

RECONFIGURAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DE FERRAMENTA PARA SOLUÇÃO DE PROBLEMAS DE DECISÃO COM MÚLTIPLOS OBJETIVOS E INCERTEZAS

Nelson Kagan, Carlos César Barioni de Oliveira

Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Av. Prof. Luciano Gualberto, Travessa 3, 158, CEP 05508-900, São Paulo, SP
E-mail: nelsonk@pea.usp.br barioni@pea.usp.br

RESUMO Este artigo apresenta a aplicação de um sistema computacional, que permite a modelagem de problemas genéricos de decisão com restrições (PDR), para a análise de alternativas de reconfiguração de um sistema de distribuição de energia elétrica quando da ocorrência de um defeito num ponto qualquer da rede. Uma vez identificado o ponto no qual o defeito ocorreu, deve-se isolar a menor porção possível da rede, através da abertura de dispositivos de seccionamento, e proceder a manobras de outras chaves que permitam restabelecer o suprimento de energia aos consumidores localizados à jusante da área isolada, com o atendimento a critérios técnicos de operação da rede, como níveis de tensão e carregamento máximo de seus componentes. Em sistemas reais observa-se um grande número de possíveis soluções, onde há necessidade de se obter rapidamente uma configuração que atenda aos critérios técnicos de operação da rede. Um procedimento heurístico de busca permite a rápida obtenção de soluções otimizadas. Aspectos referentes a imprecisões, incertezas e subjetividades inerentes ao problema são tratados através da teoria dos conjuntos difusos. Múltiplos objetivos são também considerados: a minimização do número de chaves manobradas e um índice de qualidade que agrega e pondera os níveis de tensão e de carregamento.

Palavras chaves: Reconfiguração, Distribuição de Energia, Problemas de Decisão.

ABSTRACT This paper presents a specific application of a computational system to model general constrained decision problems. This application is concerned with the reconfiguration of distribution systems following a fault in a given network section. Once the fault is located one should isolate a minimum part of the system through the switching equipment and try to re-energize the customers - located further to the opened switch(es) - by feeder interconnection switches. This problem is combinatorial in nature and an extremely large number of possible solutions can be identified when dealing with networks of practical size. A heuristic search approach allows the evaluation of optimized/feasible solutions in an efficient way. Uncertainty, imprecision and subjectivity aspects are dealt with by the use of fuzzy sets theory. Multiple objectives regarding minimum number of

switching operations and maximization of a technical index - including voltage drop and loading - are also considered in the formulation.

Keywords: Reconfiguration, Distribution Systems, Decision Making.

1 INTRODUÇÃO

Para atender um mercado cada vez mais exigente, as empresas concessionárias de energia elétrica têm continuamente desenvolvido esforços no sentido de melhorar a qualidade de seu produto, ou seja, da energia elétrica fornecida aos seus consumidores. A crescente automatização dos sistemas de distribuição traz a possibilidade de se alterar mais facilmente a configuração da rede, através de manobras dos dispositivos de seccionamento, viabilizando ações que permitam operar o sistema sempre da maneira mais adequada, com redução nas perdas e melhoria nos níveis de carregamento e de tensão. Por outro lado, as interrupções no fornecimento da energia são inevitáveis, quer seja para a execução de obras de expansão do sistema, para intervenções de manutenção preventiva em componentes da rede ou, então, pela atuação de um dispositivo de proteção em decorrência de um defeito. Em todos estes casos, deve-se dispor de um plano de manobras para a reconfiguração do sistema, de forma a restringir ao mínimo a área a ser desenergizada, buscando-se restabelecer o suprimento de energia para os consumidores localizados à jusante desta área o mais rapidamente possível, através de manobras de dispositivos de seccionamento existentes na rede, mantendo ainda a condição de radialidade do sistema.

Estes assuntos têm sido estudados por diversos autores (Merlin, A. & H. Back 1975, Civanlar, S. *et alii* 1988, Liu, C.C. *et alii* May 1988, Taylor, T. & D. Lubkeman 1990, Wu, J.S. *et alii* 1992, Shirmohammadi, D. 1992, Cherkaoui, R. *et alii* 1993, Hsu, Y.Y. & H.C. Kuo 1994, Roytelman, I. *et alii* 1996), e o problema da reconfiguração após uma contingência será enfocado neste artigo. Os dois problemas apresentados, (i) reconfiguração da rede em condição de operação normal para minimização das perdas e melhoria nos perfis de tensão, e (ii) reconfiguração da rede em situação de contingência, caracterizam-se pela sua natureza combinatoria, ou seja, para sistemas reais o número de possíveis alternativas pode tornar-se sobremodo elevado, dificultando a obtenção de soluções eficientes ou otimizadas. Além disso, dependendo dos anseios da empresa ou do planejador, pode ser necessário que sejam

Artigo submetido em 25/11/96

Revisado em 13/08/97

Artigo aceito sob recomendação do Ed. Cons. Prof. Dr. Jorge Coelho

contemplados múltiplos objetivos na busca destas soluções, mesmo que com diferentes graus de importância. Por exemplo, na reconfiguração de um sistema após contingência, pode-se considerar como atributo de otimização principal a minimização do número de chaves manobradas, ao mesmo tempo em que se almeja, secundariamente, atender os consumidores desenergizados com os melhores níveis de tensão possíveis nesta situação. Outra consideração a ser feita é que estes problemas apresentam também aspectos de incerteza e subjetividade. Existem incertezas presentes, por exemplo, nos valores das demandas das cargas, nos tempos de reparo de um defeito, e nos custos das perdas. É subjetivo afirmar “o quanto” minimizar as perdas é *mais importante* que maximizar os níveis de tensão.

Na área de Inteligência Artificial (IA), estes problemas podem ser classificados como pertencentes a classe de Problemas de Decisão com Restrições (PDRs), que são problemas de decisão de planejamento que se caracterizam por conter múltiplos objetivos; podem ser decompostos em sub-problemas mais específicos, através de uma estrutura hierárquica, devem atender a uma série de restrições (globais ou específicas), e devem possuir recursos para replanejamento diante de contingências ou oportunidades. Os PDRs são problemas de natureza combinatória, e muitos problemas desta categoria requerem ainda que sejam contemplados aspectos de incertezas, como imprecisão de dados, análise de cenários e preferências subjetivas do tomador de decisões.

Os autores desenvolveram uma ferramenta genérica (shell) para a modelagem desta classe de problemas, designada FCDP (Fuzzy Constrained Decision Problems) (Kagan, N. & J. Bigham, 1993, Kagan, N. *et alii* 1995, Kagan, N. & C.C.B. Oliveira, 1996, Kagan, N. & C.C.B. Oliveira, 1996a). Nesta ferramenta o processo de solução é desenvolvido por um *mecanismo de inferência*, que é independente do problema tratado e que é baseado em técnicas de busca heurística. Três técnicas genéricas de busca em árvores de alternativas podem ser utilizadas, de acordo com as características do problema a ser solucionado: busca em profundidade (depth first search), busca em amplitude (breadth first search), ou busca pelo melhor caminho (best first search). O processo de busca é orientado através de uma função específica do problema, que representa a *estrutura de preferências* a ser utilizada.

A utilização de regras e funções heurísticas pode levar à determinação de soluções otimizadas com pequeno tempo de processamento, principalmente quando comparado com outras abordagens baseadas em programação matemática (Kagan, N. 1992). A utilização de modelos determinísticos torna sobremodo difícil a representação de incertezas e aspectos subjetivos. As restrições de um problema não são necessariamente rígidas, podendo algumas vezes serem relaxadas, transformando-se em restrições “suaves”. No FCDP, os dados e os coeficientes dos objetivos e das restrições podem ser modelados por números difusos e, em consequência, todas as operações envolvendo estas variáveis são feitas de forma difusa.

O artigo está organizado da maneira a seguir. No item 2 apresenta-se a ferramenta desenvolvida para a solução de PDRs, de modo a introduzir o leitor no assunto, que se encontra detalhado em artigos já publicados (Kagan, N. & J. Bigham, 1993, Kagan, N. *et alii* 1995, Kagan, N. & C.C.B. Oliveira, 1996, Kagan, N. & C.C.B. Oliveira, 1996a). No item 3 é apresentada a formulação do problema de reconfiguração de um sistema de distribuição de energia elétrica. No item 4

são apresentados os resultados de um caso-teste. O problema é tratado utilizando-se a teoria de conjuntos difusos para tratar de aspectos relativos às incertezas da carga e aos parâmetros das funções objetivo. No item 5 são apresentadas as conclusões e comentários finais.

2 A FERRAMENTA UTILIZADA

2.1 Introdução

Petrie (1992) definiu os Problemas de Decisão com Restrições como uma classe de problemas de planejamento que se caracterizam por múltiplos objetivos, que podem ser decompostos hierarquicamente em sub-problemas, que devem atender a uma série de restrições genéricas, e que possuem recursos para replanejamento. A *shell* desenvolvida para a solução de PDRs utiliza uma estrutura hierárquica, conforme ilustrado na figura 2.1, e conta com os seguintes elementos principais:

- i. *metas*: definem o problema e são dinamicamente geradas pela aplicação dos operadores durante o processamento;
- ii. *frames*: representam classes e objetos de um problema específico;
- iii. *operadores*: entidades que podem ser aplicadas quando um conjunto de condições é satisfeito. A sua aplicação resulta em novas sub-metas e novas instâncias aos objetos das *frames*;
- iv. *restrições*: condições que não podem ser violadas durante o processo;
- v. *estrutura de preferências*: função específica do problema que determina a ordem de aplicação dos operadores/instâncias, direcionando o processo de busca da solução.

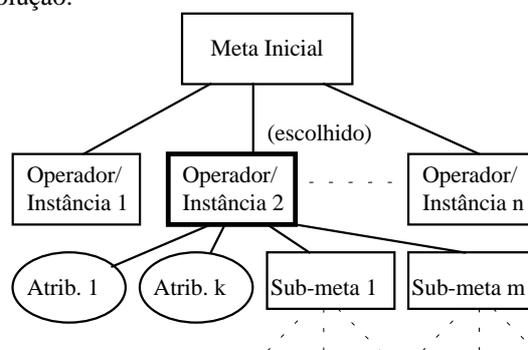


Figura 2.1 - Estrutura hierárquica do FCDP

A partir de uma meta inicial estabelecida, o sistema avalia o conjunto de operadores que podem ser aplicados à instância inicial do problema. Os operadores/instâncias são dinamicamente ordenados por uma função definida pelo usuário, que estabelece uma estrutura de preferências para direcionar o processo de busca. Com o operador/instância escolhido, novas sub-metas são geradas e novas atribuições aos objetos das *frames* são estabelecidas. Se nenhuma restrição for violada, o processo continua até que todas as sub-metas sejam satisfeitas, e portanto uma solução viável seja encontrada. Se alguma restrição for violada, um procedimento de retrocesso (*backtrack*) é realizado pelo mecanismo de inferência, retornando a um nível de decisão anterior, e então um novo caminho da árvore de busca ainda não explorado será analisado. Quando uma solução é encontrada, o procedimento é interrompido; novas soluções podem ser solicitadas

sucessivamente, quando o sistema parte da última solução encontrada e continua o processo de busca analisando novos caminhos ainda não explorados.

2.2 A estrutura das Frames e os Operadores

As informações básicas de um problema a ser resolvido são armazenadas na estrutura das *frames*, assim modeladas na *shell*:

- i. *frame_templates*, onde são definidas as frames a serem utilizadas e descritos seus objetos;
- ii. *frame_instâncias*, onde são fornecidos os valores iniciais dos objetos das frames.

Os objetos de uma frame podem conter elementos dos seguintes tipos:

- *s (string)*, para valores alfanuméricos;
- *r (real)*, para valores numéricos com ponto flutuante;
- *i (int)*, para valores numéricos inteiros;
- *f (fuzzy)*, para a representação de números difusos triangulares, compostos de uma terna de valores numéricos com ponto flutuante;
- *fs (fuzzy-string)*, para a declaração simbólica de números difusos triangulares pré-definidos no sistema (muito, pouco, médio, etc). Desta maneira, um *fs* é equivalente a uma variável lingüística;
- *p*, para a representação de ponteiros.

Um operador é composto pelos seguintes itens:

- i. *variáveis*: definição dos nomes e tipos das variáveis locais do operador. As variáveis podem ser dos tipos já descritos (*string*, *real*, *int*, *fuzzy*, *fuzzy-string*, *p*) ou ainda do tipo *frame*, quando poderá assumir o valor da instância de qualquer objeto da frame especificada;
- ii. *meta aplicável*: define a meta ou sub-meta existente na agenda de trabalho à qual o operador se aplica;
- iii. *dado que*: define as condições necessárias para que o operador possa ser aplicado. Esta verificação é realizada dinamicamente, com os valores correntes na memória de trabalho, pois os valores dos objetos das frames podem ser constantemente modificados durante o procedimento de busca de solução do problema. Para a descrição destas condições, a *shell* conta com algumas funções pré-definidas, como por exemplo: “let”, para atribuição de valores a uma variável local, “match”, para a determinação de todos os objetos de uma *frame* que atendam a uma ou mais condições especificadas, “xmatch”, para a determinação de objetos de *frames* distintas que contenham elementos relacionados que atendam condições estabelecidas, “cmp”, para comparação de valores do tipo *string*, e “>”, “<”, “=”, para comparação de valores numéricos, etc. Além destas funções, o sistema foi desenvolvido de forma tal que o usuário pode elaborar funções procedurais próprias para o problema a ser tratado, escritas em linguagem ‘C’ com algumas regras específicas, que são facilmente incorporadas ao sistema;
- iv. *contingências*: verifica a existência de algum estado anormal ou alguma nova situação que requeira a aplicação de procedimentos de replanejamento;
- v. *novas instâncias*: define a criação de novas instâncias de uma determinada frame;

vi. *novas atribuições*: define novos valores para certos elementos de um ou mais objetos de uma *frame*. Aqui também o usuário pode definir funções procedurais escritas em linguagem ‘C’ para serem incorporadas ao sistema.

vii. *novas metas*: define novas metas ou sub-metas a serem alcançadas, que são adicionadas à agenda de trabalho.

2.3 Técnicas de Busca Heurística utilizadas no FCDP

O FCDP dispõe de duas técnicas básicas de busca: (i) busca em profundidade com estrutura de preferências, que é uma variação da técnica básica de busca em profundidade, com a incorporação de regras heurísticas, e (ii) busca pelo melhor caminho (“best-first-search”).

No primeiro caso, existem dois níveis de utilização possíveis no FCDP. Na forma mais simples, a estrutura de preferências é definida pela utilização dos operadores aplicáveis à meta corrente, na ordem em que foram montados pelo usuário, e se o operador escolhido puder ser aplicado a vários objetos ou instâncias de uma frame, será aplicado ao primeiro elemento que for encontrado, também na ordem em que estes foram armazenados na base de dados utilizada. A vantagem da utilização desta técnica é que o usuário pode descrever facilmente o problema a ser solucionado, apenas com as funções intrínsecas da *shell*. Esta técnica mostra-se adequada para a resolução de problemas de pequenas dimensões, ou de dimensões médias cuja meta é encontrar uma solução factível para o problema, ou seja, quando não é importante a determinação da solução “ótima”. Este é o caso, por exemplo, da reconfiguração da rede após uma contingência, quando o mais importante é encontrar rapidamente uma solução para o problema, mesmo que não seja a melhor alternativa, pois trata-se de uma situação temporária e de emergência. Num segundo nível, a estrutura de preferências é determinada por uma função de avaliação, específica do problema a ser tratado. Neste caso, esta função deve ser desenvolvida em linguagem ‘C’, e facilmente é incorporada ao sistema. Em cada nó da árvore de busca, todos os operadores aplicáveis são avaliados, para todas os objetos ou instâncias correspondentes, resultando numa ordenação dinâmica através de uma nota ou índice de avaliação, que determina qual o caminho mais promissor a ser seguido. Dependendo da função implementada, esta técnica pode ser considerada do tipo “hill climbing” ou “gradient search” (Rich, E. & K.Knight 1991). Em todos estes casos, as soluções encontradas podem ser *ótimos locais*. Para contornar este problema, quando a meta do problema inclui a otimização de um ou mais objetivos, o FCDP permite que um procedimento de retrocesso (“backtrack”) seja realizado após a obtenção de uma solução. Neste caso, o sistema retorna ao nível de decisão anterior na árvore de busca, e outros caminhos ainda não explorados podem ser percorridos. Neste caso, sempre que uma solução parcial indique um caminho que leve a uma solução pior que a melhor solução completa já encontrada, ou a uma melhoria considerada insatisfatória, este caminho é podado, e um novo procedimento de retrocesso é efetuado (técnica de “branch and bound”). Adicionalmente, para cada novo nó gerado pela aplicação de um operador, todas as restrições do problema são verificadas, e caso haja violação de qualquer delas, o caminho também é podado e um procedimento de retrocesso é realizado.

Um procedimento de busca do tipo “best-first-search” combina as vantagens dos processos de busca em profundidade e de busca em amplitude. Em cada passo do processo, seleciona-se

o nó mais promissor dentre *todos* aqueles gerados até então, pela aplicação de uma função heurística de avaliação específica para o problema. No FCDP, utiliza-se uma função baseada num algoritmo conhecido por A* (Rich, E. & K.Knight 1991, Hart, P.E. *et alii* 1968), ajustado ao problema específico a ser analisado. Neste algoritmo, utiliza-se uma função de avaliação de cada nó da árvore de busca (função f'), composta de duas parcelas ($f' = g + h'$). A primeira delas, chamada função g , avalia a qualidade do caminho percorrido até se alcançar o nó que está sendo analisado (por exemplo através de um valor de custo calculado para o caminho percorrido desde o nó inicial até ele). A função h' , por sua vez (que é uma avaliação do nó propriamente dito), é um estimador de h , que é o valor correto de quanto falta para a solução ser alcançada a partir daquele nó (por exemplo através de uma estimativa do custo adicional para se alcançar o nó-meta). Neste caso, a qualidade do estimador h' é determinante para o sucesso do processo de busca; se h' sempre subestimar o valor de h , pode-se demonstrar que a solução obtida será a ótima.

2.4 Números Difusos para Tratamento de Incertezas

Para considerar os aspectos de incertezas e subjetividade na tomada de decisão, o FCDP conta com recursos que possibilitam o seu tratamento, através da utilização da teoria dos conjuntos difusos. Dados que contenham incertezas são representados através de números difusos. Um número difuso é um sub-conjunto difuso definido no conjunto dos números reais, ao qual se associa uma função de pertinência. No FCDP, as grandezas declaradas como sendo difusas são tratadas como números difusos triangulares, que são representados por uma tripla de números reais (a_1, a_2, a_3), conforme pode ser visualizado na figura 2.2. Todas as operações aritméticas podem ser estendidas aos números difusos (Kaufmann, A. & M.M. Gupta, 1988), e o FCDP conta com uma biblioteca específica para a realização destas operações.

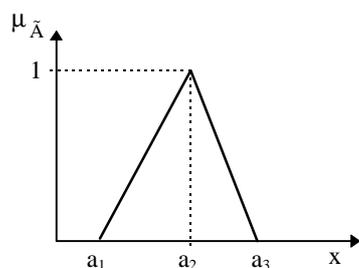


Figura 2.2 - Representação de um número difuso triangular

A utilização da teoria dos conjuntos difusos é particularmente importante no tratamento de restrições, principalmente quando existem incertezas presentes no problema, pois torna-se possível relaxar ou suavizar algumas restrições. A comparação entre duas grandezas difusas, para avaliar se uma restrição está ou não sendo violada, deve ser realizada de forma apropriada, e duas técnicas foram incorporadas ao FCDP. O primeiro método é baseado no princípio da extensão (Kaufmann, A. & M.M. Gupta, 1988, Dubois, D. & H. Prade, 1980). Sendo \tilde{A} e \tilde{B} dois números difusos, o grau de possibilidade de \tilde{A} ser maior que \tilde{B} é definido como:

$$v(\tilde{A} \geq \tilde{B}) = \sup_{x, y, x \geq y} \min[\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(y)]$$

Se $\tilde{A} = (a_1, a_2, a_3)$ e $\tilde{B} = (b_1, b_2, b_3)$ forem dois números difusos triangulares, então:

$$v(\tilde{A} \geq \tilde{B}) = 1 \quad \text{se } a_2 \geq b_2$$

$$v(\tilde{B} \geq \tilde{A}) = \max(\tilde{A} \cap \tilde{B}) = \mu_{\tilde{A}}(c) = \mu_{\tilde{B}}(c)$$

onde c é o ponto de interseção entre as funções de pertinência de \tilde{A} e \tilde{B} , conforme pode ser observado na figura 2.3.

O segundo método (Dubois, D. & H. Prade, 1980) é baseado na aplicação sequencial de três critérios: deslocamento, moda e divergência. Para o primeiro critério, são calculadas duas áreas a partir da origem ($x=0$), a primeira delimitada pelo lado esquerdo do número difuso e a segunda pelo lado direito. O deslocamento do número difuso com relação à origem ($R_{\tilde{A}}$) é definido como sendo a média destas áreas. Sendo $\tilde{A} = (a_1, a_2, a_3)$ um número difuso triangular, resulta:

$$R_{\tilde{A}} = \frac{a_1 + 2a_2 + a_3}{4}$$

Se a diferença entre os valores de deslocamento for pequena, calcula-se a moda (valor com pertinência igual a 1), e, se ainda assim a indefinição persistir, verifica-se a divergência em torno da moda.

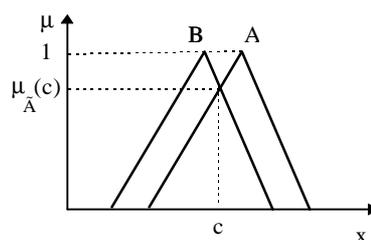


Figura 2.3 - Comparação entre números difusos triangulares

3 RECONFIGURAÇÃO DE UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

3.1 Introdução

A redução nos índices de interrupção de energia elétrica dos consumidores deve ser um alvo permanente das empresas de distribuição de energia elétrica, o que, em outras palavras, representa uma busca de melhoria na qualidade do fornecimento da energia elétrica. Isto representa não somente maior conforto e satisfação para os consumidores residenciais, mas também uma necessidade cada vez maior dos consumidores comerciais e principalmente para alguns segmentos industriais, para os quais as interrupções prolongadas no fornecimento de energia elétrica podem inclusive comprometer sua produção. Por outro lado, as interrupções são inevitáveis, quer para a execução de obras de manutenção preventiva dos componentes da rede ou devido a ocorrência de um defeito no sistema, como por exemplo, um curto-circuito decorrente da queda de uma árvore na rede elétrica.

De uma maneira geral, as seguintes ações devem ser tomadas quando ocorre um defeito num ponto qualquer da rede:

- identificar o local onde o defeito ocorreu;
- isolar a menor parte possível do sistema, pela abertura de chaves;

- sinalizar chaves que não podem ser operadas (segurança);
- manobrar chaves para restabelecer o suprimento à jusante do bloco isolado;
- correção do problema;
- novas manobras de chaves para retornar ao estado normal.

Em qualquer dos casos descritos anteriormente, deve-se dispor de um plano de manobras para a reconfiguração do sistema, de forma a restringir ao mínimo a área a ser desenergizada, buscando-se restabelecer o suprimento de energia aos consumidores localizados à jusante desta área o mais rapidamente possível através de manobras de dispositivos de seccionamento e de proteção existentes na rede, mantendo ainda a radialidade do sistema. Por serem situações transitórias, ou seja, configurações que permanecerão tão somente durante o tempo necessário para a execução das obras de manutenção ou de reparo, é perfeitamente aceitável que os critérios técnicos de operação da rede sejam relaxados, admitindo-se por exemplo níveis de tensão menores e trechos de rede e transformadores de subestações mais carregados, obviamente dentro de limites toleráveis. Além disso, não se torna sobremodo importante almejar, nestes intervalos, algumas condições operativas que são consideradas “ótimas” em condição normal de operação da rede, como por exemplo a de minimização das perdas.

Por outro lado, alternativas que minimizem o número de chaves a serem manobradas devem ser preferidas, pois normalmente quanto maior o número de manobras, maior é o tempo gasto para a sua realização e, conseqüentemente, maior o tempo de interrupção para os consumidores. Além disso, maiores serão os deslocamentos de equipes de manutenção e, portanto, maiores os custos envolvidos na operação. É comum nos sistemas de distribuição, a política de se dispor de chaves internas em cada alimentador que, em condições normais, operam normalmente abertas (NA), aqui chamadas de chaves de socorro interno. É usual que sejam preferidas alternativas locais, ou seja, que sejam manobradas somente chaves normalmente fechadas (NF) ou NA de socorro interno do alimentador atingido pela manutenção ou defeito. Somente no caso de não ser possível outra alternativa é que se utilizam as chaves de socorro externo, ou seja, chaves NA de interconexão entre alimentadores distintos. Na figura 3.1 estão ilustrados os três tipos de chaves, para um sistema com duas subestações (SE) e três alimentadores.

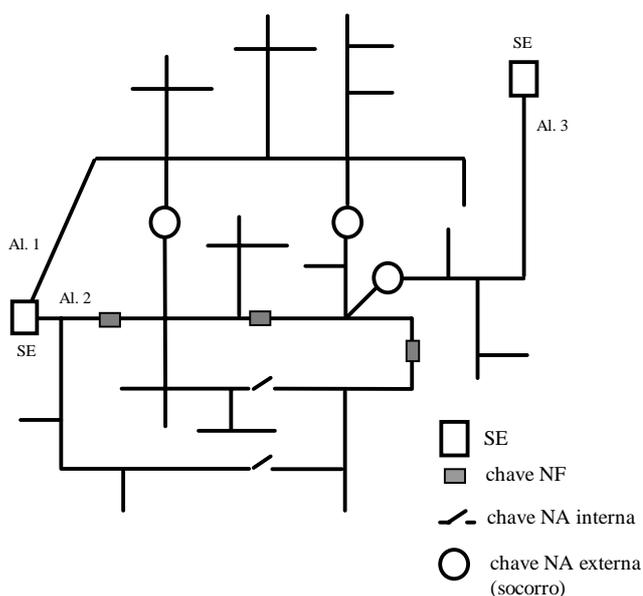


Figura 3.1 - Chaves utilizadas para manobras

Neste trabalho considerou-se adicionalmente um outro objetivo para a determinação da melhor política de reconfiguração do sistema, porém com menor grau de importância. Este objetivo adicional diz respeito à maximização de um índice técnico de qualidade, que leva em conta o montante da carga atendido em faixas de tensão pré-estabelecidas e o carregamento, em por cento do admissível, de trechos de rede em faixas pré-definidas. O assunto será focado como um problema de otimização, e uma função objetivo que agrega e pondera os dois objetivos considerados deverá ser maximizada. A consideração de mais de um objetivo leva a um problema de múltiplos objetivos. Neste caso um conjunto de soluções eficientes ou não dominadas pode ser determinado (Kagan, N. 1992), e a solução mais satisfatória irá depender de preferências subjetivas do tomador de decisões.

3.2 Estratégias de Reconfiguração

O problema proposto pode ser dividido em duas etapas. Inicialmente, deve-se efetuar as manobras de chaves necessárias para isolar o bloco da rede onde ocorreu um defeito, bem como a sinalização de chaves de socorro interno ou externo que se ligam ao bloco e que não podem ser fechadas enquanto o defeito não for sanado. Em seqüência, deve-se reconfigurar o restante do sistema, através da manobra de chaves NA internas e chaves de interconexão entre alimentadores.

Para a obtenção de soluções para a segunda etapa do problema, definiu-se uma estratégia heurística para a exploração do espaço de possíveis configurações do sistema. O princípio básico adotado foi o de se efetuar, a partir de uma configuração inicial (que não precisa ser necessariamente uma configuração viável), alterações elementares sucessivas nesta configuração, através de abertura ou de fechamento de chaves. Duas estratégias foram adotadas neste artigo: estratégia *construtiva* e estratégia *destrutiva*. Outros tipos de estratégias podem ser aplicadas, como por exemplo a técnica do tipo “branch-exchange” (Cherkaoui, R. et alii, 1993), quando se parte de uma configuração radial e uma alteração elementar no sistema consiste na abertura de uma chave e fechamento de uma outra, escolhidas convenientemente de modo a manter sempre a radialidade do sistema.

Com a utilização da estratégia construtiva, considera-se para o nó inicial da árvore de busca que todos os trechos de rede estão utilizados, e que todas as chaves de interesse do sistema estão abertas. Aplica-se então um operador que altere o estado de uma das chaves (fechando-a). Este movimento pode levar a três possíveis estados: configuração radial conexa, existência de malhas ou existência de ilhas (conjuntos de trechos não conexos). Uma configuração radial conexa pode ser uma solução para o problema, e então uma função de fluxo de potência é executada para se verificar se não há violação dos critérios técnicos estabelecidos. Em caso de violação um procedimento de retrocesso é realizado. Se a configuração resultante contiver ilhas, o processo de busca é continuado, e uma nova chave será fechada. Se ocorrer o surgimento de uma malha, o caminho é cortado e um procedimento de retrocesso é realizado, pois novos fechamentos de chaves não irão eliminar esta malha. O surgimento de malha pode ser previamente eliminado, com a introdução de uma heurística simples nas condições para a aplicação do operador: uma chave somente pode ser fechada se somente uma de suas barras terminais já estiver energizada. Quando uma solução é encontrada, o valor da função objetivo (obtido por uma média ponderada dos valores dos objetivos considerados) passa a ser a referência

para a busca de novas soluções. Qualquer outra solução, mesmo que parcial, que apresente um valor pior que aquele, será rejeitada, e uma nova região será explorada. O processo assim continua, e cada nova solução alcançada que melhore a função objetivo é apresentada ao planejador, e passa a ser a nova referência. O processo termina quando não existir outra solução melhor que a última encontrada, ou quando o tomador de decisões considerar satisfatória uma das soluções já encontradas.

Na estratégia destrutiva, o procedimento é dual ao utilizado na estratégia construtiva. No estado inicial os trechos de rede estão energizados e todas as chaves do sistema estão fechadas. No desenvolvimento do processo, as chaves vão sendo sequencialmente abertas. Se a configuração resultante da aplicação de um operador contiver malhas, o processo de busca é continuado, e uma nova chave será aberta. Se ocorrer o surgimento de ilhas, o caminho é cortado e um procedimento de retrocesso é realizado, pois novas aberturas de chaves não irão eliminar estas ilhas.

Nas duas estratégias, para aumentar a eficiência no processo pela redução do espaço de busca, utilizou-se um outro recurso disponível no FCDP, que permite definir a priori dois processos básicos: arranjo ou combinação. Sendo a, b e c operadores/instâncias selecionados no processo, no primeiro caso, arranjo, a aplicação sequencial de (a-b-c) é considerada

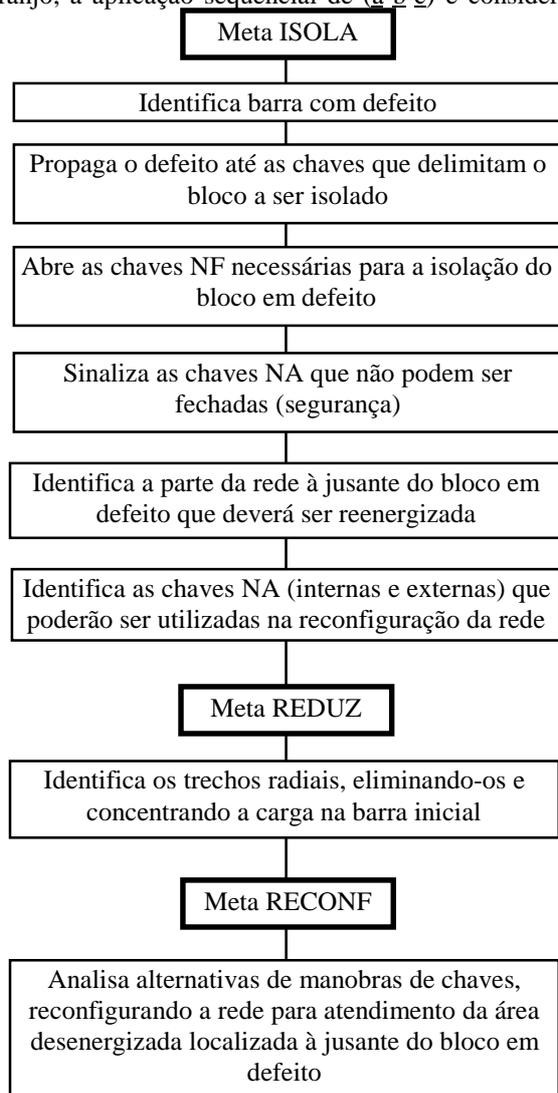


Figura 3.1 - Sequência das metas a serem alcançadas

distinta de (b-a-c), e as duas podem ser analisadas. No segundo caso, combinação, aquelas duas seqüências são consideradas iguais, e então somente uma delas é avaliada, reduzindo assim consideravelmente o espaço de busca. No caso de reconfiguração de um sistema de distribuição a segunda alternativa foi escolhida, pois aplicar o operador “fechar” à instância “chave CH1” e em seguida o mesmo operador à instância “chave CH2” levará sempre ao mesmo estado obtido quando se aplica o operador inicialmente à chave CH2 e em seguida à chave CH1.

3.3 Modelagem do Problema

Para a resolução do problema, foram consideradas três metas, a serem satisfeitas sequencialmente, quando da ocorrência de um defeito numa barra qualquer da rede.

A primeira, descrita como ISOLA(SIST1), diz respeito à identificação de todas as barras e trechos de rede que serão isolados do restante do sistema (designado genericamente por SIST1), à abertura das chaves normalmente fechadas (NF) necessárias para isolar o bloco defeituoso e à sinalização de chaves de socorro interno ou externo que se ligam ao bloco e que não podem ser fechadas enquanto o defeito não for sanado. Além disso, deverão ser identificadas todas as barras e trechos de rede localizados à jusante da área isolada, e todas as chaves que podem ser manobradas para reenergizá-los.

A segunda meta, que deve ser “disparada” ao término da primeira, descrita como REDUZ(SIST1), diz respeito à identificação e eliminação de barras e ligações que pertencem a conjuntos radiais, acumulando-se as respectivas cargas na primeira barra à montante. Um conjunto radial é definido por um grupo de barras e ligações que só dispõe de um único caminho de suprimento. Esta meta possibilita a obtenção de uma rede reduzida equivalente para o sistema a ser reconfigurado, com grande redução no número de barras e ligações. Em consequência deste procedimento preliminar, os cálculos de queda de tensão que serão efetuados ficarão restritos ao tronco dos alimentadores. Poderia ser implementada facilmente uma função que, durante o processo de redução da rede, calculasse o valor a ser adicionado à queda de tensão de cada barra para se levar em conta os conjuntos radiais. A figura 3.2 ilustra o procedimento de redução da rede.

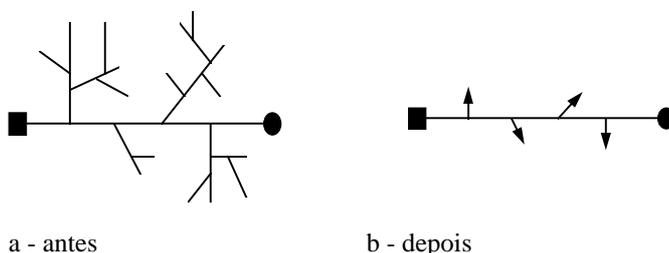


Figura 3.2 - Redução da rede

A terceira e última meta, descrita como RECONF(SIST1), diz respeito à reconfiguração do restante do sistema através da manobra de chaves NF, NA internas e chaves NA de interconexão entre alimentadores. Esta é a meta principal do problema, pois em sistemas reais o número de chaves que podem ser manobradas é muito grande, e conseqüentemente a obtenção de soluções otimizadas requer a utilização de técnicas de busca e estratégias de reconfiguração eficientes.

O problema foi modelado na shell utilizando-se os elementos apresentados na tabela 3.1. Na figura 3.1 apresenta-se um

macro-diagrama com as três metas do procedimento de solução.

Os elementos do problema, quando se utiliza a estratégia construtiva são aqui resumidamente descritos:

- *Frame BARRA* - esta frame define os objetos referentes às barras da rede: identificação, tipo (de carga ou de suprimento), dados da carga, estado (DESL para barra não energizada, ENER para barra energizada, DEF para barra localizada no bloco em defeito - o estado inicial de todas as barras é ENER), coordenadas (ordenada e abcissa), tensão (valor inicializado com zero e dinamicamente atualizado pelo sistema);
- *Frame LIGAC* - define os objetos referentes às ligações da rede: identificação das barras terminais, estado (USADA para elemento conectado, ABERTA para elemento não conectado, DEF para trecho de rede localizado no bloco em defeito, BAND para chave que esteja aberta e que não pode ser fechada), fluxo na ligação (valor inicializado com zero e dinamicamente atualizado pelo sistema), capacidade (corrente máxima admissível), impedância (resistência e reatância série), comprimento, elemento (TRECHO ou CHAVE), tipo de chave (NA para chave normalmente aberta e NF para normalmente fechada). O estado inicial das ligações é assim definido: se o elemento for TRECHO ou CHAVE tipo NF o seu estado é USADA, e se o elemento for CHAVE tipo NA o seu estado é ABERTA;
- *Frame GERAL* - esta frame é utilizada para a definição dos dados gerais do problema, como graus de importância dos atributos de otimização, custo das perdas, faixas de tensão e de carregamento e respectivas notas, etc;
- *Frame SIST* - esta frame é utilizada para o armazenamento dos resultados gerais do problema, como custo total de uma solução, índice de mérito da solução, máxima queda de tensão e máximo carregamento verificados, carregamento das subestações, valores de corte para relaxamento de critérios, etc;
- *Operador ISOLA_TRECHO* - este operador, somente aplicável à meta ISOLA(SIST1), identifica os objetos da frame *LIGAC* que sejam trechos de rede (elemento=TRECHO) com uma de suas barras terminais na situação de defeito (estado=DEF na frame *BARRA*). Quando este operador é aplicado, atribui-se novos valores aos estados da ligação (estado=DEF) e da outra barra terminal do trecho

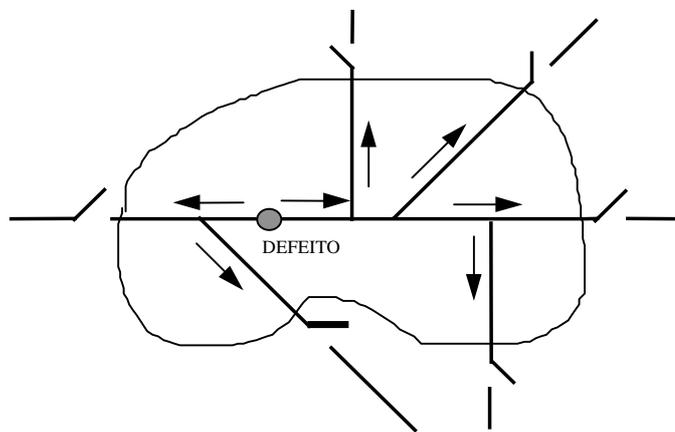


Figura 3.3 - Propagação do defeito

Tabela 3.1 - Elementos do Problema

Elemento	Itens no Problema de Reconfiguração
Metas	ISOLA REDUZ RECONF
Frames	BARRA (dados e variáveis de barras) LIGAC (dados e variáveis de ligações) GERA (dados gerais) SIST (resultados globais)
Operadores	ISOLA_TRECHO (meta ISOLA) ISOLA_CHAVE (meta ISOLA) ABRE_NF (meta ISOLA) BLOCO_DES (meta ISOLA) FINALIZA_DEF (meta ISOLA) REDUZ_REDE (meta REDUZ) FECHA_CHAVE (meta RECONF, construtivo) ABRE_CHAVE (meta RECONF, destrutivo) FINALIZA_RECONF (meta RECONF)
Restrições	Máxima queda de tensão Máximo carregamento de cabos Máximo carregamento de subestações Limites de índice de mérito

(estado=DEF na frame *BARRA*). Desta forma, este operador executa a propagação do defeito, a partir da barra em que se verificou a falha, para todos os trechos e barras que deverão ficar isolados do restante do sistema. A figura 3.3 ilustra a propagação do defeito;

- *Operador ISOLA_CHAVE* - também aplicável à meta ISOLA(SIST1), identifica os objetos da frame *LIGAC* que sejam chave (elemento=CHAVE), cuja condição operativa atual seja aberta (estado=ABERTA), e que uma de suas barras terminais esteja em situação de defeito (estado=DEF na frame *BARRA*). Para cada chave encontrada, altera-se o estado da ligação para BAND (bandeira de aviso identificando que a chave deverá permanecer aberta até que o defeito seja sanado);
- *Operador ABRE_NF* - aplicável à meta ISOLA(SIST1), identifica os objetos da frame *LIGAC* que sejam chave (elemento=CHAVE), cuja condição operativa atual seja fechada (estado=USADA), e que uma de suas barras terminais esteja em situação de defeito (estado=DEF na frame *BARRA*). Para cada chave encontrada, altera-se o estado da ligação para BAND. Se a barra inicial da ligação pertencer ao bloco em defeito (estado=DEF na frame *BARRA*), altera-se o estado da barra final, desenergizando-a (estado=DESL na frame *BARRA*);
- *Operador BLOCO_DES* - aplicável à meta ISOLA(SIST1), identifica os objetos da frame *LIGAC* que sejam trecho (elemento=TRECHO) ou chave NF (elemento=CHAVE e tipo=NF), e que uma de suas barras terminais esteja com estado DESL (na frame *BARRA*) e a outra com estado ENER, atribuindo a esta última barra o estado DESL. No caso do elemento ser uma chave, altera adicionalmente seu estado (para estado=ABERTA). Analogamente ao operador *ISOLA_TRECHO*, este operador executa a propagação das barras que estão à jusante do bloco em defeito e que ficarão desenergizadas até que ocorra a reconfiguração da rede;
- *Operador FINALIZA_DEF* - operador aplicável quando nenhum outro operador puder ser aplicado à meta ISOLA. Chama uma função que apresenta o diagrama unifilar da rede com a situação atual, ou seja, o bloco em defeito isolado, a parte da rede à jusante do bloco em defeito desenergizada, e o restante do sistema em condição de operação normal. A aplicação deste operador define também a nova meta a ser alcançada (nova_meta: REDUZ(SIST1));

- *Operador REDUZ_REDE* - este operador, somente aplicável à meta REDUZ(SIST1), chama uma função procedural que identifica todos os conjuntos radiais da rede, eliminando todos os trechos e barras pertencentes aos mesmos, concentrando a carga nas barras de onde estes conjuntos se derivam. A aplicação deste operador define também a nova meta a ser alcançada (nova_meta: RECONF(SIST1));

- *Operador FECHA_CHAVE* - Este operador é aplicável somente à meta RECONF(SIST1), e identifica os objetos da frame LIGAC que sejam chaves e que estejam abertas (elemento=CHAVE e estado=ABERTA), e para as quais uma das barras extremas esteja energizada (estado=ENER na frame BARRA) e a outra desenergizada (estado=DESL na frame BARRA). Quando aplicado, atribui um novo valor ao estado da ligação selecionada (estado=USADA) e para a barra ainda não energizada (mudando de estado=DESL para estado=ENER). Uma nova sub-meta também é gerada, qual seja, reconfigurar o restante do sistema. Além disso, este operador faz uma chamada a uma função que atualiza a configuração do sistema, propagando o estado ENER para todas as barras que se ligam, através de trechos de rede, à barra energizada pelo operador. Em seguida, processa cálculo de fluxo de potência para o sistema radial conexo. Esta função, além de efetuar cálculos de queda de tensão e de carregamento em trechos de rede e em subestações, calcula o índice de mérito da solução parcial (número de chaves manobradas, distribuição da carga por faixas de tensão e de carregamento). Todos os cálculos são efetuados utilizando a aritmética difusa (Kagan, N. et alii 1995);

- *Operador FINALIZA_RECONF* - operador aplicável quando todas as cargas do sistema, exceto aquelas das barras do bloco em contingência, foram atendidas. Isto é verificado por uma função procedural específica. Chama ainda uma função que apresenta o diagrama unifilar da rede com a situação final, ou seja, com a nova configuração do sistema;

- *Restrição MAX_CARREG* - esta restrição compara, para uma dada configuração, o máximo carregamento verificado em qualquer elemento da rede, com o máximo valor admissível (por exemplo, carregamento de um trecho não maior que o admitido pelo cabo). Deve-se ressaltar que neste caso, assim como nas demais restrições, os dois lados da inequação ($a < b$) são números difusos, e portanto a comparação entre os dois valores é realizada de forma difusa (Kaufmann, A. & M.M. Gupta, 1988, Dubois, D. & H. Prade, 1980). Isto possibilita que seja efetuada uma relaxação controlada dos critérios, resultando em maior flexibilidade no processo de busca de solução e de tomada de decisão;

- *Restrição MAX_DELTA_V* - idem operador MAX_CARREG, para a máxima queda de tensão;

- *Restrição MIN_INDICE* - idem operador MAX_CARREG, para a variação do índice de mérito entre duas soluções obtidas, garantindo que somente soluções melhores sejam obtidas.

Para a verificação destas restrições, utiliza-se um parâmetro (α_{corte}) que permite controlar o seu relaxamento, conforme ilustrado na figura 3.4.

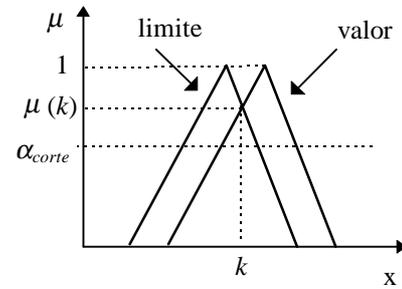


Figura 3.4 - Verificação de restrições (valor ≤ limite)

Para alcançar o objetivo RECONF(SIST1), foram utilizados os seguintes atributos de otimização:

- *manobras de chaves*: para atender ao critério proposto, ou seja, reconfigurar o sistema utilizando somente chaves já existentes (chaves NF, chaves NA internas e chaves NA de socorro externo) e prioritariamente utilizando as chaves NA internas ao invés das de socorro externo, atribuiu-se custos (através de números difusos) distintos em função do tipo da chave. Assim, a utilização de uma chave de socorro externo tem um custo *muito alto*, enquanto que uma chave de socorro interno tem um custo *médio*, e finalmente a abertura de uma chave NF tem um custo *muito baixo*, conforme apresentado na figura 3.5;

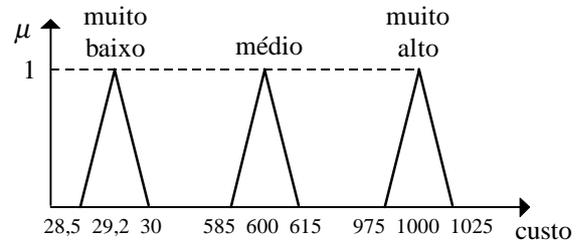


Figura 3.5 - Custos atribuídos às chaves

- *índice técnico de qualidade*: este índice é calculado pela média ponderada entre duas notas e seus respectivos pesos. Uma destas notas é obtida pela distribuição da carga em função de 3 faixas de tensão (baixa, aceitável, boa), e a outra pela distribuição dos carregamentos também em 3 faixas (alta, média, baixa). Formalmente, o valor de IT é calculado pela expressão:

$$IT = \frac{p_v N_v + p_c N_c}{p_v + p_c}$$

na qual:

- N_v, N_c - notas de tensão e de carregamento, respectivamente (valores entre 0 e 10);

- p_v, p_c - pesos atribuídos para tensão e carregamento, respectivamente.

As notas de tensão e de carregamento, por sua vez, são assim calculadas:

$$N_v = \frac{N_{v1} \cdot S_{v1} + N_{v2} \cdot S_{v2} + N_{v3} \cdot S_{v3}}{S_T}$$

$$N_c = \frac{N_{c1} \cdot S_{c1} + N_{c2} \cdot S_{c2} + N_{c3} \cdot S_{c3}}{S_T}$$

sendo:

- N_{v1}, N_{v2}, N_{v3} - notas atribuídas para as faixas 1, 2 e 3 de tensão (valores entre 0 e 10);

- N_{s1}, N_{s2}, N_{s3} - notas atribuídas para as faixas 1, 2 e 3 de carregamento (valores entre 0 e 10);

- $S_T = S_{v1} + S_{v2} + S_{v3}$ - carga total da rede;
- S_{v1}, S_{v2}, S_{v3} - cargas atendidas com tensões nas faixas 1, 2 e 3, respectivamente;
- S_{c1}, S_{c2}, S_{c3} - cargas atendidas com carregamentos nas faixas 1, 2 e 3, respectivamente.

O índice de mérito (\tilde{I}_M) de uma alternativa é calculado pelo método da média ponderada específico para os números difusos triangulares (Baas, S.M. & H. Kwakernaak, 1977). Formalmente:

$$I_{OC} = \frac{P_C C + P_E ENS + P_{TI} TI}{P_C + P_E + P_{TI}}$$

em que:

- \tilde{C}, \tilde{IT} - atributos de otimização, respectivamente, custo das chaves utilizadas e índice técnico de qualidade;
- $\tilde{P}_C, \tilde{P}_{TI}$ - graus de importância dos atributos, representados por números difusos.

O índice de mérito resultante é um número difuso, e através da restrição MIN_INDICE são descartadas soluções parciais ou finais que sejam piores que a última solução viável encontrada, isto é, sendo \tilde{I}_{M1} o índice de mérito da melhor solução até então encontrada, uma nova solução só é aceita quando o seu índice de mérito \tilde{I}_{M2} é tal que $\tilde{I}_{M2} > \tilde{I}_{M1}$.

A otimização deste índice de mérito, que agrega e pondera os objetivos analisados de acordo com seus graus de importância, possibilita a obtenção de soluções não dominadas. Os graus de importância dos atributos de otimização são modelados pelos números difusos apresentados na figura 3.6, assim declarados na shell como valores *fuzzy-string*:

- mp : muito pouco importante = (0.0,0.1,0.2)
- p : pouco importante = (0.1,0.3,0.5)
- m : importância média = (0.2,0.5,0.8)
- i : importante = (0.5,0.7,0.9)
- mi : muito importante = (0.8,0.9,1.0)

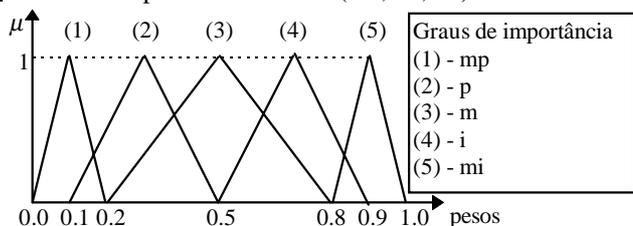


Figura 3.6 - Graus de importância

Nas figuras 3.7 e 3.8 apresenta-se, a título ilustrativo, como as *frames* e os operadores são representados na sintaxe do FCDP.

4 ANÁLISE DE UM CASO

Um exemplo de estudo de reconfiguração de um sistema de distribuição de energia elétrica considerando-se múltiplos objetivos e incertezas é apresentado neste item. Na figura 4.1 apresenta-se o diagrama unifilar do sistema a ser estudado, em sua configuração inicial, composto por 3 subestações e 8 alimentadores. Na tabela 4.1 apresentam-se as principais características deste sistema, que contém 114 barras e 130 ligações, sendo 95 trechos de rede e 16 chaves normalmente fechadas. Além destas, existem ainda mais 19 chaves normalmente abertas que podem ser utilizadas para a reconfiguração da rede, sendo 6 NA internas e 13 NA de socorro entre alimentadores. Para considerar as incertezas nos dados das cargas, seus valores foram modelados por números difusos triangulares, e portanto os valores de demanda

apresentados na Tabela 4.1 são os valores mais possíveis destas grandezas.

As incertezas nos dados da carga poderiam ser tratadas, alternativamente, através de enfoque probabilístico. Para isto, entretanto, seria necessário dispor-se de maior quantidade de dados, como série histórica de valores de demanda, medidos por centro de carga ou por transformador, considerando-se ainda os períodos do ano, os dias da semana e os horários ao longo do dia. A partir de tratamento estatístico destas informações, diferentes cenários, com probabilidades de ocorrência associadas, poderiam ser considerados, e diferentes soluções poderiam ser obtidas e apresentadas ao operador do sistema para a tomada de decisão. Por outro lado, a informação normalmente disponível acerca da carga é tão somente o seu valor, verificado num determinado período (p.ex. na ponta de carga do sistema), com certa idéia das possíveis variações em torno deste valor. Por estas razões, os autores julgaram ser mais conveniente utilizar um tratamento difuso para a modelagem das incertezas nos dados da carga.

```
(frame_templates,
(BARRA, tipo: s, ger: r, potat: f, potre: f, estado: s, coorx: i, coory: i,
dvbar: r),
(LIGAC, inibar: s, fimbar: s, estado: s, fluxo%: f, capacidade: r, zr: r,
zx: r, comp:r, elem: s, tipo: s),
(SIST, novosub: p, maxfluxo: f, maxdv: f, custo: f, merito: f, indice: f,
fsemax: f, fsetot: f, estado: s, alfa_ind: r, alfa_dv: r, alfa_car: r, alfa_se:
r, malha_ilh: r),
(INDICE, custo: f, merito: f, indice: f),
(GERAL, pcost: fs, pmer: fs, flcar: r, f2car: r, fltens: r, f2tens: r, n1car:
r, n2car: r, n3car: r, pcar: r, n1tens: r, n2tens: r, n3tens: r, ptens: r)
)
(frame_instancias,
(BARRA,
(BAR01,subes,0.3,000,000,000,000,000,CON,100,900,0)
(BAR02,carga,0.0,012,011,013,006,005,006,CON,700,900,0)
(BAR03,carga,0.0,020,019,021,015,014,016,CON,800,600,0)
.....
.....
)
(LIGAC,
(LIG01,BAR01,BAR02,USADA,0,0,0,12,1,2,2.3,TRECHO, )
(LIG02,BAR01,BAR03,USADA,0,0,0,12,1,2,1.5,TRECHO, )
(LIG03,BAR02,BAR04,USADA,0,0,0,12,1,2,1.5,TRECHO, )
.....
.....
(LIG53,BAR47,BAR46,USADA,0,0,0,08,1,2,0.1,CHAVE,NF)
.....
(LIG82,BAR28,BAR53,ABERTA,0,0,0,12,1,2,0.5,CHAVE,NA)
.....
.....
)
.....
.....
(GERAL,
(GERA1,mi,m,70,90,0.9,0.95,10,7,1,1,1,7,10,1.)
)
)
```

Figura 3.7 - As *frames* do problema de reconfiguração

Na figura 4.2 apresenta-se o ponto onde foi simulado um defeito e o sistema após a finalização da meta ISOLA. Na figura 4.3 apresenta-se o sistema após a finalização da meta REDUZ. Para melhor visualização, nesta e nas figuras subsequentes foram omitidas as barras e trechos localizados na área isolada sob defeito.

Para a reconfiguração da rede, considerou-se o objetivo de minimização do custo das chaves como *muito importante*,

enquanto o objetivo de maximização do índice técnico de qualidade foi considerado de *média importância*.

Para levar em conta as incertezas nos valores de demanda, todas as cargas foram representadas por números difusos triangulares, com os valores $\tilde{D}_i = (D_{inf}, D_{med}, D_{sup})$, em que D_{med} é o valor mais possível da demanda da barra i . As restrições de máxima queda de tensão e de carregamento máximo também foram modeladas por números difusos triangulares, com valores (7.5,7.5,7.87)% e (100,100,105)%, respectivamente.

```
(FECHA_CHAVE,
(variaveis,
(?usa:s,?abre:s,?chav:s,?desl:s,?inibar:s,?fimbar:s,linha:
LIGAC,?sis:SIST,?sub:SIST)
)
(meta_aplicavel,(Reconf,?sis))
(dado_que,
(let,?usa,USADA),
(let,?abre,ABERTA),
(let,?chav,CHAVE),
(let,?desl,DESL),
(xmatch,?linha(.elem,?chav.estado,?abre,;inibar:BARRA.
estado,?ener,;fimbar:BARRA.estado,?desl)),
(let,?inibar,?linha.inibar),
(let,?fimbar,?linha.fimbar),
)
(contingencias,(def,?linha))
(novas_instancias,?sub))
(novas_atribuicoes,
(atribua,?sis.novosub,?sub),
(atribua,?linha.estado,?usa),
(atribua,?fimbar:BARRA.estado,?ener),
(fluxo_fuzzy,?sis),
(atribua,?sub.custo,?sis.custo),
(atribua,?sub.maxfluxo,?sis.maxfluxo),
(atribua,?sub.maxdv,?sis.maxdv),
.....
.....
)
(novas metas,
(Reconf,?sub)
)
)
```

Figura 3.8 - Estrutura de um operador

Embora no item 3 tenham sido descritos os operadores para a estratégia construtiva, o problema foi resolvido utilizando as técnicas construtiva e destrutiva. Embora apresentem soluções iniciais distintas, ambos convergem para a mesma solução final.

Inicialmente, fixou-se os parâmetros de relaxamento das restrições do problema iguais à unidade, ou seja:

$$\alpha_{\Delta V} = \alpha_{\text{carregamento}} = 1$$

Em outras palavras, isto significa que os valores mais possíveis de queda de tensão e de carregamento verificados em uma solução do problema não podem ser superiores aos valores centrais das restrições, ou seja, a máxima queda de tensão deve ser inferior à 7,5% e o máximo carregamento inferior à 100%.

Na figura 4.4 apresenta-se a melhor solução encontrada para o problema com estas restrições, onde se pode observar que foram manobradas três chaves, sendo duas NA internas e uma NA de socorro. Esta solução foi alcançada rapidamente

pelo FCDP, com poucas soluções intermediárias. Os resultados alcançados foram:

- Custo = (2145,2200,2255) unidades
- Índice de qualidade = 9,08
- Máximo ΔV = (6.67,6.67,8.41) %
- Máximo carregamento = (82,82,103) %

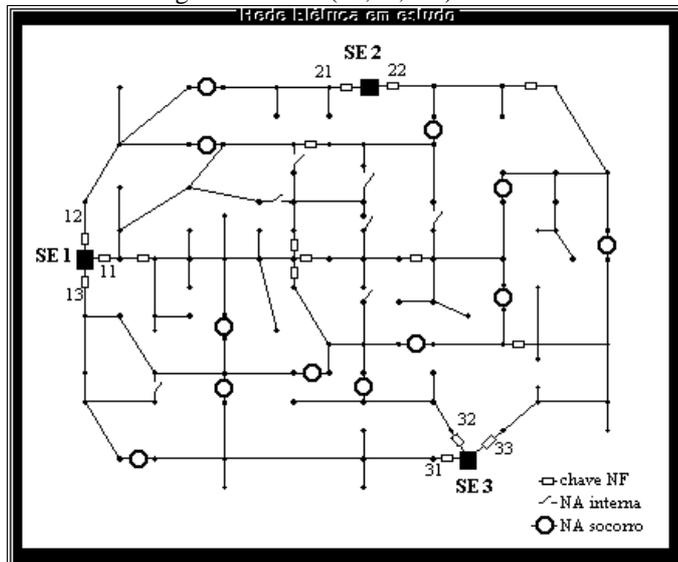


Figura 4.1 - Configuração inicial

Tabela 4.1 - Características do sistema na configuração inicial

SE	Capacidade (MVA)		Carreg. SE (MVA)	Circuito	Carreg. circuito (MVA)
	SE	Circ.			
SE1	20,0	8,0	12,8	11	6,2
		8,0		12	2,0
		8,0		13	4,6
SE2	15,0	8,0	10,4	21	5,3
		8,0		22	5,1
SE3	20,0	8,0	16,0	31	6,1
		8,0		32	5,8
		8,0		33	4,1

Em seguida, alterou-se os parâmetros de relaxamento das restrições do problema para os valores:

$$\alpha_{\Delta V} = \alpha_{\text{carregamento}} = 0,7$$

Neste caso, a melhor solução encontrada está apresentada na figura 4.5. Como no caso anterior, foram manobradas três chaves, porém agora todas as chaves são NA internas. Esta solução somente foi possível pelo relaxamento dos critérios, particularmente na máxima queda de tensão, como pode ser observado na figura 4.6. Os resultados alcançados foram:

- Custo = (1755,1800,1845) unidades
- Índice de qualidade = 8,61
- Máximo ΔV = (7.60,7.60,9.74) %
- Máximo carregamento = (91,91,116) %

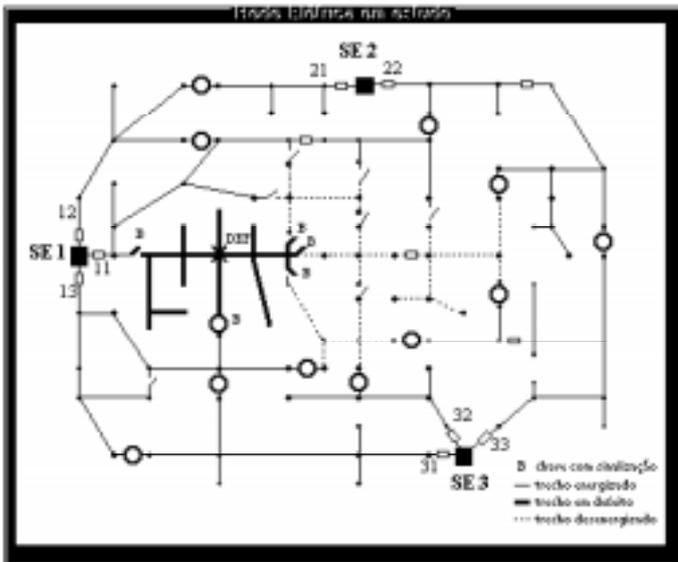


Figura 4.2 - Bloco sob defeito

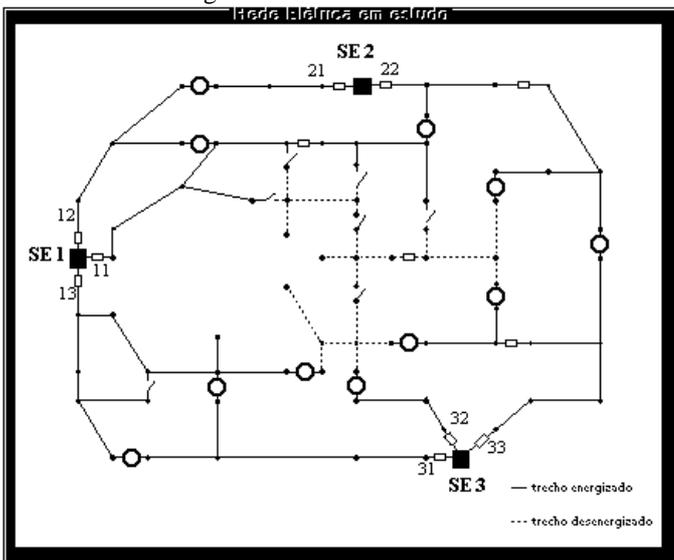


Figura 4.3 - Rede reduzida

Quanto ao índice técnico de qualidade (IT), a solução encontrada neste caso foi pior que a anterior (8,61 contra 9,08). Isto se explica pelo fato de que os objetivos considerados (custo de chaves e IT) são conflitantes, e portanto o que definiu a escolha foi o grau de importância dado a cada um deles.

As duas estratégias de reconfiguração utilizadas, construtiva e destrutiva, mostraram-se bastante adequadas ao problema analisado. O tempo de processamento para a obtenção de cada solução é variável, mas sempre com valores muito pequenos, da ordem de segundos a dezenas de segundos. O número de soluções intermediárias, até se alcançar a melhor solução também se mostrou bastante reduzido. Dependendo do caso e da estratégia, este número variou entre um e quatro, resultando assim um tempo total bastante reduzido para a obtenção da solução "ótima".

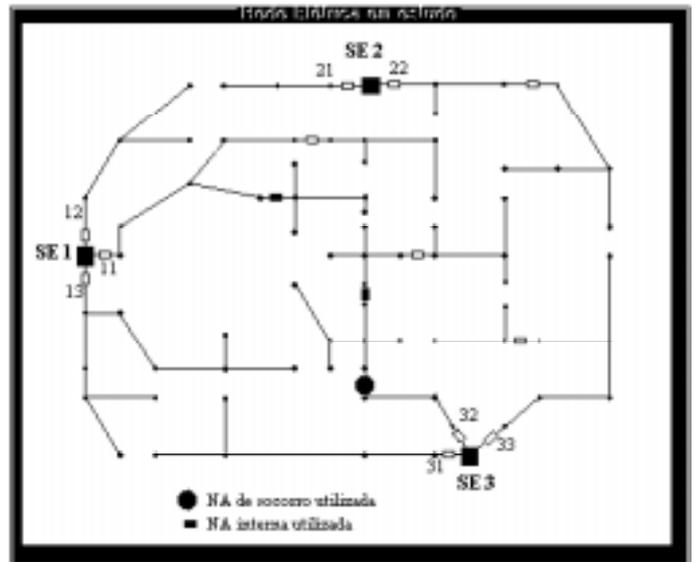


Figura 4.4 - Melhor solução para $\alpha_{\Delta v} = \alpha_{\text{carregamento}} = 1$

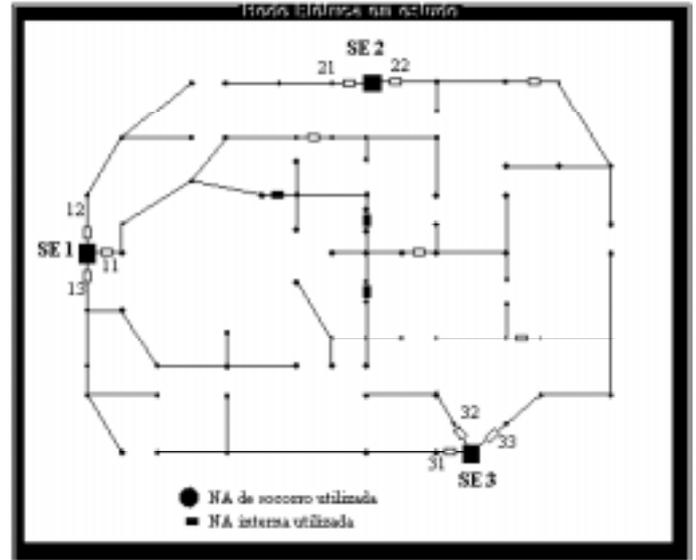


Figura 4.5 - Melhor solução para $\alpha_{\Delta v} = \alpha_{\text{carregamento}} = 0,7$

Vários outros casos foram processados pelos autores e, em todos eles, foram encontradas soluções com tempos de processamento bastante reduzidos (de segundos a dezenas de segundos). A própria natureza do problema auxilia a obtenção de bons resultados, pois na prática das empresas de distribuição de energia elétrica, por restrições operacionais, buscam-se soluções que causem a menor perturbação no sistema como um todo, ou seja, que envolvam um número reduzido de alimentadores e de chaves.

5 CONCLUSÕES

Neste artigo foi apresentada a utilização de uma ferramenta para modelagem de problemas de decisão com restrições para o estudo de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica na ocorrência de uma contingência. O sistema descrito possibilita a obtenção de uma solução otimizada rapidamente, considerando vários objetivos simultaneamente. Esta característica é importante quando se utiliza o sistema em tempo real, em situações de emergência. Caso necessário, ou para determinar um plano de manobras através de estudo *off line*, pode-se continuar o processo de busca, que é acelerado por um índice que agrega e pondera os múltiplos objetivos, direcionando o processo para a melhor solução de compromisso. O usuário pode facilmente alterar a modelagem do problema. Por exemplo, introduzindo-se uma expressão

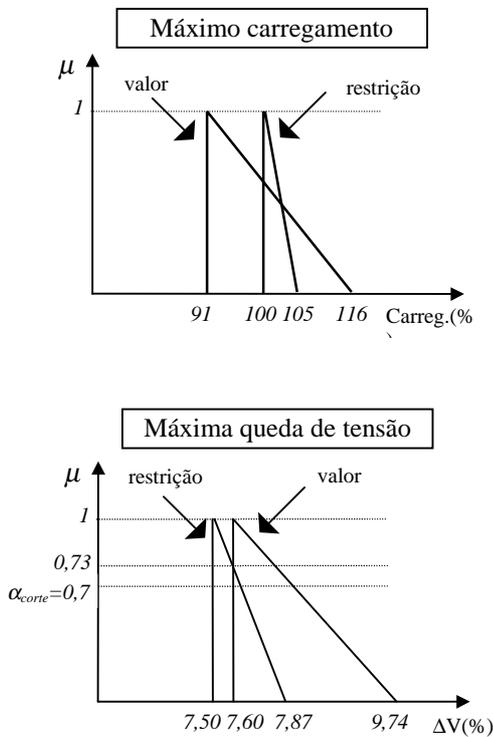


Figura 4.6 - Restrições para $\alpha_{\Delta V} = \alpha_{\text{carregamento}} = 0,7$

para o cálculo de perdas, estende-se o modelo para a análise da reconfiguração considerando-se a minimização das perdas. A utilização da teoria dos conjuntos difusos, por sua vez, torna a ferramenta bastante flexível, através do relaxamento controlado de critérios, da consideração de incertezas nos dados e da introdução de preferências subjetivas do planejador. As estratégias de reconfiguração utilizadas, construtiva e destrutiva, mostraram-se bastante adequadas e eficientes para o caso analisado. Outros problemas da área de distribuição de energia elétrica, que podem ser caracterizados como problemas de configuração topológica ou de localização e dimensionamento de equipamentos, podem ser modelados na shell desenvolvida. Podem ser citados, por exemplo, o planejamento da expansão da rede para atender ao crescimento do mercado consumidor, a reconfiguração de um conjunto de alimentadores para se obter a condição de mínimas perdas elétricas na rede, a determinação da localização e capacidade de bancos de capacitores para o ajuste de níveis de tensão, etc. Os autores estão investigando outras estratégias, como "branch exchange" que, juntamente com uma técnica de busca do tipo "best first search", será apresentada num próximo artigo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Baas, S.M., H. Kwakernaak, 1977 Rating and ranking of multiple-aspect alternatives using fuzzy sets. *Automatica*, v. 13, p. 47-58.

Cherkaoui, R., A. Bart, A.J. Germond, 1993, Optimal configuration of electrical distribution networks using heuristic methods. In: *POWER SYSTEMS COMPUTATION CONFERENCE, 11^o*, Avignon, 1993. *Proceedings*. Zurich, PSCC, p. 147-154

Civanlar, S., J.J Grainger, H. Yin, S.S.H. Lee, July 1988 Distribution feeder reconfiguration for loss reduction. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 3, nº 3, p. 1217-1223.

Dubois, D., H. Prade, 1980 *Fuzzy sets and systems - Theory and applications*, Academic Press, New York.

Hart, P.E., N.J.Nilsson, B.Raphael, July 1968 A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *IEEE Transactions of Systems Science and Cybernetics*, v. SSC-4, nº 2, p. 100-107.

Hsu, Y.Y., H.C. Kuo, April 1994 A heuristic based fuzzy reasoning approach for distribution system service restoration. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 9, nº 2, p. 948-953.

Kagan, N., 1992 *Electrical power distribution systems planning using multiobjective and fuzzy mathematical programming*. London. 215p. Thesis (Ph.D.). Queen Mary & Westfield College, University of London.

Kagan, N. C.C.B. Oliveira, S.M. Fróes, 1995 Uma ferramenta para tomada de decisão em problemas genéricos de planejamento com múltiplos objetivos e incertezas. In: *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE, 2^o*, Curitiba. Anais.

Kagan, N., C.C.B. Oliveira, 1996a Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica através de ferramenta para solução de problemas de decisão com múltiplos objetivos e incertezas. In: *CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 11^o CBA*, São Paulo. Anais.

Kagan, N., C.C.B. Oliveira, 1996 A fuzzy constrained decision planning tool to model uncertainties in multiobjective configuration problems. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT SYSTEMS APPLICATIONS TO POWER SYSTEMS, ISAP96*, Orlando, EUA. Anais.

Kagan, N., J.Bigham, 1993 Modelamento de problemas de configuração de sistema de distribuição de energia elétrica por técnicas de planejamento de decisão com restrições. In: *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE, 1^o*, Rio Claro, 1993. Anais, UNESP/SBA, p. 413-420.

Kaufmann, A., M.M. Gupta, 1988. *Fuzzy mathematical models in engineering and management science*, North-Holland, Amsterdam

Liu, C.C., S.J.Lee, S.S. Venkata, May 1988, An expert system operational aid for restoration and loss reduction of distribution systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 3, nº 2, p. 619-626.

Merlin, A., H. Back, 1975, Search for a minimal-loss operating spanning tree configuration in an urban power distribution system. In: *POWER SYSTEM COMPUTATION CONFERENCE, 5^o*. *Proceedings*, p. 1-18, Cambridge, UK.

Petrie, C., 1992 Constrained Decision Revision. In: *NATIONAL CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE, 10^o*. *Proceedings*, p. 393-400.

Rich, E., K.Knight, 1991 *Artificial Intelligence*, 2. edition, McGraw-Hill, USA.

Roytelman, I., V.Melnik., S.S.H.Lee., R.L. Lugtu, May 1996. Multi-objective feeder reconfiguration by distribution management system. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 11, nº 2, p. 661-667

- Shirmohammadi, D. , April 1992 Service restoration in distribution networks via network reconfiguration. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 7, nº 2, p. 952-958.
- Taylor, T., D. Lubkeman, Jan. 1990 Implementation of heuristic search strategies for distribution feeder reconfiguration. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 5, nº 1, p. 239-245.
- WU, J.S. *et al.* , April/June 1992, A comparison of two heuristic approaches for distribution feeder switching contingencies. *Electrical Power & Energy Systems*, v. 14, nº 2/3, p. 158-165.