Instituto de Ciências Matemáticas de São Carlos

ISSN - 0103-2569

RESTABELECIMENTO ÓTIMO DE ENERGIA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO: UMA COMPARAÇÃO ENTRE O DESEMPENHO DE BUSCA COM HEURÍSTICA "FUZZY" E ALGORITMOS GENÉTICOS

ALEXANDRE C. B. DELBEM
NEWTON G. BRETAS
ANDRÉ C.P.L. F. DE CARVALHO

Nº 48

RELATÓRIOS TÉCNICOS DO ICMSC

São Carlos
Nov./1996

Restabelecimento Ótimo de Energia em Sistemas de Distribuição: uma Comparação entre o Desempenho de Busca com Heurística "Fuzzy" e Algoritmos Genéticos.

Alexandre C. Botazzo Delbem

Newton G. Bretas
Membro Senior do IEEE

André Carlos Ponce de Leon F. de Carvalho

Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade de São Paulo
São Carlos, Brasil

Departamento de Ciências de Computação e Estatística
Universidade de São Paulo
São Carlos, Brasil

Resumo

Um método de busca utilizando heurísticas "fuzzy" e um parâmetro de rede neural é desenvolvido para restabelecimento de energia em sistemas de distribuição. O objetivo é restabelecer a energia para a área desenergizada depois de uma falta ter sido identificada e isolada. Um plano de restabelecimento deve ser elaborado em um tempo muito curto. Entretanto, a característica combinatorial do problema restringe as aplicações de programas de computador

para automação desta tarefa. Para vencer esse problema, nós propusemos um método de busca com heurísticas "fuzzy". No entanto, métodos de busca apresentam dificuldades para encontrar a solução ótima. Sendo assim, um método baseado em algoritmos genéticos foi desenvolvido para conseguir o plano de restabelecimento de energia ótimo. A eficiência dessas propostas é testada para um sistema de distribuição simplificado baseado no complexo sistema de distribuição de São Carlos, Brasil. Verifica-se que o algoritmo genético apresenta melhor desempenho do que a busca com heurísticas "fuzzy" neste problema.

Abstract

A search approach using fuzzy heuristics and a neural network parameter are developed for service restoration of a distribution system. The goal is to restore energy for an unfaulted zone after a fault has been identified and isolated. The restoration plan must be carried out in a very short period. However, the combinatorial feature of the problem constrains the application of automatic energy restoration planners. To overcome this problem, we propose an heuristic search approach using fuzzy heuristics. Nevertheless search approaches are not efficient to find the optimal solution. As a result we developed a genetic algorithm approach to achieve the optimal energy restoration plan. The effectiveness of these approaches is tested in a simplified distribution system based on the complex distribution system of São Carlos, Brasil. It is noticed that genetic algorithm provides better performance than the fuzzy heuristic search in this problem.

1. INTRODUÇÃO

O restabelecimento de energia em sistemas de distribuição tem despertado crescente interesse nos últimos anos, principalmente devido ao grande aumento da velocidade de processamento dos computadores atuais. Um plano de restabelecimento de energia elaborado e rápido é necessário para lidar com faltas permanentes (que só podem ser extinguida após reparo no setor danificado) em sistemas de distribuição. Ou seja, depois do local de uma falta ter sido identificada e a zona de falta ter sido isolada pela atuação do sistema de proteção, é de interesse dos operadores encontrar um plano apropriado para o restabelecimento da energia na área desenergizada. Mesmo durante a operação normal do sistema, muitas vezes é necessário isolar zonas para execução de trabalhos normais de manutenção na rede. Nestes dois casos o objetivo é praticamente o mesmo: encontrar um plano de energização de forma a deixar a menor área do sistema fora de serviço. Para tal, os operadores tendem a utilizar suas experiências anteriores para que o planejamento satisfaça um série de necessidades práticas e objetivas tais como um número reduzido de operações de chaveamento, um pequeno número de consumidores sem energia (ou nenhum) e ausência de componentes sobrecarregados. Portanto, o restabelecimento do serviço aos consumidores é um problema com múltiplos objetivos, alguns deles conflitantes.

Um plano de restabelecimento de energia adequado tem como principais necessidades práticas:

1. encontrar um plano no tempo mais curto possível;

2. o número de chaveamentos deve ser mínimo. A principal razão para tal é que a operação freqüente das chaves reduz a

expectativa de vida destas. Além disso, um número maior de manobras implica em maior demora para realização do trabalho, que é um fator crucial em cidades muito populosas;

3. reduzido número de consumidores interrompidos (os operadores devem restabelecer toda a carga que for possível);

4. nenhum componente sobrecarregado;

5. a estrutura radial (sem formação de anéis) do sistema deve ser mantida.

Outros objetivos podem ser considerados de acordo com as necessidades de cada companhia de energia. Por exemplo, manter a carga balanceada entre os alimentadores, limitar níveis de queda-de-tensão, evitar planos que necessitem de manobras realizadas em pontos muito longe um do outro, de forma a manter a topologia original da rede, minimizar as perdas no sistema.

Esses objetivos podem ser divididos em dois tipos básicos: os objetivos da transição de estado voluntária, na qual se quer por exemplo uma melhor configuração para o sistema, minimizar perdas, etc. (o que é chamado de Planejamento Ótimo da Alimentação de Sistemas de Distribuição [4,6]); e a transição de estado involuntária, causada por faltas ou manobras para manutenção da rede (que caracteriza o problema de Restabelecimento de Energia).

Claramente, os objetivos desses dois tipos de transição podem ser desejáveis em um único plano de restabelecimento de energia. (restabelecer o máximo de carga com reduzidas perdas, por exemplo). Entretanto, para circuitos como os utilizados no Brasil e em outros países em desenvolvimento, onde as chaves são operadas manualmente e um número grande de transformadores e alimentadores operam próximo de sua capacidade limite, os requisitos 2 e 3 listados anteriormente são os principais. Isso significa que nem sempre é

prático buscar a solução ótima (muitas vezes, se um plano de restabelecimento opera **n** chaves e para obter a solução ótima é preciso manobrar **n+1** chaves, prefere-se a solução com **n** chaves). Além disso, o crescimento acelerado dos sistemas de distribuição gerou redes de distribuição de energia com topologias complexas. Por exemplo, em tais sistemas nem sempre há chaves presas em "normalmente aberto" ("tie-switches", prontas para conectar um alimentador a alimentadores vizinhos) [1,2,3,8], ou estruturas nas quais cada lateral tem seu alimentador normal e seu alimentador de suporte [9,10]; isso dificulta em muito o desenvolvimento de programas de computador para restabelecimento automatizado de energia e reduz bastante as possibilidades de aplicação dos procedimentos já existentes. Outro fator complicante, e normalmente não tratado nos trabalhos de restabelecimento existentes, é a capacidade que o programa deve ter para incorporar alterações na configuração do circuito e obter respostas desejáveis mesmo diante dessas mudanças.

Este trabalho busca resolver essas questões que limitam o desempenho dos procedimentos já existentes em sistemas grandes e complexos como os encontrados em países em desenvolvimento. A seguinte seção faz um levantamento do métodos existentes e seus respectivos desempenhos. A seção 3 propõe o programa para restabelecimento de energia baseado em busca heurística "fuzzy". Em seguida são discutidas suas características e capacidades com um pequeno exemplo didático. Depois, são mostrados alguns casos para um sistema de distribuição real. Na Seção 5, mostramos o método de restabelecimento de energia por algoritmos genéticos, bem como os motivos que levaram ao seu uso. Finalmente, tecemos

Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação
Biblioteca

alguns comentários e comparações finais sobre os dois métodos aqui discutidos.

2. PRINCIPAIS MÉTODOS JÁ DESENVOLVIDOS

O interesse em restabelecimento de energia em sistemas de distribuição não é recente [3]. Durante a década de oitenta as pesquisas nesta área se intensificaram devido ao significativo aumento da capacidade de processamento dos computadores. Castro et al. [3] desenvolveram um procedimento de restabelecimento por busca através de uma tabela de chaves que contém informações sobre o "status" das chaves no sistema. O programa não foi aplicado para sistemas grandes. Aoki et al. [1,2] usam programação linear inteira para minimizar o valor da carga nos alimentadores. Se ocorre uma falta, as cargas desenergizadas são transferidas para alimentadores vizinhos (baseado na analogia entre um alimentador com suas chaves abertas e o caule de uma árvore com suas folhas). Um programa de computador foi desenvolvido para um sistema de 5 subestações, 11 transformadores, 86 alimentadores e 577 chaves (o número de chaves com as quais o programa consegue trabalhar é um dos principais indicadores do seu desempenho), das quais 198 são normalmente abertas.

O Método de busca heurística oferece uma ferramenta poderosa para solução do problema de restabelecimento de energia. Em trabalhos que utilizam esse método, o problema é modelado por variáveis (0,1) que determinam se uma chave deve ser aberta (0) ou fechada (1). Morelato et al. [5], empregam inicialmente uma árvore binária de busca em profundidade. Posteriormente é escolhida a solução que minimiza o Índice de Balanceamento de Carga. O método foi

implementado para um sistema pequeno, uma vez que ele usa uma busca cega, tornando o procedimento extremamente lento para espaço de estados grandes (número de chaves grande). Devi et al. [8] combinam a técnica de busca heurística [5] com o procedimento de Aoki [1,2] que faz uma analogia entre uma árvore com suas folhas e um alimentador com suas chaves. As variáveis de estado são principalmente as chaves das seções normalmente abertas. Para cada proposta de solução gerada pela busca, executa-se um fluxo de carga DC para verificar se os carregamentos dos transformadores e dos alimentadores estão dentro de suas capacidades limites. O sistema usado consiste de 120 alimentadores e mais de 2500 nós (chaves) e 180 seções normalmente abertas. A capacidade de trabalhar com 2500 chaves mostra que tal método resolve problemas de restabelecimento de energia de sistemas de tamanho real, porém não se menciona no trabalho publicado o tempo gasto com o processamento.

Outra proposta interessante foi desenvolvida por Hsu et al.[9] usando raciocínio baseado em heurísticas "fuzzy" para um sistema com 3 subestações, 10 alimentadores e 34 chaves. A estrutura do sistema constituída por um alimentador normal e um alimentador de suporte para cada lateral (ramal dos alimentadores), permite reduzir o número de chaves manobráveis a 8, viabilizando computacionalmente a técnica com heurística "fuzzy" para este pequeno sistema. Hsu et al. [10] também propõem um sistema de restabelecimento usando redes neurais e reconhecimento de padrões. Porém, esta proposta requer uma configuração fixa do circuito bem como necessita muitos planos de restabelecimentos prontos (o método é um reconhecedor muito veloz de soluções

prontas com baixa capacidade de generalização).

3. MÉTODO UTILIZANDO BUSCA COM HEURÍSTICAS "FUZZY"

3.1. Introdução

As variáveis de um programa de restabelecimento de energia normalmente são os estados das chaves do sistema de distribuição. Assim como em [5,8], os estados das chaves também são os estados das buscas heurísticas usadas nesses trabalhos. Entretanto, trabalhar com estados de chaves não é intuitivo, principalmente do ponto-de-vista do operador do sistema de distribuição. Foi verificado no acompanhamento de alguns planos de restabelecimentos realizados na CPFL, que os operadores tentam inicialmente achar um caminho qualquer (mas que obviamente não faça "desvios" desnecessários) ligando a área desenergizada a um subestação ou a um alimentador aparentemente capaz de suportar a carga de tal área. Se esse caminho não é realizável devido a limites de carga ou impossibilidades na configuração do sistema, pequenas alterações são feitas, tornando o caminho factível. Alternativamente, pode-se buscar uma outra idéia ou caminho básico como solução para o problema (deve ser observado que a configuração complexa dos circuitos no país não permite os operadores executarem bons planos só com a manipulação de "tie-switches"[1,2,3,8]).

3.2. Representação de um Sistema de Distribuição para Fins de Restabelecimento de Energia

A Figura 1 ilustra um sistema de distribuição, onde linhas retas representam

alimentadores; círculos são chaves abertas; os quadrados são chaves fechadas; os caracteres dentro dos círculos e quadrados são os nomes das chaves; SE é abreviação de subestação. Um conjunto de chaves ligadas por trechos de alimentadores, no qual entre duas chaves não há nenhuma outra,

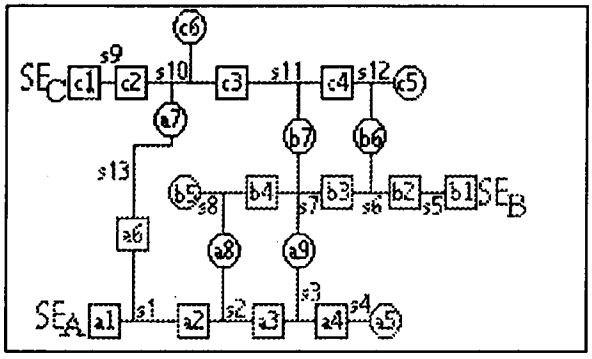

Figura 1: Representação de um Sistema de Distribuição. Quadrados são chaves fechadas e círculos, chaves abertas.

representa um setor (na Figura 2, temos um exemplo de setor isolado, pois as chaves b2, b3, b6 estão abertas. O nome deste setor é [b2,b3,b6] ou s6). Outros parâmetros importantes são: o CP que é a carga consumida em um setor e o CPASS que representa a carga passante por uma chave.

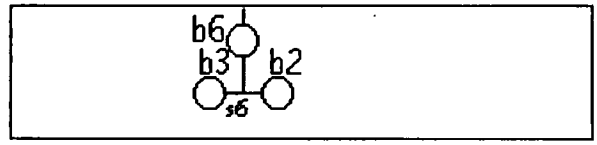

Figura 2: Exemplo de um setor de um Sistema de Distribuição.

Com base nessas definições, podemos representar no computador a malha de um sistema de distribuição já simplificado (sem considerar dados como capacitores, bitolas de cabos, etc.) em uma forma analítica e sem perda de muita informação existente na forma gráfica. Com essa representação podem ser obtidas informações fortes para restringir bastante as combinações de estados de chave infactíveis, ou seja, combinações para as quais setores ficam desenergizados.

3.3. Construção de Caminhos

Caso tenha ocorrido uma falta, na qual o sistema de proteção tivesse isolado o setor [c3,c4,b7] (s11), o setor [c4,c5,b6] (s12) ficaria desenergizado. A tarefa do algoritmo computacional seria, então, encontrar um caminho unindo este último setor a uma subestação. Assim, considerando o setor desenergizado como o estado inicial de uma busca e os demais setores do sistema formando o conjunto dos estados possíveis no sistema, a seguinte árvore de busca seria construída:

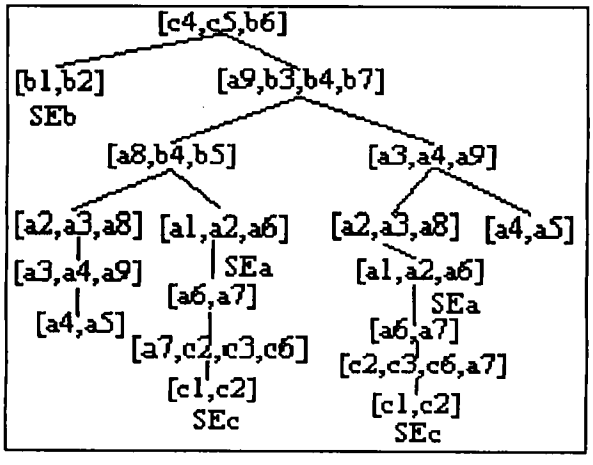

Figura 3: Árvore de busca após uma falta no setor[c3,c4,b7].

Como pode ser visto na Figura 3, usando esse algoritmo, a árvore de busca encontra todas as subestações. Porém, o algoritmo refaz caminhos que já eram bem conhecidos (caminhos principais). Esses caminhos são os formados pelos trechos de alimentadores com suas configurações originais. Os setores formados por [a1,a2,a3] + [a2,a3,a8] + [a3,a4,a9] + [a4,a5] e [b1,b2] + [b2,b3,b6] + [a9,b3,b4,b7] + [a8,b4,b] dificilmente terão a sua configuração alterada, uma vez que eles fazem parte de caminhos de alimentadores não afetados pela falta e também não são ramificações de nenhum outro alimentador.

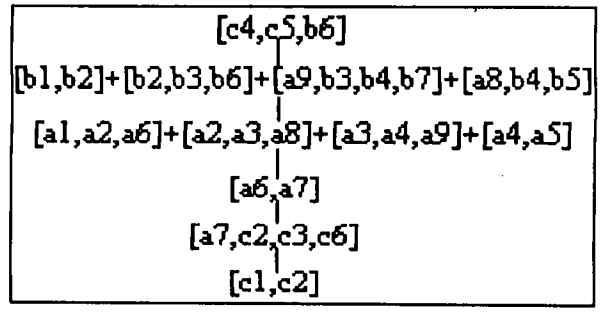

Figura 4: Árvore de busca considerando como conhecidos os caminhos principais.

Desta forma, poderiam ser consideradas as chaves que interligam esses setores como sempre fechadas. Sendo assim, a árvore de busca ficaria como a mostrada na Figura 4.

3.4 Heurísticas "Fuzzy".

Com este procedimento de restabelecimento de energia baseado na busca de caminhos, fica significativamente fácil e intuitivo introduzir as heurísticas normalmente usadas pelos operadores para guiar a busca. Os conjuntos "fuzzy" nos possibilitam traduzir para programa de computador os conhecimentos, muitas vezes intuitivos e imprecisos, que os operadores usam na elaboração dos planos de restabelecimento de energia. Cada setor tem uma carga correspondente que é acrescida ao caminho de busca, porém os cabos têm um limite de carga a ser respeitado. Assim sendo, caminhos de busca com carga acumulada da ordem dos limites dos cabos tem seu grau de pertinência reduzido. Chaves de caminhos principais são normalmente fechadas, o que equivale a graus de pertinência elevado, enquanto que chaves de conexão entre alimentadores ("tie-switches") e principalmente as mais distantes das subestações correspondem a graus de pertinência baixos. Setores cujas chaves estão com baixo grau de pertinência também possuem baixo grau de pertinência em um caminho de busca. Setores distantes das subestações tem grau de pertinência menor que setores mais próximos. Portanto, com essas heurísticas, a busca sempre escolhe os setores que tendem a gerar um caminho mais curto, com menos manobras de chaves e menor carregamento dos alimentadores.

Evidentemente, se tais características podem ser obtidos para um certo caso, alternativas com caminhos pouco maiores, com maior carregamento dos alimentadores ou com mais chaves manobradas são tentadas automaticamente pela busca. Mesmo nos casos mais críticos, a busca sempre propõe uma solução; por exemplo, circuitos em anéis podem ser sugeridos caso outros alternativas não sejam possíveis; também soluções que violem levemente os limites dos cabos podem ser sugeridas diante da falta de outras opções. Ou seja, a busca é não-determinística e sem limites rígidos para o carregamento dos alimentadores e para o comprimento de um caminho de busca (o qual é proporcional ao aumento da queda de tensão nos alimentadores), etc.

No trabalho de Devi et al. [8], a cada estágio da busca existe um grupo de chaves que podem ser manobradas (as chaves pertencentes às seções normalmente abertas que conectam a área desenergizada a alimentadores vizinhos). A seleção de quais destas chaves devem ser escolhidas é feita após a execução de um fluxo de carga DC para verificar se as capacidades dos alimentadores não foram violadas. Assim, a cada estágio da busca é executado um fluxo de carga DC. No trabalho de Aoki et al. [1,2], para cada grupo de chaves vizinhas da área desenergizada, a escolha das chaves a serem manobradas é feita usando programação linear inteira. Entretanto, com o procedimento de restabelecimento mostrado neste trabalho (usando heurísticas "fuzzy"), nem o algoritmo de fluxo de carga DC, nem o de programação linear inteira precisam ser executados a cada estágio da busca. Pois a decisão de quais chaves devem ser manobradas é feita segundo o grau de pertinência de cada setor e, neste valor, estão implícitos a probabilidade de ocorrer sobrecarga ou de alterações impróprias na

configuração da rede. Como os graus de pertinência podem ser pré-calculados, o tempo gasto na busca fica significativamente reduzido. Além disso, uma solução que viole levemente as restrições do problema de restabelecimento de energia não é totalmente descartada, podendo ser sugerida na ausência de outra alternativa.

Nos parâmetros "fuzzy" está implícita também uma busca "backward". Como, ao se usar a modelagem com base em caminhos, o estado final da busca é conhecido (setores pertencentes a subestações), poderíamos realizar um busca "backward" (de uma subestação até a área desenergizada). Poderíamos pensar também em uma busca "interwave" (indo simultaneamente das subestações para a área desenergizada e desta para uma subestação). Porém, os caminhos "backward" são basicamente os caminhos principais, os quais já estão implícitos nos valores "fuzzy" dos graus de pertinência das função heurística. Assim, pode-se dizer que a busca com heurísticas "fuzzy" é uma busca "interwave" com a parte "backward" da busca já calculada e expressa nos parâmetros "fuzzy".

Uma outro fator importante no uso dos valores "fuzzy" está ligado a recente automação dos sistemas distribuição. No Brasil, já existem alguns destes sistemas que têm medidores de corrente e tensão em chaves controladas remotamente em alguns pontos mais importantes do circuito. Devido a facilidade de operar tais chaves remotamente, seria interessante sempre que possível utilizar essas chaves nos planos de manobra, reduzindo significativamente o tempo de execução do plano e restabelecendo mais rapidamente a energia em áreas desenergizadas. Para incorporar a preferência por operar tais chaves no programa de computador, basta alterar o grau de pertinência dos setores conectados

por tais chaves para níveis mais altos. Desta forma, as chaves operadas remotamente tenderiam a ser utilizadas pelo programa sempre que fosse possível.

3.5 Estabilidade da Busca.

Esta é uma questão não tratada nos trabalhos de restabelecimento de energia. Devi [8] propõem que, se os alimentadores vizinhos da área desenergizada não suportam toda a carga desta área, as sobrecargas dos alimentadores de suporte podem ser superadas transferindo essas cargas extras para alimentadores vizinhos. Entretanto, esse procedimento pode resultar em um aumento crescente das sobrecargas a medida que as cargas extras são transferidas, gerando assim um busca instável. Desta forma, sempre que ocorrer a necessidade de transferência de sobrecarga, deve-se também avaliar a expressividade de tal sobrecarga no contexto dos alimentadores mais próximos, para que se possa decidir se vale a pena continuar a busca com a transferência de cargas extras ou se, diante de altas possibilidades de instabilidade, devem ser inicialmente testados outros caminhos. Assim, buscou-se um parâmetro α que expressasse a probabilidade da busca ser estável sempre que se verificasse sobrecarga de um alimentador durante o desenvolvimento de um caminho de busca. Propõe-se então uma rede neural para determinar o valor de α. A rede tem em suas entradas o valor da sobrecarga normalizada, bem como as folgas normalizadas dos alimentadores vizinhos; na saída do neurônio da última camada obtém-se o valor de α. A rede é treinada para diversos casos de restabelecimento de energia correspondentes a buscas instáveis e estáveis. Para os casos estáveis a saída desejada da rede é 1.0 e 0.0 para os instáveis. Desta forma, buscas que gerem transferências de carga extra e com

α's baixos, tem grau de pertinência pequenos, levando o programa de restabelecimento de energia a priorizar outras alternativas.

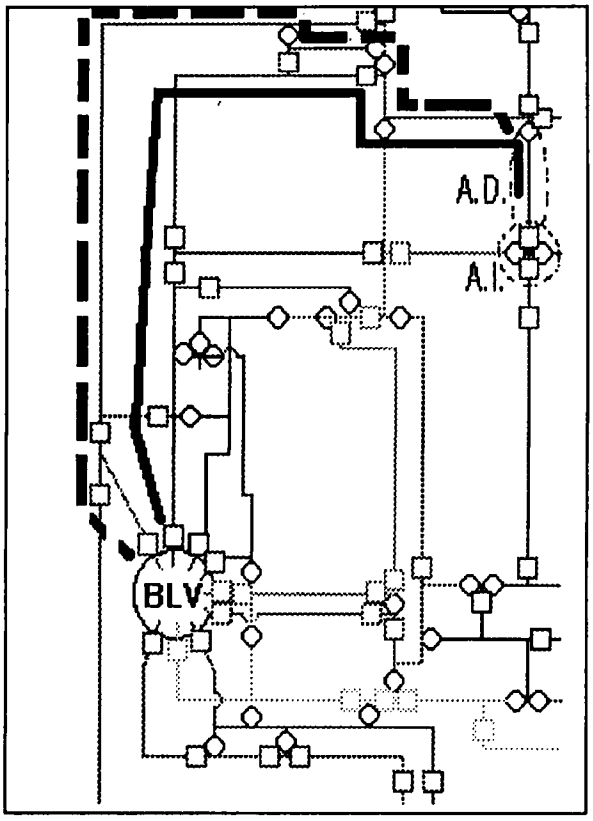

Figura 5: Uma parte do circuito simplificado da rede de distribuição de energia elétrica da cidade de São Carlos (CPFL).Quadrados são chaves fechadas e círculos, chaves abertas. Cada cor indica um alimentador.

4. EXEMPLO DE RESTABELECIMENTO DE ENERGIA USANDO HEURÍSTICA "FUZZY".

O programa de restabelecimento de energia com busca heurística "fuzzy" e com determinação de parâmetro "fuzzy" (a probabilidade α de uma busca ser estável) usando rede neural, foi aplicado a um grande sistema real mostrado parcialmente na Figura 5. Este sistema possui um 3 subestações como a Bela Vista (esfera grande com a sigla BLV), 22 alimentadores, 500 setores e cerca de 1500 chaves. A abreviação A.D. significa Área Desenergizada; A.I.: Área Isolada. Além disso, esse circuito não possui facilidades na configuração como alimentadores de suporte para cada lateral, "tie-switches", dificultando a elaboração de algoritmos computacionais para o restabelecimento de energia.

Um programa escrito em PROLOG em estágio experimental foi executado no Interpretador Prolog Arity, o qual gasta alguns segundos para encontrar solução para casos críticos e produz respostas quase instantâneas para os casos simples.

Como exemplo, mostra-se os resultados no restabelecimento de energia para o setor [sca0706,sca0707] (do sistema da Figura 1) que ficou desenergizado devido a uma falta que isolou o setor [sca0706,sca0705,blv0708,sca0811]. O caminho-resposta para esse caso está

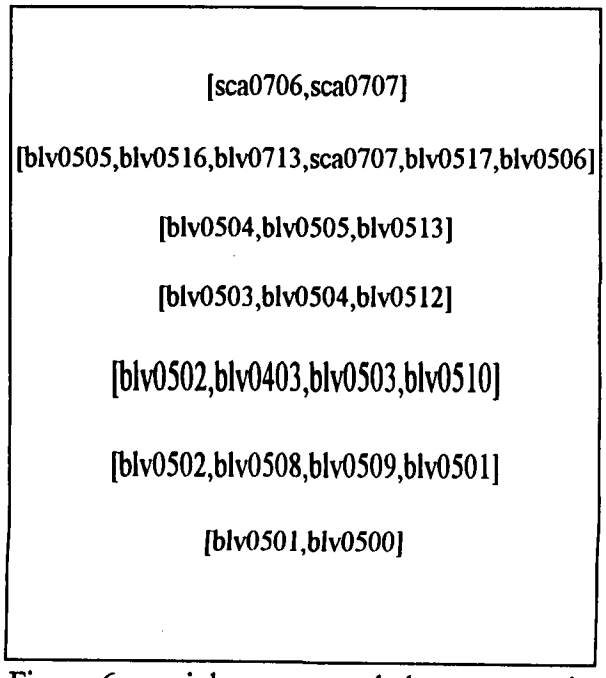

Figura 6: caminho para restabelecer a energia no setor[sca0706,sca0707] com carga de 25 A.

mostrado na Figura 6 e Figura 5 (a linha contínua ligando a AD. à subestação BLV. Para produzirmos um exemplo didático e de fácil comparação, foi aumentada a carga consumida no setor [sca0706,sca0707] de 25 para 100A no mesmo circuito da Figura 1. O resultado desta situação pode ser visto nas Figuras 7 e 5 (a linha pontilhada ligando a

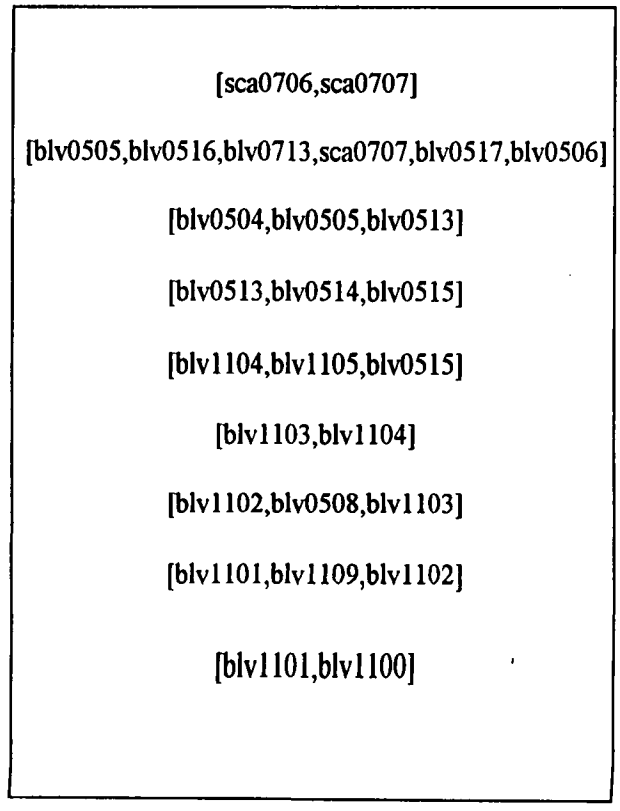

Figura 7: caminho para restabelecer a energia no setor [sca0706,sca0707] com carga 100 A.

A.D. à subestação BLV).

5. RESTABELECIMENTO DE ENERGIA POR ALGORITMOS GENÉTICOS

5.1 Introdução

As mudanças na configuração de sistemas de distribuição são necessárias por motivos de restabelecimento de energia ou para atingir uma configuração do circuito com balanceamento de carga (menores sobrecargas e quedas-de-tensão possíveis) e redução de perdas (o que é chamado de Planejamento Ótimo). Como vimos anteriormente, alguns trabalhos [2,6,7,8] buscam o restabelecimento de energia juntamente com o planejamento ótimo. Nesses trabalhos, manobras factíveis (que mantenham o sistema totalmente energizado) são obtidas através de uma árvore de busca ou por mecanismo equivalente. Posteriormente, um fluxo de carga e/ou um algoritmo de programação linear inteira é executado para se escolher o melhor plano dentre os obtidos. Porém, os vários planos factíveis não são gerados por algoritmos de programação linear. Com isso, cada plano gerado pela árvore de busca não tem obrigatoriamente nenhuma responsabilidade de melhorar o índice da função objetivo em relação ao plano anterior como ocorre em um método de iterativo (a função objetivo para problemas de restabelecimento de energia é descontínua e não linear: a mudança de apenas um estado de uma chave (variável) da função objetivo pode levar a valores da função totalmente discrepantes). Desta forma, a solução ótima só poderia ser garantida se, através da árvore de busca, tivéssemos encontrado todos os planos de restabelecimento factíveis e desses,

extraíssemos o melhor. Como não é realizável gerar todos os planos de restabelecimento de energia, as técnicas de otimização descritas anteriormente conseguem apenas garantir que as respostas encontradas sejam regiões próximas de mínimos. A proposta de busca com heurísticas "fuzzy" ameniza essa limitação, uma vez que essa técnica possui a parte referente a otimização pré-calculada, fazendo simultaneamente a determinação de planos de manobras factíveis e o processo de otimização. Porém, esse processo de otimização é baseado em uma busca "hill-climb", o que não permite que a busca seja capaz de realizar alterações em pontos mais distantes no sistema de forma a encontrar o plano de restabelecimento ótimo (veja o exemplo no item 5.3).

Para vencer este entrave, é proposto então um método de restabelecimento de energia baseado em um algoritmo genético. Este algoritmo consegue agrupar as pré-soluções com os melhores valores, porém tais soluções podem corresponder a estados do sistema totalmente distintos. Ou seja, se $Fobj_i$ (Função Objetivo **i** para um estado de chaves x_i) difere de $Fobj_k$ por $\delta Fobj$, x_i não difere obrigatoriamente de x_k por um δx (podem, por exemplo, diferir por um **k** da ordem dos x's). Assim, os algoritmos genéticos são capazes de trabalhar simultaneamente com estados correspondentes a regiões de mínimos distantes. Possibilitando efetuar o restabelecimento de energia e otimização da solução de forma simultânea.

5.2 Algoritmos Genéticos

Esta técnica tem a característica de ser robusta (desempenho bom para uma diversidade de aplicações)[11]. Como conseqüência, algoritmos genéticos podem

ser utilizados tanto para tratar problemas que utilizam normalmente árvores de busca quanto problemas de otimização. Assim, o algoritmo genético mostra-se uma ferramenta poderosa para tratar o problema de restabelecimento de energia simultaneamente com o planejamento ótimo.

Os conceitos básicos desta técnica são: cada indivíduo de uma população corresponde a uma possível solução (no caso, configurações factíveis do sistema de distribuição) do problema em questão. A geração de novos indivíduos na população é feita principalmente por troca ("crossover") de características (genes) entre os indivíduos já existentes. Com uma função objetivo, seleciona-se os indivíduos mais aptos a reproduzirem. A cada ciclo de reprodução do algoritmo, cria-se uma nova geração de indivíduos. Após uma série de gerações, pode-se encontrar a solução ótima (ou indivíduo ótimo).

Em restabelecimento de energia cada indivíduo foi considerado uma configuração do sistema capaz de alimentar todos os seus setores (configuração factível). Um novo indivíduo é uma alteração factível sobre um indivíduo de uma geração passada. Tais alterações são, basicamente, realizadas trocando-se genes entre os cromossomos (seqüência de genes) de um mesmo indivíduo. Cada gene corresponde a um setor do sistema de distribuição de energia. Setores de um mesmo alimentador eqüivalem a genes de um mesmo cromossomo (a Figura 1 mostra três cromossomos: SEa, SEb e SEc). Para se evitar a geração de indivíduos com genes inativos (setores desenergizados), a troca de genes entre cromossomos é somente permitida se seus genes forem vizinhos na representação do sistema de distribuição (por exemplo, na Figura 1, o gene [a9,b3,b4,b7] pertencente ao cromossomo SEb é vizinho do gene

[a3,a4,a9] do cromossomo SEa e, portanto, podem ser trocados).

A função objetivo inicialmente adotada para o restabelecimento de energia ótimo busca minimizar os carregamentos dos alimentadores, e obter o melhor balanceamento das cargas. Assim, a cada geração o indivíduo entre os 10% que apresentam o menor carregamento máximo de seus alimentadores e maior carregamento mínimo são separados como candidatos a reproduzirem. O gene que irá reproduzir é escolhido por sorteio.

5.3 Resultados Comparados

O programa de busca heurística "fuzzy" e o algoritmo genético (inicialmente escrito para motivos experimentais em Fortran) foram executados para o mesmo caso de falta ocorrida no circuito da Figura 1 (o circuito simplificado foi escolhido para comparação dos métodos para possibilitar a visualização da solução ótima, bem como explicitar satisfatoriamente as diferenças entre os dois métodos). Ainda, para facilitar a verificação do balanceamento de cargas, considerou-se todos os setores como tendo a mesmo valor de carga consumida.

Executamos os programas para uma falta ocorrida no setor [b7,.c3,c4], isolando o setor b6,c4,c5]. A melhor solução encontrada pela busca é o caminho [c4,c5,c6]+[b2,b3,b6]+[b1,b2] (já mostrado na Figura 3). O algoritmo genético também alimenta o setor [c4,c5,b6] pelo alimentador SE_B. No entanto, como pode ser verificado na Figura 8, está solução é a primeira tentativa do algoritmo genético, assim como, foi a primeira da busca heurística (ramo mais à esquerda da árvore: Figura 3). Porém, ao longo das gerações no algoritmo genético o quinto indivíduo gerado corresponde a uma configuração do sistema

	1° indivíduo			5° indivíduo		
gene	C1	C2	C3	C1	C2	C3
s1	A			A		
s2	A			A		
s3	A			A		
s4	A			A		
s5		A			A	
s6		A			A	
s7		A			A	
s8	A				A	
s9			A			A
s10			A			A
s11						
s12		A			A	
s13	A					A
CA	6	4	2	4	5	3
s_{CA}	2.0			1.5		

Figura 8: tabela com resultados do restabelecimento de energia para a falta no setor [b7,c3,c4] (s11). C_i é o cromossomo **i** de cada indivíduo. A letra **A** indica que o gene está ativo para aquele cromossomo. **CA** é o carregamento total na saída do alimentador. E s_{CA} é o desvio padrão dos carregamentos dos alimentadores para cada indivíduo.

com balanceamento de carga ótimo. Observe que, para o primeiro indivíduo, o carregamento do alimentador SE_C é muito baixo enquanto que o alimentador vizinho (SE_A) tem mais que o dobro da carga de SE_C. Já no quinto indivíduo esse desbalanceamento de carga é reduzido ao valor mínimo possível.

	1° indivíduo			31° indivíduo		
gene	C1	C2	C3	C1	C2	C3
s1	A			A		
s2	A			A		
s3	A			A		

s4	A			A		
s5		A			A	
s6	A				A	
s7	A				A	
s8	A				A	
s9			A			A
s10	A					A
s11	A					A
s12	A					A
s13	A				A	
CA	11	1	1	4	5	4
s_{CA}	5.8			0.6		

Figura 9: mostra o desempenho do algoritmo na busca da configuração ótima para o circuito da Figura 1 (veja o significado da simbologia na Figura 8).

5.4 Algoritmo Genético para Planejamento

Como vimos, o algoritmo genético nos permite encontrar a solução ótima para o restabelecimento de energia em sistemas de distribuição. Além disso, o mesmo programa pode ser usado para fazer o planejamento ótimo do circuito. Os sistemas de distribuição crescem em uma taxa elevada (alguns crescem a mais de 10% ao ano no Brasil), isso implica em alterações grandes na configuração do sistema. Assim, este programa pode ser usado para encontrar a topologia ótima do circuito a cada alteração que ele sofrer (Planejamento Ótimo da Alimentação dos Sistemas de Distribuição).

Existem casos em que alguns alimentadores possuem carga tipicamente noturna; enquanto outros têm carga basicamente diurna. Isso permite trocar cargas entre tais alimentadores de forma a minimizar os seus carregamentos. O programa de restabelecimento de energia ótimo pode ser usado para encontrar as configurações diurna e noturna ótimas.

Na Figura 9, mostramos o desempenho do algoritmo na busca da configuração ótima para o circuito da Figura 1, mas agora com suas cargas totalmente desbalanceadas (observe que na Figura 9, o cromossomo SEa está com quase todos os genes do indivíduo 1 ativos).

6. MÚLTIPLAS FALTAS

Ambas as metodologias são capazes de lidarem com múltiplas faltas. A ocorrência de múltiplas faltas significa a existência de diversas áreas desenergizadas. Então, para cada área desenergizada pode-se realizar um busca para alimentá-la por caminhos alternativos; ou executar o programa de algoritmo genético para otimizar a nova configuração da rede sem os setores agora isolados. No caso de busca heurística, a seqüência em que tais buscas devem ser realizadas pode ser determinada de acordo com os tamanhos das cargas e com suas prioridades (locais com hospitais, indústrias, área comercial, centro da cidade, etc.).

7. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi inicialmente apresentado um procedimento de busca heurística para o restabelecimento de energia em sistemas de distribuição devido a ocorrência de faltas ou mesmo por motivos de manutenção da rede. A busca é guiada por heurísticas "fuzzy" baseadas na experiência dos operadores. Durante a busca, a transferência de sobrecargas entre os alimentadores vizinhos, pode levar a instabilidade da busca. O parâmetro α (um número "fuzzy"), que indica a probabilidade de um caminho de busca ser estável , é determinado através de uma rede neural. A

busca heurística produz um caminho e as chaves que devem ser manobradas para executar um plano de manobras completo para restabelecer a energia na área desenergizada. Se o operador desejar, o programa pode fornecer mais de uma solução possível para o restabelecimento de energia de uma mesma área desenergizada.

Uma das vantagens de se utilizar um método baseado em caminhos de fornecimento de energia é que ele é muito intuitivo, facilitando a introdução de heurísticas normalmente usadas pelos operadores, bem como a própria análise pelo operador da solução encontrada. Possibilita ainda a representação e aplicação de restabelecimento de energia automatizado para circuitos que não foram construídos com um configuração direcionada para facilitar e otimizar a solução de problemas de restabelecimento de energia como, por exemplo, sistemas com alimentadores de suporte específicos para cada ramal[9], "tie-switches"[1,2] ou setores normalmente desconectados [8] (para circuitos com essas facilidades descritas, o programa tem seu desempenho mantido). Além disso, o método economiza tempo de processamento, pois os parâmetros "fuzzy" que guiam a busca podem ser pré-calculados, o que não é possível para procedimentos de executam fluxos de carga ou algoritmos de programação linear inteira.

No entanto, este método bem como os trabalhos de Restabelecimento de Energia e Planejamento Ótimo de Sistemas de Distribuição, são apenas capazes de fazerem otimizações locais. Para vencer esse obstáculo, implementou-se um algoritmo genético para se obter o restabelecimento ótimo da energia (uma vez que os algoritmos genéticos são capazes de conciliar as tarefas de busca e otimização em um mesmo problema). Os resultados obtidos confirmam

essa característica dos algoritmos genéticos, conciliando os objetivos de restabelecimento de energia e planejamento ótimo, bem como mostrando que o algoritmo é capaz fazer alterações globais no sistema para obter a solução ótima.

Outros avanços podem ser obtidos com o uso das heurísticas "fuzzy" também no algoritmo genético, guiando as reproduções mais rapidamente para a solução ótima. O desempenho pode ser ainda melhorado com outras heurística que podem ser facilmente introduzidas de acordo com as característica de circuitos mais específicos ou com as necessidades do usuário. A adaptabilidade do programa é importante pois os circuitos de distribuição de energia em geral apresentam características distintas de acordo com o nível e tipo de desenvolvimento econômico da região em que este se encontram (durante os meses de desenvolvimento do algoritmo de restabelecimento de energia aqui apresentado, as conexões fixas do sistema de distribuição apresentado na Figura 5 foram significativamente alteradas).

8. BIBLIOGRAFIA.

[1] Aoki, k. kuwabara, H., Satoh, T., Kanezashi, M., "Outage state optimal load allocation by automatic sectionalizing switches operation in distribution systems", IEEE Trans on Power Delivery, Vol. PWRD-2, No. 4, pp. 1177-1185, October 1987.

[2] Aoki, K., Nara, K., Itoh, M., Satoh, T., Kuwabara, H., "A new algorithm for service restoration in distribution systems", IEE Trans om Power Delivery, Vol. 4, No. 3, pp. 1832-1839, July 1989.

[3] Castro, Carlos H., Bunch, Jennings B. Topka, Terry M., "Generalized algorithms

for distribution feeder deployment and sectionalizing", IEEE Trans on PAS, Vol. PAS-99, No.2, pp. 549-557, March/April 1980.

[4] Hsu, Y.,Chen, J., "An expert system for load allocation in distribution expansion planning", IEEE Trans on Power Delivery, Vol. 4, No. 3, pp. 1910-1918 July 1989.

[5] Morelato, A. L. Monticelli, A., "Heuristic search approach to distribution sustem restoration", IEEE Trans on Power Delivery, Vol. 4, No. 4, pp. 2235-2241, October 1989.

[6] Ter-Gazarian, A. G., N. Kagan, "Design model for electrical distribution systems considering renewable, conventional and energy storage units", IEE Proceedings-C, Vol. 139, No. 6, pp. 499-504, November 1992.

[7] Wang, J., Chiang, H., Darling G. R., "An efficient algorithm for real-time network reconfiguration in large scale unbalanced distribution system", IEEE Trans on Power Systems, Vol. 11, No. 1, pp. 511-517, February 1996.

[8] Devi, V. S., Gupta D. P. S., Anandalingam G., "Optimal restoration of power supply in large distribution systems in developing countries", IEEE Trans on Power Delivery, Vol. 10, No. 1, pp. 430-437, January 1995.

[9] Hsu, Y., Kuo, H., "A heuristic based fuzzy reasoning approach for distribution system service restoration", IEEE Trans on Power Delivery, Vol.9, No.2, pp. 948-952, April 1994.

[10] Hsu, Y. , Huang, H. , "Distribution system service restoration using the artificial

neural network approach and pattern recognition method", IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 142, No.3, pp. 251-256, May 1995.

[11] Goldberg, D. E., "Genetic Algorithm in Search, Optimization, and Machine Learning", Addison-Wesley Publishing Company, 1989.