

ALGORITMO DE BUSCA COM HEURÍSTICAS FUZZY PARA RESTABELECIMENTO DE ENERGIA EM SISTEMAS RADIAIS DE DISTRIBUIÇÃO

A. C. B. Delbem, N. G. Bretas¹, A. de Carvalho

Escola de Engenharia de São Carlos – USP
Av. Dr. Carlos Botelho, 1450 CEP 13560-250 – São Carlos SP
ngbretas@sel.eesc.sc.usp.br

Resumo: Neste trabalho propõe-se um processo de busca utilizando heurísticas *fuzzy* para restabelecimento de energia em sistemas de distribuição. A meta é obter um plano de restabelecimento para suprir energia a uma área desenergizada depois de uma falta ter sido identificada e isolada. O plano de restabelecimento deve ser alcançado em um curto intervalo de tempo. Porém, a característica combinatorial associada a esse tipo de problema restringe a aplicação do restabelecimento automático de energia em sistemas de distribuição de médio para grande porte. Neste artigo, para lidar com essas características, é proposto um método de busca que usa heurísticas *fuzzy*. O desempenho deste método é avaliado usando um sistema de distribuição razoavelmente complexo (da cidade de São Carlos – SP, Brasil). É mostrado que um plano de restabelecimento pode ser alcançado em um intervalo de tempo significativamente curto.

Palavras Chaves: representação por cadeias de grafo, algoritmos genéticos, sistemas de distribuição.

Abstract: A search approach using fuzzy heuristics is developed for energy restoration in distribution systems. The goal is to reach a restoration plan to supply energy for an outage zone after a fault has been identified and isolated. The restoration plan must be reached in a very short period of time. However, the combinatorial feature of the problem restricts the application of automatic energy restoration. In this paper, in order to deal with these features, a search method using fuzzy heuristics is proposed. The performance of this method is evaluated using a fairly complex distribution system from São Carlos - SP, Brazil. It is shown that a proper restoration plan is achieved in a very short period of time.

Keywords: graph chain representation, genetic algorithms, distribution systems.

1 INTRODUÇÃO

O restabelecimento de energia em sistemas de distribuição tem despertado um interesse crescente nos últimos anos. Um plano

de restabelecimento de energia elaborado e rápido é requerido depois de uma zona faltosa ter sido identificada e isolada pelos relés do sistema de distribuição. Além disso, durante a operação normal do sistema, é frequentemente necessário isolar zonas para executar tarefas rotineiras de manutenção da rede. Para obter um plano para essas situações, os operadores usam suas experiências anteriores para satisfazer uma série de exigências práticas e objetivas, como operar um número mínimo de chaves, deixar poucos clientes sem energia (ou nenhum) e evitar equipamentos sobrecarregados. Assim, o restabelecimento de energia é um problema de múltiplos objetivos, alguns deles conflitantes.

O crescimento acelerado dos sistemas de distribuição em países em desenvolvimento, como o Brasil, gera configurações de rede complexas. Por exemplo, tais sistemas não possuem seções normalmente-abertas (Devi *et al.*, 1995) ou estruturas nas quais cada lateral de um alimentador pode sempre ser suprida por outros dois alimentadores principais conforme ocorre nos sistemas usados em Morelato e Monticelli (1989) e Hsu e Kuo (1994). Esses aspectos podem complicar o desenvolvendo de programas de computador para restabelecimento de energia automatizado e podem até mesmo restringir seriamente o uso dos procedimentos existentes.

Outros objetivos também poderiam ser considerados de acordo com as exigências de cada companhia. Por exemplo, manter a carga equilibrada entre alimentadores, reduzindo o nível de queda de tensão, evitar planos que precisem de operação de chaves distantes umas das outras no sistema de distribuição (mantendo a topologia original da rede) e minimizar perdas. Um plano de restabelecimento deve ser alcançado em um período de tempo muito pequeno. Porém, a característica combinatorial do problema dificulta o restabelecimento automático de energia.

Este problema pode ser entendido facilmente. Configurações de sistemas de distribuição normalmente são representadas pelo conjunto dos estados das chaves. Essas configurações podem ser descritas por um vetor

$$x = [x_1, \dots, x_n]^T, \quad (1)$$

onde x_i indica o estado da chave, isto é, aberta ($x_i = 0$) ou fechada ($x_i = 1$). Desta forma, 2^n combinações podem ser geradas até que uma possível configuração seja encontrada

¹Membro Sênior do IEEE

(que forneça energia para a área desenergizada) (Castro *et al.*, 1980; Morelato e Monticelli, 1989; Hsu e Kuo, 1994). Isso pode requerer um tempo de processamento muito elevado, principalmente se o sistema de distribuição em consideração for de dimensão grande. Deste modo, métodos que analisem todos os possíveis vetores x não são práticos, até mesmo para sistemas de distribuição pequenos. Para evitar este problema, alguns métodos usam algoritmos de transferência de carga (Aoki *et al.* 1987; Aoki *et al.* 1989; Devi *et al.* 1995). Estes algoritmos verificam se há elementos sobrecarregados e permitem que alimentadores longe da área desenergizada forneçam energia complementar, reduzindo as cargas dos alimentadores perto da área desenergizada. Porém, quando a área desenergizada for muito grande ou o sistema de distribuição operar próximo da capacidade limite, essa proposta pode requerer um tempo de processamento longo também ou pode até não alcançar uma solução satisfatória.

Neste trabalho é proposto um método de busca usando heurísticas *fuzzy* para encontrar soluções adequadas. Esta proposta pode contornar a característica combinatorial e lidar com sistemas de distribuição complexos, com grandes áreas desenergizadas. Na próxima seção, é proposta uma nova representação dos sistemas de distribuição para restabelecimento de energia, bem como uma apresentação sucinta de heurísticas *fuzzy*. Na seção 3, é mostrado o algoritmo de restabelecimento de energia proposto e um exemplo ilustrativo. A seção 4 apresenta algumas considerações finais.

2 UMA NOVA REPRESENTAÇÃO PARA SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO E HEURÍSTICAS FUZZY

Para tornar o procedimento de busca simples e eficiente, uma nova representação para sistemas de distribuição é proposta a seguir (Delbem *et al.* 1998; Delbem e Bretas, 1998). A Fig. 1 mostra um sistema de distribuição no qual linhas retas representam trechos de alimentadores, quadrados vazios são chaves abertas, quadrados cheios são chaves fechadas, SE quer dizer subestação, e regiões da rede entre chaves são setores (a Fig. 2 ilustra os setores 8 e 10 associados à rede da Fig. 1).

Setores compostos por poucos elementos e/ou com pequena carga podem ser unidos para formar um setor maior (a decisão sobre tal união, é baseada na experiência dos operadores). Associado ao sistema de distribuição da cidade de São Carlos (parcialmente mostrado na Fig. 8) existem cerca de 500 setores

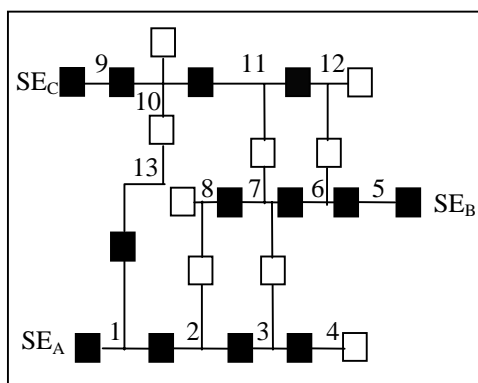


Fig. 1: Sistema de distribuição simplificado.

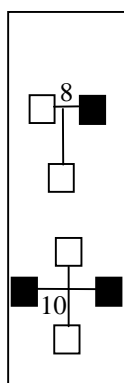


Fig. 2

que foram reduzidos a 150 sem prejuízo da qualidade do plano de restabelecimento de energia.

Usando o conceito de setores, pode-se executar uma busca no espaço de estado dos setores. Como será descrito na próxima seção, usando a representação de espaço de estado dos setores, o número de configurações não factíveis do sistema (isto é, configurações que têm área(s) desenergizada(s)) pode ser reduzido de forma significativa.

2.1 Heurísticas Fuzzy

Com a representação de setores, heurísticas comumente usadas pelos operadores podem ser embutidas diretamente no algoritmo de busca para melhorar seu desempenho. Conjuntos *fuzzy* permitem traduzir conhecimentos intuitivos para uma representação computacional. Este trabalho usa as seguintes heurísticas para guiar a busca de setores:

1. evite setores de alimentador com pequena capacidade livre;
2. prefira setores mais próximos a uma subestação (assumindo que setores mais próximos de uma subestação pertençam em geral a um alimentador principal, assim os estados das chaves de tais setores, em princípio, não deveriam ser mudados).

Se um setor se enquadra em uma dessas duas heurísticas pelo menos, diz-se que tal setor está quente (ou sua temperatura é alta). Caso contrário, diz-se que ele está frio (ou sua temperatura é baixa). Tais heurísticas podem ser expressas através das seguintes heurísticas *fuzzy*:

- i) SE setor_i ESTÁ perto de uma subestação, ENTÃO a temperatura de setor_i É alta. Isto é, esse setor provavelmente está em um alimentador principal. Ou

$$\mu_{TempAlta}(t) = \mu_{SetorProx}(n) \quad (2)$$

onde n é o número de setores indo do setor_i até sua subestação, t é o valor da temperatura, $\mu_{TempAlta}(t)$ é o grau de pertinência do setor_i no conjunto temperatura-alta e $\mu_{SetorProx}(n)$ é o grau de pertinência do setor_i ao conjunto setor-próximo;

- ii) SE a folga do alimentador do setor_i É alta, ENTÃO a temperatura do setor_i É alta. Ou

$$\mu_{TempAlta}(t) = \mu_{FolgaAlta}(c), \quad (3)$$

onde c é a capacidade de folga do alimentador do setor_i, t é o valor de sua temperatura, $\mu_{TempAlta}(t)$ é o grau de pertinência do setor_i ao conjunto temperatura-alta e $\mu_{FolgaAlta}(c)$ é o grau de pertinência do setor_i ao conjunto folga-alta.

Foram criados cinco conjuntos para classificar a distância de setores a subestações; cinco conjuntos para classificar capacidade de folga do alimentador (veja Fig. 3); e cinco conjuntos para classificar temperatura. Cinquenta regras (similares as regras i e ii) foram elaboradas relacionando esses dois primeiros cinco conjuntos com os conjuntos de classificação de temperatura. Um exemplo da implicação *fuzzy* produzida pela regra i) é mostrado na Fig. 4.

As saídas de cada regra são agregadas usando um conectivo disjuntivo (v). Assim $\mu_1 v \mu_2 v \dots v \mu_i v \dots v \mu_{50}$ é a saída *fuzzy* inferida. Usando o *defuzzificador* de centro-médio:

$$t = (\sum t_{\mu_i} * \mu_i) / (\sum \mu_i) \quad (4)$$

onde t_{μ_i} é o ponto no qual μ_i alcança seu valor de máximo. O valor de μ_i é determinado através de regras similares às regras (i) ou (ii).

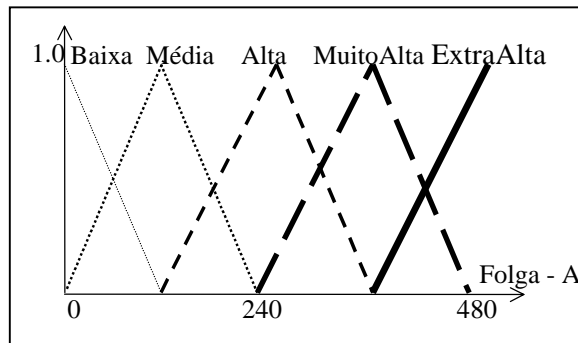


Fig. 3: Conjuntos *fuzzy* para folga do alimentador.

Assim, a árvore de busca pode usar a temperatura estimada do setor para selecionar seu próximo estado (tal busca é chamada busca com heurísticas *fuzzy*). Estes valores de temperatura podem guiar a busca para gerar caminhos melhores, isto é, caminhos menores (que em geral requerem menos operações de chaves) e com carregamento do alimentador reduzido. Além disso, se tal caminho não é possível, a busca pode tentar um caminho mais longo ou até mesmo pode produzir um alimentador com uma sobrecarga aceitável. Assim, o algoritmo proposto é não-determinístico, sem limites rígidos de carregamento e sem limites rígidos do comprimento do caminho (este último item está relacionado à queda de tensão nos alimentadores).

2.2 Vantagens de Heurísticas Fuzzy em Busca para Restabelecimento de Energia

Há várias vantagens nesta proposta de heurísticas *fuzzy* comparada aos métodos disponíveis (Devi *et al.* 1995; Wang *et al.* 1996). No método proposto por Devi *et al.* (1995), para cada fase da busca há um conjunto de chaves que podem ser operadas. Para selecionar uma destas chaves, um fluxo de carga DC (Zhou-Erzhan e Nasle-Ali, 1994) é executado para verificar se as capacidades do alimentador não foram violadas. Assim, em cada fase de busca, é requerido um fluxo de carga

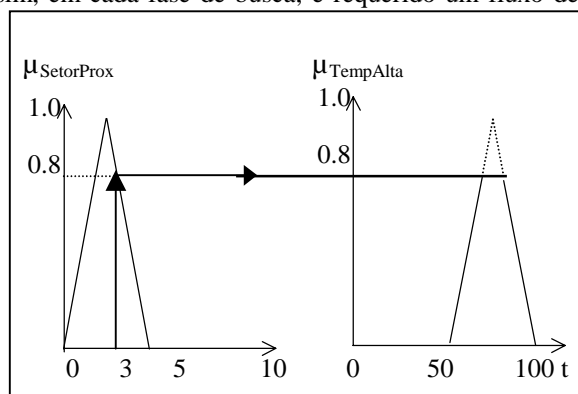


Fig. 4: Exemplo de implicação *fuzzy* produzida pelas regras mencionadas na subseção 2.1.

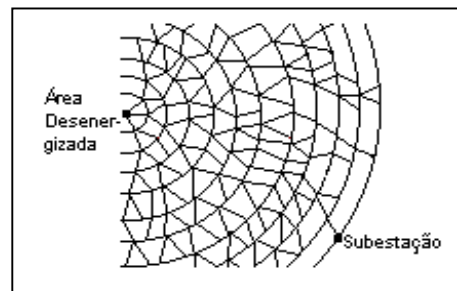


Fig. 5: Busca *Forward*.

DC. Em Wang *et al.* (1996), as chaves a serem operadas são escolhidas através de programação não-linear inteira. Neste caso, o algoritmo precisa de todas as seccionalizações e possibilidades de transferência de carga (isso pode produzir uma explosão combinatorial). Por outro lado, o procedimento aqui proposto escolhe os setores de um caminho baseado em um valor *fuzzy*. Como estes valores são pré-calculados, o algoritmo de busca fica muito rápido. Além disso, usando aquele valor *fuzzy*, a tendência de gerar um caminho sobrecarregado ou de escolher mudanças de configuração do sistema inadequadas pode ser reduzida.

Nos conjuntos de valores *fuzzy* dos setores está implícita uma busca *backward*. No algoritmo de busca, os possíveis estados finais são conhecidos (os setores que estão nas subestações). A busca com heurística *fuzzy* começa em setores de uma área desenergizada e termina em setores de subestação (Fig. 5). Não obstante, uma busca *backward* pode ser executada (de uma subestação para a área desenergizada). Neste caso, uma busca *interwave* (Le, 1993) também pode ser considerada (uma busca de uma área desenergizada para uma subestação, simultaneamente, com uma outra busca de uma subestação para um setor de uma área desenergizada, ver Fig. 6). Porém, os caminhos gerados pela busca *backward* correspondem, em geral, aos alimentadores principais. Esses alimentadores principais estão geralmente embutidos nos conjuntos de valores *fuzzy*. Assim, pode ser considerado que a busca com heurísticas *fuzzy* proposta é uma busca *interwave* na qual sua parte *backward* está pronta.

Um outro ponto importante é que os setores associados com suas temperaturas *fuzzy* incluem implicitamente algoritmos de seccionalização e transferência de carga (Aoki *et al.* 1987; Aoki *et al.*, 1989; Devi *et al.* 1995). Se um caminho da busca é iniciado em um alimentador que não suporta a carga transferida, o setor corrente é automaticamente evitado e um novo setor é selecionado de um outro alimentador de acordo com as temperaturas *fuzzy* (sem a execução de um algoritmo de seccionalização ou de transferência de carga).

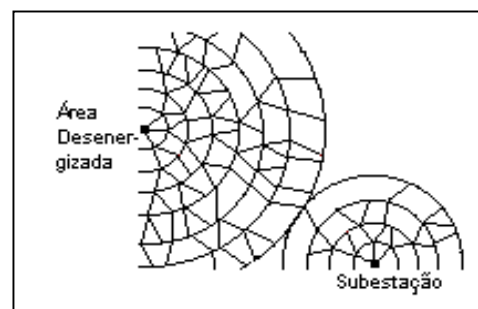


Fig. 6: Busca *Interwave*.

2.3 Chaves Manobradas

A partir do caminho determinado pela busca com heurísticas “fuzzy”, pode-se obter as chaves a serem manobradas no sistema para se restabelecer a energia na Área Desenergizada. Para isso, será definido o conceito de setormãe. Seja o setor_i um determinado setor do sistema, então, o setor_j pelo qual o setor_i é alimentado é denominado de setormãe_i. Por exemplo, na Fig. 8, o setormãe do setor S1 é o setor S4. Desta forma, para cada setor_i do sistema de distribuição tem-se um par (setor_i, setormãe_i).

As manobras são obtidas a partir das seguintes regras:

REGRA 1: Se o setor_i mudou de setormãe, então a chave que une o setor_i ao setormãe_i antigo deve ser aberta;

REGRA 2: Fecha-se todas as chaves abertas entre os setores que formam o caminho obtido pela busca com heurísticas “fuzzy”.

Deve-se observar que os pares (setor_i, setormãe_i antigo) podem ser obtidos de uma lista criada ao longo da busca com heurísticas “fuzzy”. A cada setor do caminho da busca que muda de setormãe, um par (setor_i, setormãe_i antigo) é anexado a tal lista. Deve-se observar também que a REGRA 1 pode abrir algumas chaves à mais. Porém, essa “falha” é sempre corrigida pelas chaves fechadas pela REGRA 2.

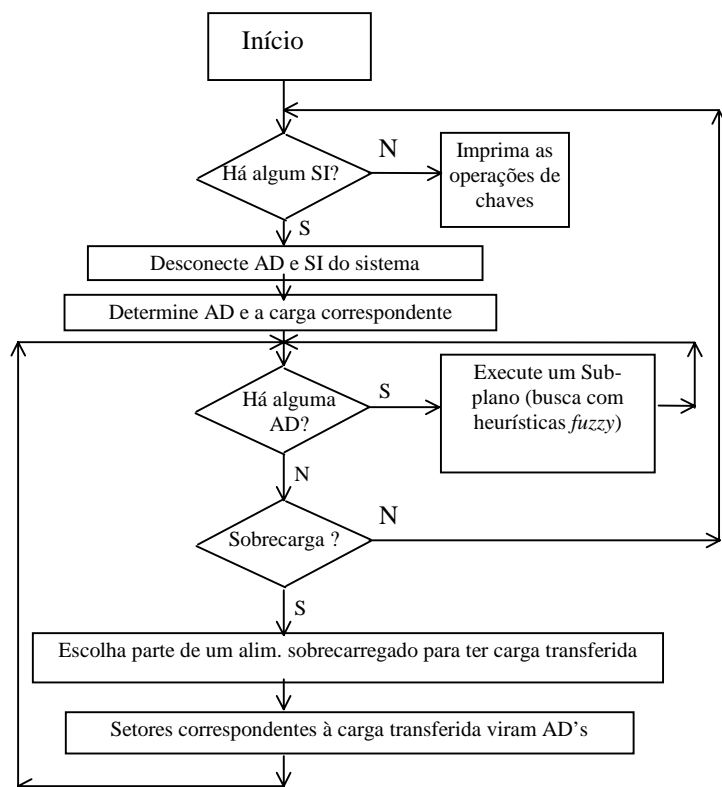


Fig. 7: Fluxograma do procedimento de restabelecimento de energia usando heurísticas fuzzy. (AD: Área Desenergizada e SI: Setor Isolado).

3 ALGORITMO DE RESTABELECIMENTO DE ENERGIA E EXEMPLO

A Fig. 7 mostra um fluxograma simplificado do procedimento de restabelecimento de energia que usa heurísticas fuzzy. Se há algum Setor Isolado (SI), o procedimento determina uma área desenergizada correspondente (AD) e executa uma busca com

heurísticas fuzzy para prover energia para AD. Enquanto houver uma AD, o procedimento não pára.

O restabelecimento de energia usando busca com heurísticas fuzzy foi testado para um sistema de distribuição genérico e de grande porte. A representação simplificada de seu circuito é mostrada em parte na Fig. 8. Utilizando o método proposto, um restabelecimento de energia apropriado é alcançado em poucos segundos. Para propósito de ilustração, parte do alimentador à direita (Fig. 8, linha 2) está desenergizado. A busca usando heurísticas fuzzy produz um caminho (linha D, na Fig. 8) da área desenergizada (AD) para uma subestação (BLV). Nenhum alimentador vizinho daquele alimentador (linha 2) tem capacidade para suprir a carga adicional da área desenergizada. Não obstante, o alimentador logo acima (linha 1) parece ser a melhor opção para o próximo passo da busca. Neste alimentador, a busca identifica um setor de um outro alimentador à esquerda (Fig. 8, linha 3) como a melhor opção para a próxima fase da busca. De fato, este alimentador com folga alta era a melhor opção (veja Fig. 9). Assim a busca consegue restabelecer uma área desenergizada sem executar um algoritmo de seccionalização ou de transferência de carga, isto é, um plano de restabelecimento de energia é obtido com somente um sub-plano. Todo o processo foi realizado em 15 segundos para o caso mostrado acima, usando o Interpretador Arity Prolog V6.0 em um Pentium100 com 32 MB de memória RAM.

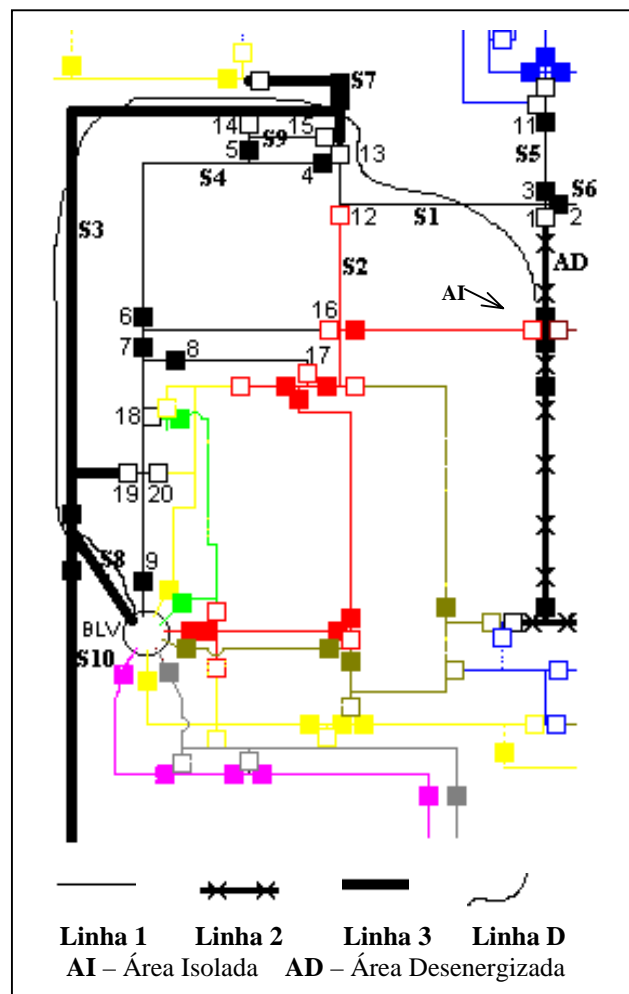


Fig. 8: Configuração antes do plano de restabelecimento de energia ter sido executado

Com o objetivo de comparar o desempenho do algoritmo de busca com heurísticas fuzzy com outros algoritmos de busca

existentes para restabelecimento de energia em sistemas de distribuição, foi executada uma busca no espaço de estados das chaves de acordo com a busca proposta por Devi et al. (1995) para a área desenergizada anterior (a árvore de busca correspondente é mostrada na Fig. 10). Depois de escolher uma chave para transferir carga (Chave de Transferência de Carga: LTS), um Fluxo de carga DC (DCLF) (Zhou-Erzhuang e Nasle-Ali, 1994) é executado para verificar perdas e sobrecarga de equipamentos. Se existe sobrecarga, uma chave para seccionar o alimentador é escolhida (Chave de Seccionalização: SS), e assim por diante. Os ramos da árvore de busca formada pelas chaves 1, 4 e 13 correspondem à solução (o asterisco na Fig. 10). A busca gera mais de 18 nós. A Fig. 11 mostra a árvore de busca no espaço de estado dos setores para a mesma área desenergizada. A busca inicia em um setor da AD e termina em um setor de uma Subestação (SE). Os setores (Si) podem ser vistos na Fig. 8, bem como o caminho produzido pela busca. Esta busca gera 11 nós. Portanto, o espaço de estado dos setores é significativamente menor que o espaço de estado das chaves.

4 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta uma proposta para automatização do restabelecimento de energia. Tal proposta pode superar a característica combinatorial associada ao problema e obter um plano de restabelecimento de energia em um intervalo de tempo muito curto. Além disso, usando heurísticas *fuzzy*, a proposta pode imitar o raciocínio dos operadores. Esta proposta também permite automatizar o restabelecimento de energia em sistemas de distribuição complexos sem zonas normalmente abertas ou sem outras características regulares na configuração de sistema. Esta proposta ainda reduz tempo de processamento devido aos seguintes motivos: i) redução do tamanho da árvore de busca; ii) pré-cálculo dos parâmetros *fuzzy* e iii) representação dos sistemas de distribuição através de setores, o que permite evitar

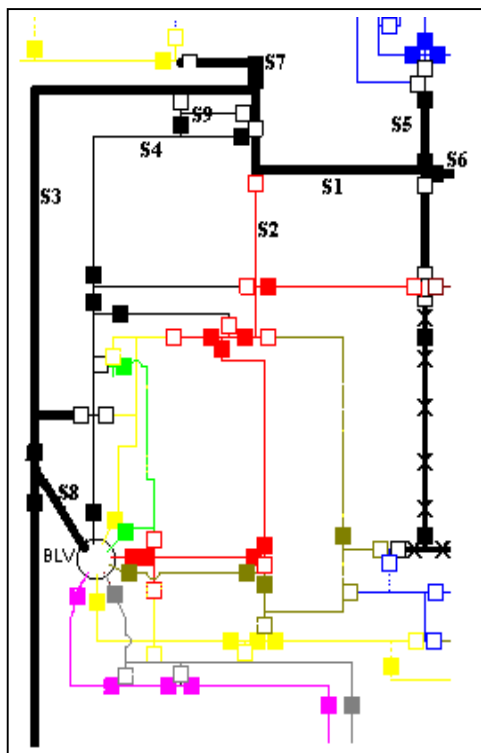


Fig. 9: Configuração após o plano de restabelecimento de energia ter sido executado

em parte o uso de um algoritmo de seccionalização e de transferência de carga. Em outras palavras, o método proposto economiza tempo de processamento pois evita diversas rotinas e cálculos durante a execução da busca os quais sempre são requeridos pelos métodos existentes.

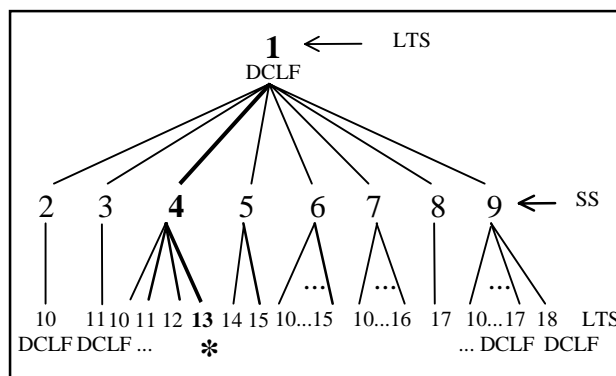
Uma maior detalhamento da metodologia proposta pode ser obtido na dissertação de mestrado referenciada neste artigo como Delbem e Bretas (1998).

5 AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi apoiada em parte pelo CNPq e pela FAPESP.

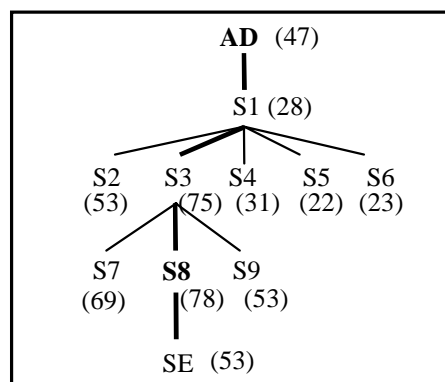
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- Aoki, K., H. Kuwabara, T. Satoh e M. Kanezashi (1987). 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.
- Aoki, K., K. Nara, M. Itoh, T. Satoh e H. Kuwabara (1989). A new algorithm for service restoration in distribution systems. *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 4, No. 3, pp. 1832-1839.



LTS – Chave de Transferência de Carga
DCLF – Fluxo de carga
SS – Chave de Seccionalização DC

Fig. 10: Árvore de busca no estado de espaço das chaves.



AD – Área Desenergizada;
SE – Subestação
Si – Setor i;
(.) – Temperatura *fuzzy* do Si

Fig. 11: Árvore de busca no estado de espaço dos setores

- Castro, C. H., J. B. T. Bunch e M. Terry (1980). Generalized algorithms for distribution feeder deployment and sectionalizing. *IEEE Trans. on PAS*, Vol. PAS-99, No.2, pp. 549-557.
- Delbem, A. C. B. e N. G. Bretas (1998). *Restabelecimento de Energia em Sistemas de Distribuição Utilizando Algoritmo com Heurísticas "Fuzzy"*, Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica – EESC – USP.
- Delbem, A. C. B., N. G. Bretas e A. C. P. L. F. Carvalho (1998). Energy Restoration in Distribution Systems Using Search with *Fuzzy* Heuristics. *International Journal of Engineering Intelligent Systems for Electrical Engineering and Communications*, Vol. 6, No. 4, pp. 201-205.
- Devi, V. S. D., P. S. Gupta e G. Anandalingam (1995). Optimal restoration of power supply in large distribution systems in developing countries. *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 10, No. 1, pp. 430-437.
- Hsu, Y., e H. Kuo (1994). A heuristic based *fuzzy* reasoning approach for distribution system service restoration. *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol.9, No.2, pp. 948-953.
- Le ,T. V. (1993), *Techniques of prolog programming*. John Wiley & Sons.
- Morelato, A. L. e A. Monticelli (1989). Heuristic search approach to distribution system restoration. *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 4, No. 4, pp. 2235-2241.
- Wang, J., H. Chiang e G. R. Darling (1996). 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.
- Zhou-Erzhan e Nasle-Ali (1994). Simulation of DC Power Distribution Systems. *IEEE Industrial and Commercial Power System Technical Conference*, Irvine, CA, USA, pp.191-195.