barras, 77 seções de chaveamento e 29 nós

chaveados. Um trabalho mais adiante deverá adaptar o algoritmo ACO proposto para considerar consumidores prioritários (e.g., hospitais) e atender a outras restrições do sistema elétrico. O esquema de fechamento seqüencial de chaves de Mcdermott, Drezga e Broadwater (1999) também pode ser combinado com ACO.

10. Referências bibliográficas

AOKI, K. & SATOH, T. & ITOH, M. & KUWABARA, H. & KANEZASHI, M. Voltage Drop Constrained Restoration of Supply By Switch Operation in Distribution Systems. IEEE Transactions on Power Delivery, July 1988, Vol. 3, No.3.

DORIGO M. & STÜTZLE, T. Ant Colony Optimization. The MIT Press, 2004, Cambridge, MA.

JEON, Y. & KIM, J. Network reconfiguration in radial distribution system using simulated annealing and tabu search. IEEE, 2000.

MCDERMOTT, T. & DREZGA, I. & BROADWATER, R. Heuristic nonlinear constructive method for distribution system reconfiguration. IEEE Transaction on Power System, 1999, Vol. 14, No. 2.

MEDEIROS JR., M. & LACERDA, E. Minimum number of switching operations via ant colony optimization, CIRED, Vienna, May/2007, pp. 21-24.

NARA, K. & SHIOSE, A & KITAGAWA, M. & ISHAHARA, T. Implementation of genetic algorithm for distribution systems loss minimum reconfiguration. Transactions on Power Systems, August 1992, vol.7, No 3.

SHIMOHAMMADI, D. Service restoration in distribution networks via network reconfiguration, IEEE Transaction on Power Delivery, 1992, vol. 7, n. 2, pp. 952-958.

SUA, C. & CHANGB, C. & CHIOU, J. Distribution network reconfiguration for loss reduction by ant colony search algorithm. Electric Power Systems Research, 2005.

TOUNE, S. & FUDO, H. & GENJI, T. & FUKUYAMA, Y. & NAKANISHI, Y. Comparative study of modern heuristic algorithms to service restoration in distribution systems, IEEE Transactions on Power Delivery. Jan. 2002, Vol. 17, Issue 1, pp: 173-181.

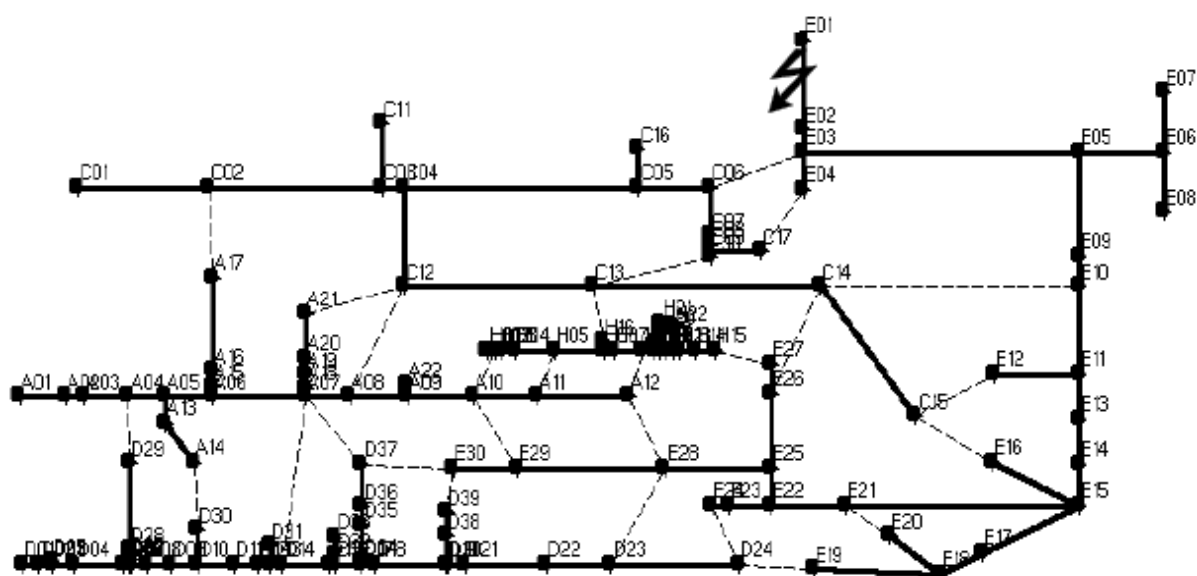


Figura 4 – Um sistema de distribuição de 130 barras. As linhas tracejadas representam chaves (NA).