Campus de São Carlos

RESTABELECIMENTO DE ENERGIA EM
SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO
ALGORITMO COM HEURÍSTICAS "FUZZY"

Alexandre Cláudio Botazzo Delbem

Orientador: Prof. Newton G. Bretas

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

RESTABELECIMENTO DE ENERGIA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO ALGORITMO COM HEURÍSTICAS "FUZZY"

Alexandre Cláudio Botazzo Delbem

DEDALUS - Acervo - EESC

31100016706

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Prof. Newton Geraldo Bretas

São Carlos

1998

Class.	TESE-EESC
Cutt.	D847
Tombo	T0100/98

0964750

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC-USP**

D344r Delbem, Alexandre Cláudio Botazzo
Restabelecimento de energia em sistemas de
distribuição utilizando algoritmo com heurísticas
"fuzzy" / Alexandre Cláudio Botazzo Delbem. -- São
Carlos, 1998.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia
de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1998.
Área: Engenharia Elétrica.
Orientador: Prof. Dr. Newton Geraldo Bretas.

1. Sistemas de distribuição. 2. Restabelecimento de energia. 3. Heurísticas "fuzzy".
I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Engenheiro **ALEXANDRE CLAUDIO BOTAZZO DELBEM**

Dissertação defendida e aprovada em 27-03-1998
pela Comissão Julgadora:

Prof. Titular **NEWTON GERALDO BRETAS (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

Prof. Doutor **CARLOS MÁRCIO VIEIRA TAHAN**
(Escola Politécnica - Universidade de São Paulo)

Prof. Doutor **NELSON KAGAN**
(Escola Politécnica - Universidade de São Paulo)

Prof. Doutor **DENIS VINICIUS COURY**
Coordenador da Área de Engenharia Elétrica

JOSÉ CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

AGRADECIMENTOS

A CNPq e FAPESP.

Ao professor André Carlos Ponce de Leon F. de Carvalho por toda colaboração.

Ao grupo do laboratório (LACO) pelas construtivas discussões e incentivos.

A quem me ensinou C++, Ricardo Naoki Mori.

E a quem acreditou neste trabalho e permitiu-me concretizá-lo: Newton G. Bretas.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	iii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	iv
LISTA DE SÍMBOLOS.....	v
RESUMO.....	vi
<i>ABSTRACT</i>	vii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 “Requisitos de re-engenharia”.....	1
1.2 Restabelecimento de energia em sistemas de distribuição.....	2
1.3 Principais tópicos deste trabalho.....	4
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	5
2.1 Determinando um vetor de estados de chaves apropriado.....	5
2.2 Tratamento da característica combinatorial.....	6
2.3 Buscando a solução ótima.....	7
2.4 Outras proposições.....	8
3 BUSCA COM HEURÍSTICAS “FUZZY”.....	9
3.1 Introdução	9
3.2 Representação de sistemas de distribuição para restabelecimento de energia.....	10
3.3 Construindo caminhos.....	10
3.4 Heurísticas “fuzzy”.....	11
3.5 Chaves manobradas.....	15
3.6 As vantagens de heurísticas “fuzzy” para um algoritmo de busca em restabelecimento de energia.....	16
3.7 Algoritmo de restabelecimento de energia.....	18
3.8 Resultados experimentais.....	19
3.9 Algumas considerações.....	22
4 ALGORITMOS GENÉTICOS PARA RESD.....	24
4.1 Porque usar AG em RESD.....	24

4.2 AG em Restabelecimento de Energia (AGRE).....	25
4.3 Exemplo.....	26
4.4 AG para planejamento	27
4.5 Algumas considerações.....	28
5 ALGORITMOS GENÉTICOS PARA SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO GENÉRICOS.....	30
5.1 Teoria de grafos relacionada com a representação de sistemas de distribuição.....	30
5.2 Equivalência entre os grafos desconexos sem cadeias fechadas e a representação dos sistemas de distribuição.....	32
5.3 O poder da representação das cadeias de grafo.....	33
5.4 Dificuldades computacionais de implementação.....	33
5.5 Otimização multiobjetivo.....	35
5.6 Resultados dos testes.....	37
5.7 Algumas considerações.....	39
6 CONCLUSÕES.....	40
APÊNDICE 1.....	42
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	43

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01 - Descrição funcional de um sistema especialista para DA.....	2
FIGURA 02 - Sistema de distribuição simplificado.....	10
FIGURA 03 - Exemplo de um setor.....	10
FIGURA 04 - Árvore de busca após uma falta no setor 11.....	11
FIGURA 05 - Árvore de busca usando caminhos principais.....	11
FIGURA 06 - Conjuntos “fuzzy” para as temperaturas do setores.....	13
FIGURA 07 - Exemplo de Implicação “fuzzy” produzida pelas regras.....	13
FIGURA 08 - Representação gráfica da inferência devida à REGRA 1.....	14
FIGURA 09 - Representação gráfica da inferência devida à REGRA 2.....	14
FIGURA 10 - Representação gráfica da inferência devida à REGRA 3.....	14
FIGURA 11 – Conjunto “fuzzy” da temperatura do setor; _i	15
FIGURA 12 - Busca “forward”	17
FIGURA 13 - Busca “Inter-wave”	17
FIGURA 14 - Um fluxograma simplificado.....	18
FIGURA 15 - Sistema de distribuição simplificado da cidade de São Carlos(CPFL)	20
FIGURA 16 - Configuração antes do plano de restabelecimento de energia ter sido executado.....	22
FIGURA 17 - Configuração depois do plano de restabelecimento de energia ter sido executado.....	22
FIGURA 18 - Árvore de busca no espaço de estado das chaves.....	22
FIGURA 19 - Árvore de busca no espaço de estado dos setores.....	22
FIGURA 20 - Exemplo de grafo.....	30
FIGURA 21 - Representação por cadeias de grafo.....	32

FIGURA 22 - Cadeias de grafo do complexo sistema de distribuição da cidade de São Carlos.....	34
FIGURA 23 - Ilustração de otimização multiobjetivo.....	36
FIGURA 24 - Desbalanço mínimo dos “alimentadores”	38
FIGURA 25 - Desbalanço mínimo dos alimentadores após uma falta.....	38
FIGURA 26 - Desbalanço mínimo dos “alimentadores” com mínimo número de operações de chaves.....	39

LISTA DE TABELAS

TABELA 01 - Restabelecimento de energia para quatro situações.....	19
TABELA 02 - Resultados do restabelecimento de energia para a falta no setor 11....	29
TABELA 03 - Desempenho do algoritmo na busca da configuração ótima.....	29

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AD	- Área Desenergizada
AG	- Algoritmos Genéticos
AGP	- Algoritmo Genético Paralelo
AGRE	- Algoritmos Genéticos para RESD
AGSG	- Algoritmos Genéticos para RESD em Sistemas Genéricos
BLV	- Subestação Bela Vista
CPFL	- Companhia Paulista de Força Luz
DA	- <i>Distribution Automation</i>
DC	- <i>Direct Current</i>
DCLF	- <i>DC Load Flow</i>
EMS	- <i>Energy Management System</i>
GPL	- Garland Power & Light
LTS	- <i>Load Transfer Switch</i>
MRAM	- <i>Megabytes de RAM</i>
PAR	- Subestação Paraíso
POSD	- Planejamento Ótimo da Operação de Sistemas de Distribuição
P-ótimo	- ótimo de Pareto
RAM	- <i>Random Access Memory</i>
RESD	- Restabelecimento de Energia em Sistemas de Distribuição
ROESD	- Restabelecimento Ótimo de Energia em Sistemas de Distribuição
SCA	- Subestação São Carlos
SCADA	- <i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SE	- Subestação
SI	- Setor Isolado
SS	- <i>Sectionalizing Switch</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A	- Gene Ativo
β	- Peso de $l_{\text{máx}}$ em termos de desbalanço
CA	- Carregamento total na saída do alimentador
C_i	- Cromossomo i de uma estrutura
$E(G)$	- Conjunto finito de arcos de um grafo G
f	- Valor da função objetivo
G	- Grafo
$l_{\text{máx}}$	- Número aceitável de manobras no restabelecimento de energia
$N(G)$	- Conjunto finito de nós de um grafo G
n	- dimensão do vetor $\underline{x}$
n_s	- número de setores entre o setor i e a subestação
n_{manobras}	- Número de pares de operações de chaves
s_{CA}	- Desvio padrão dos carregamentos dos “alimentadores”
σ	- Máximo desbalanço provável
t	- Temperatura
tm_i	- Ponto em que μ_i atinge seu valor máximo
$\mu_i(x)$	- Grau de pertinência de x à característica i
v_i	- Nó i de um grafo
$\underline{x}, \underline{y}$	- Vetores
x_i, y_i	- Estados do elemento i de $\underline{x}$ ($\underline{y}$)
z	- Desbalanço entre os “alimentadores”

RESUMO

O objetivo deste trabalho é desenvolver um programa que automatize o restabelecimento de energia para sistemas de distribuição. Um plano de restabelecimento de energia é necessário depois de uma falta ter sido identificada e isolada. Tal plano deve ser formulado em um tempo muito curto. Entretanto, a característica combinatorial do problema restringe as alternativas para automatizar o restabelecimento de energia. Vários métodos têm sido propostos para solucionar esta dificuldade. No entanto, eles não são eficientes em geral para lidar com grandes sistemas de distribuição. Nesse sentido, desenvolveu-se neste trabalho um algoritmo que consegue um plano de restabelecimento de energia em curto intervalo de tempo.

ABSTRACT

The objective of this work is to develop automatic energy restoration for distribution systems. A restoration plan is required after a fault has been identified and isolated. Such plan must be carried out in a very short time period. However, the combinatorial feature of the problem constrains the application of the automatic energy restoration. Several approaches have been developed to overcome that difficulty. Nevertheless, they are not efficient enough in general for large distribution systems. As a result, it was developed, in this work, an approach to reach a energy restoration plan in short time period.

1 INTRODUÇÃO

Propostas de automação do sistema de distribuição têm sido desenvolvidas nas últimas décadas. O restabelecimento de energia automático é um dos importantes componentes desse sistema automatizado. Para melhor mostrar a importância da automação dos sistemas de distribuição, bem como do restabelecimento de energia, transcreve-se, a seguir parte do recente artigo de GHOSHAL (1997), “Distribution Automation: SCADA Integration Is Key”, sobre sua experiência como engenheiro responsável do projeto de um novo SCADA/EMS na Garland Power & Light (GPL). Esse artigo traduz, em parte, o intuito deste trabalho.

1.1 “Requisitos de re-engenharia”

“O primeiro objetivo do projeto de um sistema de automação da distribuição (DA) é implementar sistemas eficientes de: controle supervisor e aquisição de dados (SCADA), operação de sistema de gerência da energia (EMS), incluindo o restabelecimento mais rápido da energia aos consumidores (veja a FIGURA 01).

Na rede de distribuição da GPL, certas localizações com cargas críticas (por exemplo, hospitais e locais de defesa) têm sido equipadas com chaves automáticas. Estas chaves são em geral não monitoradas. Em uma ocasião especial, uma das chaves de uma localidade onde havia um hospital falhou quando era operada, resultando em uma situação desastrosa. Tais acidentes, embora isolados, evidenciam a necessidade de sistemas que automaticamente monitorariam parâmetros do circuito elétrico e, se necessário, inteligentemente controlariam aparelhos de campo para isolar faltas e restabelecer a energia.

Uma outra área de importância envolve as perdas de potência reativa no sistema. Na tentativa de manter um fator de potência alto no sistema de distribuição, bancos de capacitores têm sido usados em locais estratégicos. Estes capacitores ficam expostos a condições climáticas variadas e em temperaturas com pouca ou nenhuma intervenção de controle dos operadores. Assim, foi sentida a necessidade de fornecer um monitoramento remoto no controle dos bancos de capacitores, incluindo a capacidade de selecionar os modos

automático e manual de operações de chaves.” (GHOSHAL, 1997, p.31)

FIGURA 01: “Descrição funcional de um sistema especialista para DA”. Veja LIU et al. (1988).

1.2 Restabelecimento de energia em sistemas de distribuição

O restabelecimento de energia em sistemas de distribuição tem despertado um grande interesse nos últimos anos, principalmente devido ao grande aumento da velocidade de processamento dos computadores. Um plano de restabelecimento de energia elaborado e rápido é necessário para tratar faltas permanentes (que só podem ser extinguidas após reparos no setor danificado) em sistemas de distribuição. Ou seja, depois do local de uma falta ter sido identificado 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 rotineiros 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 uma série de necessidades práticas e objetivas tais como: um número reduzido de operações de chaves, 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 operação de chaves deve ser mínimo. A principal razão para tal é que a operação freqüente das chaves reduz a expectativa de vida das mesmas. 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. Evidentemente os sistemas malhados devem ser evitados, pois complicam tanto a operação do sistema de distribuição quanto o seu sistema de proteção.

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 distantes um do outro (de forma a não alterar demais 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, quedas de tensão, etc. (entendido aqui como Planejamento Ótimo da Operação em Sistemas de Distribuição (POSD) (AOKI et al. (1987), KAGAN & ADAMS (1994), TER-GAZARIAN & KAGAN (1992) e outros); e a transição de estado involuntária, causada por faltas ou manobras para manutenção da rede (que caracteriza o problema de Restabelecimento de Energia em Sistemas de Distribuição (RESO), no qual se quer restabelecer a energia respeitando as restrições de carga dos alimentadores e dos demais equipamentos do sistema). Claramente, os objetivos desses dois tipos de transição podem ser desejáveis em um único plano de restabelecimento de energia, isto é, Restabelecimento Ótimo de Energia em Sistemas de Distribuição (ROESD).

Adicionalmente, 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 de seções normalmente abertas (prontas para conectar um alimentador a alimentadores vizinhos) (DEVI et al. (1995)), ou estruturas nas quais cada ramal do alimentador sempre tem um alimentador vizinho de suporte (HSU et al. (1992), HSU & KUO (1994) e HSU & HUANG (1995)).

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.

1.3 Principais tópicos deste trabalho

Este trabalho busca resolver as questões levantadas anteriormente que limitam o desempenho dos procedimentos já existentes em sistemas grandes e complexos como os encontrados em países em desenvolvimento. No capítulo 2 é apresentada uma revisão dos principais algoritmos já desenvolvidos para o restabelecimento de energia automatizado em sistemas de distribuição. É proposto no capítulo 3 um novo algoritmo para restabelecimento de energia utilizando uma busca com heurística “fuzzy”. Indo além da proposta de trabalho do mestrado, os capítulos 4 e 5 trazem estudos iniciais de como os Algoritmos Genéticos (AG) poderiam vir a contribuir em restabelecimento de energia em sistemas de distribuição.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo descreve o estado da arte sobre RESD. Objetivando uma revisão crítica, os trabalhos existentes na área foram apresentados em uma sequência que mostra a evolução dos procedimentos propostos. Também são citados alguns dos diversos métodos sobre POSD que tenham relação com o RESD.

2.1 Determinando um vetor de estados de chaves apropriado

A configuração dos sistemas de distribuição tem sido representada pelo conjunto dos estados das chaves. Assim, a configuração pode ser descrita pelo vetor:

$$\underline{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \quad (1)$$

onde x_i indica se a chave i está aberta ($x_i = 0$) ou fechada ($x_i = 1$) e n é o número de chaves.

Os trabalhos de HSU et al. (1994) e MORELATO & MONTICELLI (1989) tratam diretamente com este vetor gerando configurações alternativas para restabelecer a energia. Obviamente, se n for um número grande existirá um número muito grande de possíveis vetores $\underline{x}$ (configurações) para serem analisados: 2^n . No entanto, HSU et al. (1994) podem reduzir o número de configurações a serem analisadas considerando apenas as k chaves próximas à vizinhança da área desenergizada como manobráveis para o restabelecimento de energia (ou seja, 2^k configurações). Tal hipótese é aceita segundo duas justificativas básicas: i) os sistemas de distribuição usados para teste (“típicos sistemas de distribuição da Taiwan Power Company”) sempre possuem um alimentador de suporte, e somente um, para cada ramal (lateral) de alimentador. Isto permite a garantia de sempre haver, na vizinhança de um ramal, um alimentador alternativo para suprir sua energia; ii) é de interesse não operar chaves que não estejam próximas, para evitar transtornos no deslocamento dos operadores no trânsito de Taiwan, o que poderia tornar o restabelecimento de energia muito demorado. Assim, restringindo n às chaves que conectam os ramais de uma área desenergizada aos seus

respectivos alimentadores de suporte, garantem-se alimentadores de suporte para cada ramal (i) e concentra-se as chaves a serem manobradas (ii). Porém, em sistemas nos quais as restrições i e ii não são satisfeitas, o número de chaves a serem analisadas pode levar a uma explosão combinatorial.

MORELATO & MONTICELLI (1989) utilizam um algoritmo de busca para gerar vetores $\underline{x}$. Os estados das chaves correspondem aos nós da árvore de busca. O vetor $\underline{x}$ contém todas as chaves do sistema de distribuição. Assim, o espaço de estados a ser gerado é grande, mesmo para sistemas de tamanho pequeno. Além disso, a grande maioria dos vetores $\underline{x}$ correspondem a *configurações não factíveis* (entendidas como as configurações em que há alguma área desenergizada e/ou configurações correspondentes a circuitos malhados). Basta uma chave aberta isolando um trecho de alimentador para se ter um $\underline{x}$ não factível. Desta forma, embora seja sugerido o uso de heurísticas para guiar a busca em direção às soluções factíveis, tal processo de busca se depara frequentemente com configurações infactíveis. E ainda, para cada $\underline{x}$ gerado é necessário executar um busca de grafo para se verificar se tal $\underline{x}$ é factível.

Portanto, para um número não muito grande de n (da ordem de centenas de chaves), ambos os métodos acabam se tornando proibitivos, uma vez que um plano de restabelecimento de energia necessita ser definido em curto espaço de tempo.

2.2 Tratamento da característica combinatorial

Outros métodos (AOKI et al. (1987, 1989), LIU et al. (1988), DEVI et al. (1995) e WANG et al. (1996)) tentam gerar somente vetores $\underline{x}$ factíveis atenuando a característica combinatorial do problema. Tais procedimentos, basicamente, possuem um algoritmo de transferência de carga e outro para corte de alimentadores. O algoritmo de corte decide em que ponto o alimentador será cortado, determinando assim a quantidade de carga a ser transferida para outro alimentador (na FIGURA 02, item 3.2, as chaves fechadas são, cada uma delas, uma possibilidade de corte do alimentador a que pertencem: “sectionalizing switches”). O algoritmo de transferência determina qual alimentador receberá a carga e também fecha uma das chaves que conecta os dois alimentadores (tais chaves correspondem, por exemplo, às chaves abertas na FIGURA 02: “tie-switches”). Tal procedimento garante que sempre são geradas novas configurações factíveis, reduzindo o efeito combinatório.

O procedimento começa transferindo a carga da área desenergizada para um alimentador vizinho a esta área. Se o alimentador que recebe a carga ficar sobrecarregado, ele

é cortado para que parte de sua carga seja transferida para outro alimentador. Este processo de transferência e corte se repete até que não haja alimentador sobrecarregado.

No entanto, para sistemas de distribuição complexos, o número de transferências e cortes pode ser muito grande, resultando em tempo de processamento elevado. Para solucionar esta dificuldade, DEVI et al. (1995) e WANG et al. (1996) propõem heurísticas para guiar as rotinas de transferência e corte procurando evitar tentativas com improvável sucesso, como transferir carga para um alimentador com carregamento perto de sua capacidade limite. Desta maneira, tais algoritmos promovem também uma *otimização do plano de restabelecimento de energia*.

DEVI et al. (1995) usam um algoritmo de fluxo de carga DC para selecionar alimentadores para transferência de carga. Além disso, seus sistemas de distribuição possuem seções normalmente abertas (pequenos trechos de alimentador com duas chaves, normalmente abertas, interligando alimentadores diferentes) pelas quais as cargas são sempre transferidas, reduzindo o número de vetores x possíveis de serem gerados (uma vez que somente as chaves desse tipo de seção são usadas nas manobras). Ainda para aumentar a eficiência do método, é usada uma busca no espaço de estado das chaves que conectam seções normalmente abertas (similar a busca proposta por MORELATO & MONTICELLI (1989)). WANG et al. (1996) calculam um fluxo de carga e perdas de potência para cada passo de transferência e corte, juntamente com um algoritmo de programação não linear inteira para selecionar a melhor opção. LIU et al. (1988) usam um algoritmo de fluxo de carga para reduzir as perdas nas linhas de distribuição.

No entanto, o uso de algoritmos de fluxo de carga, ou mesmo algoritmos de programação inteira a cada passo da busca (em cada solução de um problema de programação inteira, vários problemas de programação linear são em geral resolvidos), pode tornar a busca lenta com o aumento da dimensão do problema. Tal aumento ocorre se: a carga da área desenergizada for grande; o sistema de distribuição for grande (n for grande) ou o sistema em questão não possuir seções normalmente abertas, DEVI et al. (1995).

2.3 Buscando a solução ótima

Alguns métodos buscam obter um plano que realize tarefas características de POSD, além do restabelecimento de energia (ou seja, ROESD), DYALINAS & MICHOS (1989), CHEN & HSU (1989), TER-GAZARIAN & KAGAN (1992) e KAGAN AND ADAMS (1994). Nestes trabalhos, são propostos tanto algoritmos com heurísticas usadas pelos

operadores do sistema, CHEN & HSU (1989), quanto algoritmos fundamentados em programação linear ou, por exemplo, programação matemática “fuzzy”, KAGAN & ADAMS (1994).

Entretanto, tais algoritmos necessitam de uma subrotina que gere uma grande número de configurações do sistema, a partir das quais, o processo de otimização se efetua. Gerar tais configurações de grande dimensão é uma tarefa muito complicada e, especialmente, demorada. Assim, tais procedimentos não são apropriados, em geral, para restabelecimento de energia em sistemas de distribuição reais.

Por outro lado, os algoritmos descritos no item anterior promovem uma otimização do plano de restabelecimento de energia. Porém, não podem garantir uma solução ótima uma vez que tais algoritmos são baseados em heurísticas que somente geram os vetores $\underline{x}$ a partir de mudanças locais na configuração do sistema (de forma geral, realizam uma busca “hill-climbing”, WINSTON, P. H. (1993)).

2.4 Outras proposições

Outros trabalhos têm prestado uma importante contribuição na evolução dos métodos para RESD, como CASTRO et al. (1980), KAFKA et al. (1981), SAKAGUCHI & MATSUMOTO (1983), HSU et al (1992) e HSU & HUANG (1995). Os três primeiros basicamente iniciaram a sequência de publicações na área de RESD. Especial atenção deve ser dada a HSU & HUANG (1995), onde uma nova forma para identificar um plano de restabelecimento de energia é proposta. Nessa proposta, uma rede neural artificial é usada para reconhecimento de padrões. Para a fase de treinamento da rede, as entradas da rede neural são os valores normalizados das cargas das laterais dos alimentadores; as saídas correspondem aos estados das chaves que conectam os alimentadores às laterais, bem como, trechos de um mesmo alimentador. Chaves fechadas recebem valor 0,9 e chaves abertas 0,1. Na fase de testes, um processo iterativo é usado para converter os números reais na saída em valores binários. Entretanto, esta proposta requer uma estrutura fixa do circuito, bem como necessita muitos planos de restabelecimento prontos para fase de treinamento. O método é um classificador muito veloz de soluções prontas e aparenta ter capacidade de gerar soluções para padrões não treinados (generalização) HSU & HUANG (1995). Ser capaz de generalizar é um item crucial para esta aplicação de rede neural, uma vez que para sistemas grandes o número de padrões necessários para treinamento pode se tornar impraticável.

3 BUSCA COM HEURÍSTICAS “FUZZY”

Com o intuito de superar as dificuldades apresentadas nos procedimentos existentes de RESD (lidar com grandes áreas desenergizadas e obter um plano para RESD em um curto intervalo de tempo) é proposto neste capítulo um algoritmo de busca com heurísticas “fuzzy”.

3.1 Introdução

As variáveis em um plano de restabelecimento de energia são geralmente os estados das chaves do sistema de distribuição. Em MORELATO & MONTICELLI (1989) e DEVI et al. (1995), os estados das chaves correspondem aos estados da busca. Entretanto, trabalhar com estados de chaves não é intuitivo, principalmente do ponto-de-vista dos operadores do sistema. Após análise do comportamento dos operadores durante o desenvolvimento de diversos planos de restabelecimento, concluiu-se: i) não é prático, para um operador, desenvolver planos de restabelecimento de energia, em casos de grandes áreas desenergizadas e/ou sistemas de distribuição muito complexos, se raciocinarmos somente sobre chaves normalmente abertas, chaves de corte ou chaves de seções normalmente abertas (AOKI et al. (1987, 1989), CASTRO et al. (1980), DEVI et al. (1995)); ii) os operadores tentam simplesmente encontrar um caminho curto que ligue a área desenergizada com uma subestação de forma a superar tais dificuldades (para grandes áreas desenergizadas, observou-se que não era prático para os operadores trabalhar segundo a lógica de corte e transferência de carga - item 2.2, capítulo 2); iii) se um caminho não for factível devido aos limites de carregamento, pequenas mudanças são feitas neste caminho para torná-lo factível; iv) se o item iii não for possível, procura-se um novo caminho.

Obviamente que a forma de os operadores agirem não implica que esta deva ser obrigatoriamente o melhor caminho a ser seguido. Contudo, ao simularmos tal forma de agir estamos nos aproximando do raciocínio humano usado para solucionar problemas de restabelecimento de energia. Assim, unindo esta forma de raciocínio a velocidade de processamento dos computadores e à alta capacidade deles processarem um grande número

de informações simultaneamente, busca-se obter um método mais eficiente, conforme é mostrado a seguir, DELBEM et al. (1997c).

3.2 Representação de sistemas de distribuição para restabelecimento de energia

A FIGURA 02 mostra um sistema de distribuição em que as linhas retas representam alimentadores; círculos são chaves abertas; quadrados são chaves fechadas; SE significa subestação. Regiões da rede entre chaves são definidas como setores (veja FIGURA 03).

FIGURA 02: Sistema de distribuição simplificado.

FIGURA 03: Exemplo de um setor.

Setores muito pequenos ou setores com pequenas cargas podem ser unidos em um único setor maior (para decidir sobre essas uniões, a experiência dos operadores é essencial). O sistemas de distribuição da cidade de São Carlos (FIGURA 15) tem cerca de 500 setores, os quais foram reduzidos a 142 sem prejuízo na qualidade do restabelecimento de energia.

Usando o conceito de setor, podemos representar o sistema de distribuição no computador. Como iremos descrever na seção seguinte, tal representação torna possível diminuir bastante as configurações do sistema não factíveis (isto é, aquelas que mantêm áreas desenergizadas ou são malhadas).

3.3 Construindo caminhos

Vamos supor que uma falta tenha ocorrido isolando o setor 11 da FIGURA 02, o setor 12 iria se tornar um área desenergizada. Um algoritmo de busca é capaz de encontrar um caminho que ligue a área desenergizada a uma subestação usando o espaço de estados

dos setores. A FIGURA 04 mostra a árvore de busca gerada por uma busca cega para esse exemplo.

Apesar de o algoritmo de busca atingir todas as subestações (SEa, SEb, SEc, veja a FIGURA 04), ele reconstrói caminhos bem conhecidos (em geral chamados de caminhos principais). Tais caminhos são constituídos por segmentos de alimentadores. Os caminhos compostos dos setores $s1 + s2 + s3 + s4$ e dos setores $s5 + s6 + s7 + s8$ são em sua grande parte não alterados por um plano de restabelecimento de energia, pois tais setores não são diretamente afetados pela falta no setor 12. Então, se assumirmos que as chaves que unem tais setores permanecem fechadas, o algoritmo produzirá a árvore de busca da FIGURA 05.

3.4 Heurísticas “fuzzy”

Usando a busca no espaço de estados dos setores, torna-se intuitivo introduzir as heurísticas sobre os caminhos principais descritos acima, bem como outras heurísticas usadas pelos operadores para, assim, melhorar o desempenho do algoritmo de busca. Os conjuntos “fuzzy” permitem transferir para o computador conhecimentos intuitivos e inexatos. Neste trabalho, são usadas as seguintes heurísticas para guiar a busca: i) evitar setores de alimentadores com pouca folga; ii) preferir setores mais próximos de subestações (assumindo que setores mais próximos de subestações pertencem em geral a alimentadores principais, assim o estado das chaves de tais setores não devem ser alterados normalmente). Um setor que se inclua em uma dessas heurísticas é dito ser um setor quente (ou que sua temperatura é alta); caso contrário ele é frio (ou sua temperatura é baixa). Tais heurísticas podem ser expressas em regras “fuzzy”, YAGER & FILEV (1994):

FIGURA 04: Árvore de busca após uma falta no setor 11.

FIGURA 05: Árvore de busca usando caminhos principais.

“SE o setor_i ESTÁ próximo de uma subestação, ENTÃO a temperatura do setor_i É alta” (ou seja, este setor pertence provavelmente a um alimentador principal). Ou

$$\mu_{TempAlta}(t) = \mu_{SetorPróx}(n_s) \quad (2),$$

onde n_s é um número de setores entre o setor_i a subestação, t é o valor da temperatura, $\mu_{TempAlta}(t)$ é o grau de pertinência do setor_i ao conjunto “fuzzy” temperatura-alta e $\mu_{SetorPróx}(n_s)$ é o grau de pertinência do setor_i ao conjunto “fuzzy” setor-próximo;

“SE a folga do alimentador do setor_i É muito alta, ENTÃO a temperatura do setor_i É alta”.
Ou

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

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

Cinco conjuntos foram criados para classificar a distância dos setores às subestações (FIGURA 10); cinco conjuntos para classificar folga dos alimentadores (FIGURA 08 e FIGURA 09); e cinco conjuntos para classificar temperatura (FIGURA 06). Dez regras (como as regras i e ii) foram elaboradas relacionando aqueles dois primeiros cinco conjuntos aos conjuntos de classificação de temperaturas (veja APÊNDICE 1). Um exemplo da implicação “fuzzy” produzida por estas regras é mostrado na FIGURA 07.

As saídas das regras são agregadas usando um conectivo disjuntivo v. Portanto, $\mu_1 \vee \mu_2 \vee \dots \vee \mu_j \vee \dots \vee \mu_{10}$ é a saída da inferência “fuzzy” (o operador v usado é a soma probabilística). Usando o “defuzzificador” de centro-médio:

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

onde t_{mj} é o ponto em que μ_j atinge seu valor máximo, μ_j é dado pelas equações (2) ou (3) com $j = 1, 2, \dots, 10$, e t é o valor da temperatura encontrada para o setor_i.

A seguir mostra-se um exemplo de inferência “fuzzy” para um setor de um alimentor com folga $c = 400$ A e distante oito setores da subestação ($n_s = 8$). Uma folga de 400 A, pode corresponder tanto a uma folga Muito Alta quanto a uma folga Extra Alta. Ou seja, $c = 400$ pode pertencer tanto ao conjunto “fuzzy” $\mu_{folgaMuitoAlta}$, quanto ao conjunto “fuzzy” $\mu_{folgaExtraAlta}$ (veja a FIGURA 08 e FIGURA 09), porém com graus de pertinência diferentes: $\mu_{folgaMuitoAlta}(400) = 0,8$ e $\mu_{folgaExtraAlta}(400) = 0,2$. Assim, para $c = 400$, duas regras de inferência são disparadas:

REGRA 1: “SE a folga do alimentador do setor_i É muito alta, ENTÃO a temperatura do setor_i É alta” (FIGURA 08);

REGRA 2: “SE a folga do alimentador do setor_i É extra alta, ENTÃO a temperatura do setor_i É muito alta” (FIGURA 09).

FIGURE 06: Conjuntos “fuzzy” para as temperaturas do setores.

FIGURE 07: Exemplo de implicação “fuzzy” produzida pelas regras.

Para $n_s = 8$, somente uma regra é disparada:

REGRA3: “SE o setor_i ESTÁ a uma proximidade média da subestação, ENTÃO a temperatura do setor_i É média” (FIGURA 10).

As saídas das regras acima foram agregadas, para este exemplo, usando-se operador *Max*. Assim, é obtido o conjunto “fuzzy” mostrado na FIGURA 11 para a temperatura do setor_i. Como o interesse é obter um único valor a temperatura do setor_i, usa-se um “defuzzificador”, no caso, o “defuzzificador” de centro-médio. As temperaturas correspondente ao grau de pertinência máximo em cada conjunto são: $tm1 = 65$, $tm2 = 85$ e

$tm3 = 50$. Utilizando a equação (4), obtém-se: $t = (65*0,8+85*0,2+50*1,0)/(0,8+0,2+1,0) = 59,5$. Assim, atribui-se ao setor_i a temperatura “fuzzy” 59,5.

FIGURA 08: Representação gráfica da inferência devida à REGRA 1.

FIGURA 09: Representação gráfica da inferência devida à REGRA 2.

FIGURA 10: Representação gráfica da inferência devida à REGRA 3.

FIGURA 11: Conjunto “fuzzy” da temperatura do setor_i.

A árvore de busca pode então usar os valores de temperaturas dos setores para selecionar seu próximo estado (tal busca é chamada busca com heurísticas “fuzzy”). Estas temperaturas podem guiar a busca a gerar os melhores caminhos (como aquele da FIGURA 05), isto é, os caminhos mais curtos (que em geral requerem poucas operações de chaves) e que reduzam o carregamento dos alimentadores. Além disso, se tal caminho não é possível, a busca pode tentar um caminho mais longo, ou mesmo um caminho que produza uma sobrecarga de alimentador aceitável. Portanto, o algoritmo de busca não tem limites rígidos de carga e de comprimento dos caminhos (este último item está diretamente relacionado com a queda de tensão nos alimentadores).

3.5 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 FIGURA 16, 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.

3.6 As vantagens de heurísticas “fuzzy” para um algoritmo de busca em restabelecimento de energia

No trabalho de DEVI et al.(1995), em cada estágio da busca há um conjunto de chaves que podem ser operadas. Para selecionar uma daquelas chaves, um fluxo de carga DC é executado para verificar se os limites de carga dos componentes do sistema não são violados. Portanto, em cada estágio da busca, um fluxo de carga DC é rodado. Em WANG et al. (1996) as chaves a serem operadas são escolhidas por um algoritmo de programação não-linear, o qual necessita de um número muito grande de possibilidades de corte e transferência de carga para serem analisadas (veja o problema de explosão combinatorial no capítulo 2). Por outro lado, o procedimento de busca com heurística “fuzzy” escolhe os setores para construir um caminho com base nos valores de temperatura “fuzzy”. Estes valores são pré-calculados. Portanto, o algoritmo de busca é muito rápido. Além disso, usando tais valores “fuzzy”, a tendência de gerar caminhos com alimentadores sobrecarregados ou de escolher configurações de sistema inadequadas é reduzida.

No conjunto de valores “fuzzy” dos setores de um sistema de distribuição, está embutida uma busca “backward”. A busca com heurísticas “fuzzy” se inicia nos setores da área desenergizada e termina em um setor de uma subestação. Porém, uma busca “backward” pode ser elaborada (indo da subestação para a área desenergizada). Também é possível desenvolver uma busca “inter-wave”, LE (1993) (uma busca indo da área desenergizada para uma subestação (FIGURA 12) e simultaneamente outra busca das subestações até a área desenergizada, veja FIGURA 13). Entretanto, os caminhos gerados pela busca “backward” são em geral similares aos caminhos principais de cada alimentador. Estes caminhos principais estão geralmente embutidos no conjunto dos valores das temperaturas “fuzzy”. Portanto, podemos assumir que a busca com heurística “fuzzy” é uma busca “inter-wave” na qual a parte “backward” está pronta.

Além disso, os setores associados com seus valores “fuzzy” têm parte dos algoritmos de corte de alimentadores e transferência de carga embutidos (AOKI et al. (1987, 1989),

CASTRO et al. (1980), DEVI et al. (1995)). Se um caminho da busca escolhe passar por um setor de um alimentador que não pode suportar uma certa carga adicional, tal setor é automaticamente descartado e um outro setor pertencente a um outro alimentador é selecionado de acordo com as suas temperaturas “fuzzy” (sem executar um algoritmo de corte e transferência de carga). Em outras palavras, podemos dizer que todas as possíveis formas de cortes nos alimentadores estão prontas (expressas como setores) e um corte é naturalmente efetuado se um setor (pertencente a um alimentador diferente daquele em que o caminho de busca está) for escolhido de acordo com os valores “fuzzy”.

FIGURA 12: Busca “forward”.

FIGURA 13: Busca “Inter-wave”.

3.7 Algoritmo de restabelecimento de energia

Na FIGURA 14, temos um fluxograma simplificado com o procedimento de restabelecimento de energia usando heurísticas “fuzzy”. Se há algum Setor Isolado (SI), o algoritmo determina a Área Desenergizada (AD) correspondente e executa a busca com heurísticas “fuzzy” para suprir energia à AD. O algoritmo é executado até que não haja mais nenhuma AD.

FIGURA 14: Fluxograma simplificado. SI: Setor Isolado; AD: Área Desenergizada.

3.8 Resultados experimentais

	Situação 1	Situação 2	Situação 3	Situação 4
Setor Isolado (SI)	[blv0501, blv0502, blv0509, blv0508]	[blv0504, blv0505, blv0513]	[par0304, par0303, par0317, blv0519]	[sca0704, sca0705]
carga da AD	400 A	240 A	204 A	160 A
número de sub-planos	2	1	2	1
intervalo de tempo	34 s	19 s	25 s	15 s
manobras	-abrir: blv0501, blv0502, blv0505; -fechar: bvl0515, blv0507.	-abrir: blv0504, blv0505, blv0513; -fechar: blv0515, blv0507.	-abrir: par0303, par0304, par0317; -fechar: par0318, par0307.	-abrir: sca0704, sca0705, blv0505; -fechar: sca0707, blv0518.

TABELA 01: Restabelecimento de energia para quatro situações.

O restabelecimento de energia utilizando busca com heurística “fuzzy” foi testado para um sistema de distribuição grande e genérico. Uma representação simplificada deste sistema é mostrada na FIGURA 15 (com três subestações: Bela Vista (BLV), São Carlos (SCA), Paraíso (PAR); 22 alimentadores e 142 setores). Os três círculos grandes são as subestações. Os números correspondem aos nomes das chaves, círculos são chaves abertas e quadrados são chaves fechadas. A linha tracejada é o caminho gerado pela busca com heurísticas “fuzzy” quando a área desenergizada corresponde a da situação 4 da TABELA1. Nesta tabela, são listadas algumas situações de restabelecimento de energia. Os resultados também estão na TABELA 1.

FIGURA 15: Sistema de distribuição simplificado da cidade de São Carlos (CPFL).

Nenhuma comparação direta com outros métodos é feita aqui, pois nos demais trabalhos não são fornecidos os dados com tempos de processamento ou outra medida de equivalente de velocidade do algoritmo. A seguir é feita uma comparação entre a busca com heurística “fuzzy” e a proposta de DEVI et al. (1995) através da árvore de busca produzida por esses métodos.

Para o propósito de comparação, o circuito da FIGURA 15 é parcialmente mostrado na FIGURA 16. Como exemplo, foi escolhida a situação 4 (TABELA 01), na qual parte do alimentador na direita da FIGURA 16 (linha B) está desenergizado. A busca heurística produz um caminho (linha D na FIGURA 16) indo da AD até uma subestação. Nenhum vizinho daquele alimentador (linha B) poderia suportar toda a carga da AD. Por outro lado, o alimentador acima (linha A) parece ser a melhor opção para o próximo passo da busca. Neste alimentador, a busca identifica o alimentador na esquerda da FIGURA 12 (linha C) como a melhor opção para o próximo estágio da busca. De fato, este alimentador é melhor opção (ele tem uma grande folga, veja a FIGURA 17). Assim, a busca consegue suprir a AD sem executar um algoritmo de corte ou de transferência de carga, isto é, o restabelecimento de energia é alcançado com somente um sub-plano. O intervalo de tempo com processamento foi de 15 segundos para esse caso (situação 4), usando o interpretador Arity Prolog V6.0 em um Pentium100 com 32 MB de memória RAM.

Para a AD anterior, a busca foi executada no estado de espaço das chaves conforme a proposta de Devi et al. (1995) (a árvore de busca correspondente é mostrada na FIGURA 18). Depois de escolher uma chave para transferência de carga (“Load Transfer Switch”: LTS), um fluxo de carga DC (“DC Load Flow”: DCLF) é executado para verificar perdas e sobrecarga dos equipamentos. Se houver sobrecarga, uma chave para corte do alimentador é escolhida (“Sectionalizing Switch”: SS), e assim por diante. O ramo da árvore de busca formado pelas chaves 1, 4 e 13 corresponde a solução (o asterisco na FIGURA 18). A busca gera 18 nós que necessitam ser analisados pelo DCLF.

A FIGURA 19 mostra a árvore de busca no espaço de estado dos setores para a mesma AD (situação 4). A busca inicia em um setor da AD e termina em um setor de uma subestação (SE). Os setores (Si) podem ser vistos na FIGURA 16, bem como o caminho produzido pela busca. Portanto, o espaço de estado dos setores é menor do que o espaço das chaves.

FIGURA 16: Configuração antes do plano de restabelecimento de energia ter sido executado.

FIGURA 17: Configuração depois do plano de restabelecimento de energia ter sido executado.

FIGURA 18: Árvore de busca no estado de espaço das chaves.

FIGURA 19: Árvore de busca no estado de espaço dos setores.

3.9 Algumas considerações

Um método baseado em setores a partir dos quais se produz caminhos para suprir energia tem a vantagem de ser muito similar ao raciocínio dos operadores, facilitando a introdução de heurísticas usadas por eles. Este método permite também automatizar o restabelecimento de energia em sistemas de distribuição complexos (sem zonas normalmente abertas, DEVI et al. (1995)) e sem características regulares na configuração do sistema. Além disso, o algoritmo proposto neste capítulo reduz muito o tempo de processamento, pois além de trabalhar no espaço de estado dos setores (menor que o espaço de estado das chaves usado no algoritmo de DEVI et al. (1995)), a busca com heurísticas “fuzzy” tem a vantagem de evitar algumas rotinas como, por exemplo, a execução de fluxos de carga constantemente e rotinas de corte e transferência de carga (como foi mostrado na seção anterior). Em outras palavras, o algoritmo proposto poupa tempo de processamento evitando algumas rotinas e cálculos durante a execução da busca, os quais são sempre requeridos pelos métodos atualmente disponíveis, DELBEM et al. (1997c).

Outros avanços podem ser atingidos usando uma versão compilada do programa em Prolog. O desempenho poderá ser melhorado também adicionando mais conhecimentos dos operadores na forma de regras “fuzzy”.

Esta metodologia também pode solucionar casos com múltiplas faltas. Múltiplas faltas significa diversas áreas não “energizadas” ao mesmo tempo. Desta forma, basta executar a busca com heurísticas “fuzzy” para cada uma das áreas desenergizadas produzidas por cada uma das faltas.

Com os resultados obtidos até aqui finaliza-se o trabalho proposto para a pesquisa de mestrado. No entanto, outras alternativas de algoritmos para restabelecimento de energia em sistemas de distribuição são sugeridos nos próximos capítulos visando futuras pesquisas.

4 ALGORITMOS GENÉTICOS PARA RESD

4.1 Porque usar AG em RESD

Mudanças na configuração de sistemas de distribuição são necessárias para restabelecer a energia (RESD) ou para atingir uma configuração do circuito com balanceamento de carga, menores sobrecargas, quedas-de-tensão e redução de perdas (POSD). Conforme visto anteriormente, alguns trabalhos DEVI et al. (1995), WANG et al. (1996) buscam o RESD juntamente com objetivos de POSD (ROESD). Nesses trabalhos, manobras factíveis (que mantém 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 não linear inteira é executado para se escolher o melhor plano dentre os obtidos.

No entanto, as várias configurações factíveis não são necessariamente geradas 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 iterativo. A função objetivo para problemas de RESD é descontínua e não linear: a mudança de apenas um *estado de uma chave* (*variável* da função objetivo) pode levar a valores da função objetivo totalmente discrepantes. Desta forma, a solução ótima só poderia ser garantida se, através da árvore de busca, fossem encontrados todos os planos de restabelecimento factíveis e desses, fosse extraído 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 ótimos locais.

Para tratar deste entrave, é proposto então um método de restabelecimento de energia baseado em AG (AG para RESD ou ROESD, DELBEM et al. (1996, 1997a, 1997b)). Este método consegue agrupar as melhores pré-soluções, podendo tais soluções corresponderem a configurações do sistema bastante diferentes. Assim, os AG podem lidar

simultaneamente com funções não lineares e descontínuas.

Como resultado, os AG são capazes de trabalhar simultaneamente com estados correspondentes a regiões de mínimos distantes, possibilitando analisar diferentes alternativas para o restabelecimento de energia e otimização da solução de forma simultânea.

4.2 AG em restabelecimento de energia (AGRE)

AG são procedimentos de busca baseados nos mecanismos naturais de seleção e genética. Esta técnica tem a característica de ser robusta (desempenho bom para uma diversidade de aplicações), GOLDBERG 1989. Como consequência, AG podem ser utilizados tanto para tratar problemas que normalmente utilizam busca quanto problemas de otimização. Assim, os AG podem ser 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, uma configuração factível 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 serem reproduzidos. 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).

Para o problema de restabelecimento de energia, cada indivíduo foi considerado como uma configuração do sistema capaz de alimentar todos os seus setores sem a formação de malhas (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 (FIGURA 03) do sistema de distribuição de energia. Setores de um mesmo alimentador equivalem a genes de um mesmo cromossomo (a FIGURA 02 mostra três cromossomos: os alimentadores SE_A , SE_B e SE_C). 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 02 o gene 7 pertencente ao cromossomo SE_B é vizinho do gene 3 do cromossomo SE_A e, portanto, podem ser trocados).

A função objetivo inicialmente adotada para o ROESD busca “minimizar” o desbalanceamento de carga entre os alimentadores. Assim, a cada geração os indivíduos entre os 10% (elitismo) que apresentam o menor carregamento máximo de seus alimentadores e maior carregamento mínimo são separados como candidatos a serem reproduzidos. Os indivíduos a serem reproduzidos são escolhidos por sorteio. Todos os novos indivíduos são adicionados a população e nenhum indivíduo é eliminado.

4.3 Exemplo

Um circuito simplificado foi escolhido para possibilitar a visualização da solução ótima, bem como explicitar satisfatoriamente as diferenças entre este e os métodos de busca mencionados anteriormente. Ainda, para facilitar a verificação do balanceamento de cargas, consideraram-se todos os setores do circuito (FIGURA 02) como tendo o mesmo valor de carga consumida.

Simula-se uma falta no setor 11, isolando o setor 12. O AGRE inicialmente alimenta o setor 12 pelo alimentador SE_B (C2) como pode ser verificado na TABELA 02 (onde 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). Porém, ao longo das gerações do AGRE, a quinta geração atinge a configuração do sistema com balanceamento de carga ótimo. Deve ser observado que, para a primeira geração, o carregamento do alimentador SE_C (C3) é muito baixo enquanto que o alimentador vizinho SE_A (C1) tem mais que o dobro da carga de SE_C . Já na quinta geração esse desbalanço de carga é reduzido ao valor mínimo possível.

Para se chegar a solução ótima por busca, é necessário que o método seja capaz de encontrar todas as configurações factíveis do sistema. Porém, uma busca cega no espaço de estados das chaves MORELATO & MOTICELLI (1989) gera um número excessivo de configurações não factíveis (tornando-se um método muito lento). Por outro lado, métodos de buscas que produzam configurações factíveis (AOKI et al. (1987, 1989), DEVI et al. (1995)) não são capazes de gerar todas as configurações factíveis do sistema e, portanto, não garantem o ótimo (ou seja, não podem passar o gene 13 de C1 para C3 (TABELA 02)). Isso ocorre porque as funções heurísticas dos métodos heurísticos são capazes apenas de trabalhar com um conjunto de variáveis de estado locais (próximas dos setores desenergizados), impossibilitando alterações globais na configuração do sistema para levá-lo

ao ótimo global.

Seguindo esse conceito de ótimos locais e globais, o AGRE consegue tratar várias regiões de ótimos locais simultaneamente e tenta otimizar cada solução fazendo alterações em pontos que podem estar distantes (setor 13) do último ponto alterado (setor 12 conectado ao setor 6).

4.4 AG para planejamento

Conforme visto, os AG permitem encontrar uma solução ótima para o restabelecimento de energia em sistemas de distribuição. Além disso, o mesmo programa pode ser usado para fazer a otimização da configuração do circuito. Os sistemas de distribuição crescem em uma taxa elevada (alguns crescem a mais de 10% ao ano em algumas regiões do 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 nos 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.

Recentemente alguns trabalhos propuseram AG para planejamento de sistemas de distribuição, YEH et al. (1996), FUKUYAMA et al. (1996) e MIRANDA et al. (1994). O primeiro explica em linhas gerais como os AG podem chegar as soluções ótimas e trazem uma aplicação para projeto de iluminação de ruas, no qual associa-se os pontos de iluminação uma variável binária que indica se o ponto dever ser ou não iluminado. FUKUYAMA et al. (1996) propõem AG para planejamento de expansão e geração. O problema é formulado como um problema de otimização combinatorial. Como consequência, são necessário multiprocessadores e aplicação de AGP (Algoritmo Genético Paralelo). De forma geral, todos os trabalhos propõem modelos que possuem o problema da característica combinatorial. Por outro lado, o AGRE possa vir a reduzir a questão combinatorial e de reconfiguração ao modelar o sistema de distribuição através de setores. Desta forma, uma versão do AGRE para planejamento de sistemas de distribuição pode vir a ser adequada.

Na TABELA 03, mostra-se o desempenho do algoritmo na busca da configuração ótima para o circuito da FIGURA 02, mas agora com suas cargas inicialmente desbalanceadas (observe que na TABELA 03, o cromossomo SEa (C1) está com quase todos os genes do indivíduo 1 ativos). A configuração ótima para este sistema é alcançada em frações de segundo.

4.5 Algumas considerações

Neste capítulo, foi apresentado o AGRE para ser aplicado no problema de ROESD. Os trabalhos de Restabelecimento de Energia (incluindo a busca com heurísticas “fuzzy”) e de POSD são capazes apenas de fazer otimizações locais. Para vencer esse obstáculo, implementou-se um AG para se obter o restabelecimento ótimo da energia (uma vez que os AG permitem realizar simultaneamente as tarefas de busca e otimização). Os resultados obtidos confirmam essa característica dos AG, conciliando os objetivos de restabelecimento de energia e planejamento ótimo, bem como mostrando que o método é capaz de fazer alterações globais no sistema para obter a solução ótima, DELBEM et al. (1996, 1997a, 1997b).

Além disso, esta metodologia pode tratar também de situações de múltiplas faltas. É somente necessário executar o AGRE para otimizar a configuração da nova rede sem os setores que foram isolados.

Por outro lado, foram verificadas algumas dificuldades do AGRE para tratar de sistemas com grande número de setores. Para esses sistemas o método como foi desenvolvido pode requerer uma quantidade de memória RAM muito grande (por exemplo, pode precisar de quase 1 MRAM por indivíduo para um sistema com 100 setores). Outro problema ainda mais crítico é necessidade de verificar se cada indivíduo novo corresponde a uma configuração factível do sistema. Essa verificação torna o algoritmo muito lento para um sistema real do tamanho do sistema de distribuição da FIGURA 15, por exemplo.

As dificuldades descritas acima são causadas pela forma de representação do sistema de distribuição feita basicamente através de uma matriz incidência. A grande quantidade de memória RAM alocada é principalmente devida à esparsidade característica das matrizes incidência. O algoritmo se torna lento ao se executar uma rotina de busca a cada novo indivíduo gerado (ou seja, a cada matriz incidência alterada) para verificar se este indivíduo representa um sistema de distribuição factível. Como tal rotina de busca é sempre necessária

a cada novo indivíduo gerado, o AGRE se torna lento para sistemas com grande número de setores.

Diante dessas dificuldades, uma nova representação do sistema é sugerida como uma forma de viabilizar a aplicação de AG em sistema de distribuição de quaisquer tamanhos. Tal representação é brevemente abordada no capítulo seguinte, seu desenvolvimento completo é motivo para trabalhos futuros que vão além dos objetivos desta dissertação de mestrado.

TABELA 02: Resultados do restabelecimento de energia para a falta no setor 11.

gene	1º indivíduo			5º indivíduo		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3
1	A			A		
2	A			A		
3	A			A		
4	A			A		
5		A			A	
6		A			A	
7		A			A	
8	A				A	
9			A			A
10			A			A
11						
12		A			A	
13	A					A
CA	6	4	2	4	5	3
s _{CA}	2.0			1.5		

TABELA 03: Desempenho do algoritmo na busca da configuração ótima.

gene	1º geração			31º geração		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3
1	A			A		
2	A			A		
3	A			A		
4	A			A		
5		A			A	
6	A				A	
7	A				A	
8	A				A	
9			A			A
10	A					A
11	A					A
12	A					A
13	A					A
CA	11	1	1	4	4	5
s _{CA}	5.8			0.6		

5 ALGORITMOS GENÉTICOS PARA SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO GENÉRICOS

É abordada brevemente, neste capítulo, uma possível metodologia para tornar a aplicação de AG viável para quaisquer sistemas de distribuição, independentemente do tamanho do sistema, da área desenergizada ou de características específicas do sistema de distribuição. Ou seja, sugere-se um AG para restabelecimento de energia em sistemas de distribuição genéricos (AGSG), a ser desenvolvida completamente em estudos futuros.

5.1 Teoria de grafos relacionada com a representação de sistemas de distribuição

Esta seção começa definindo um grafo simples G (veja WILSON (1972)), como sendo um par $(N(G), E(G))$, onde $N(G)$ é um conjunto finito não vazio de elementos chamados nós e $E(G)$ é um conjunto finito de pares não ordenados de elementos distintos de $N(G)$ chamados arcos; $N(G)$ é às vezes chamado de conjunto de nós de G . Como uma ilustração, a FIGURA 20 representa um grafo G cujo conjunto de nós $N(G)$ é o conjunto $\{u, v, w, z\}$, e cujo conjunto de arcos $E(G)$ consiste dos pares $\{u, v\}$, $\{v, w\}$, $\{u, w\}$, e $\{w, z\}$. O arco $\{x, y\}$ é dito unir os nós x e y .

FIGURA 20: Exemplo de grafo.

Dado qualquer grafo G , uma seqüência em G é uma seqüência finita de arcos da forma $\{v_0, v_1\}, \{v_1, v_2\}, \dots, \{v_{m-1}, v_m\}$ (também denominada por $v_0 \rightarrow v_1 \rightarrow v_2 \rightarrow \dots \rightarrow v_m$). Uma seqüência de arcos em que todos os arcos são distintos é chamada caminho; se, além disso, os nós forem distintos (exceto, possivelmente, $v_0 = v_m$), então o caminho é chamado de cadeia. Um caminho ou cadeia são fechados se $v_0 = v_m$. Um grafo é dito ser conexo se, dado qualquer par de nós x, y de G , há uma cadeia de x até y . Um grafo arbitrário pode ser dividido em sub-grafos chamados de componentes conexos. (Um grafo conexo tem somente um componente; um grafo com mais de um componente é chamado de grafo desconexo).

Teorema 1 *Se um arco é removido de um grafo conexo sem cadeias fechadas, ele resultará em dois grafos conexos sem cadeias fechadas.*

Prova: Primeiro, se um arco é removido de um grafo conexo, somente aquelas cadeias passando pelo arco removido são eliminadas. Assume-se que dois sub-grafos foram, então, formados. Como os dois novos sub-grafos não têm cadeias passando pelo arco removido, ambos os sub-grafos são mantidos conexos. Segundo, em um grafo conexo sem cadeias fechadas, existe somente uma cadeia de um nó para o outro. Se um arco é removido daquele grafo conexo, nenhuma cadeia nova é formada. Portanto, a maneira de se conectar quaisquer dois nós permanece única, ou seja, não é possível formar cadeias fechadas. $\square$

Teorema 2 *Sejam G_1 e G_2 dois grafos desconexos um do outro sem cadeias fechadas. Adicionando um arco conectando-os, resultará apenas um grafo conexo sem cadeias fechadas.*

Prova: Suponha que o arco $v_i \rightarrow w_j$ conecte os grafos G_1 e G_2 . Como $v_i \in N(G_1)$ e G_1 é um grafo conexo, ele tem uma cadeia de qualquer outro nó de G_1 até v_i . Devido ao arco $v_i \rightarrow w_j$, existe uma cadeia de qualquer nó de G_1 até w_j . Desde que $w_j \in N(G_2)$ e G_2 é um grafo conexo, há uma cadeia do nó G_2 a w_j . Conseqüentemente existe uma cadeia de qualquer nó de G_1 até qualquer nó de G_2 e vice-versa (então os grafos G_1 e G_2 têm somente uma conexão entre eles).

Se há mais de uma cadeia de qualquer nó de G_1 até qualquer nó de G_2 , então há uma cadeia fechada conectando aqueles nós. Portanto há mais do que uma conexão entre G_1 e G_2 , o que é uma contradição com a hipótese de que G_1 e G_2 não estão conectados um com o outro. Portanto, o grafo conexo resultante é formado somente por cadeias não fechadas. $\square$

5.2 Equivalência entre os grafos desconexos sem cadeias fechadas e a representação dos sistemas de distribuição

Um grafo associado a um sistema de distribuição pode ser obtido ao se considerar suas chaves como sendo arcos e os setores (veja o capítulo 2) como sendo nós. O grafo associado a um sistema de distribuição é um grafo desconexo. Os alimentadores são os componentes conexos dos grafos de sistemas de distribuição. Cada alimentador é composto por cadeias não fechadas. Como exemplo, o sistema da FIGURA 02 está representado por cadeias de grafo na FIGURA 21 (onde números significam setores; as linhas são cadeias de grafo; linhas com pelo menos um setor igual pertencem ao mesmo componente (alimentador)).

cadeia	nós
1	1 2 3 4
2	1 13
3	5 6 7 8
4	9 10 11 12

FIGURA 21: Representação por cadeias de grafo.

As mudanças na configuração do sistemas feitas pelo procedimento desenvolvido têm dois passos: i) abra uma chave que está conectada ao setor_i no “alimentador_f”, ii) feche uma chave que está conectada ao setor_i no “alimentador_g” (este passo usa uma matriz com os setores vizinhos de cada setor. Tal matriz nunca é alterada pelo algoritmo, assim não gera problemas de memória nem de velocidade para o algoritmo). A operação i) é como aquela descrita no Teorema 1 e a operação ii) é similar àquela mostrada no Teorema 2. Em outras palavras, um grafo desconexo formado por componentes conexas sem cadeias fechadas, depois de alterações como as descritas nos teoremas 1 e 2, continua um grafo desconexo formado por componentes sem cadeias fechadas, isto é, o universo de grafos desconexo sem cadeias fechadas é mantido.

Portanto, toda vez que o procedimento muda a configuração do sistema, ambos os teoremas são respeitados. Assim, depois de uma mudança em uma configuração factível com n alimentadores e sem cadeias fechadas, a nova configuração permanecerá com n alimentadores e sem cadeias fechadas, isto é, a nova configuração do sistema é também factível.

5.3 O poder da representação das cadeias de grafo

A representação dos grafos em computadores é geralmente feita por uma matriz incidência, WILSON (1972). Ela gasta pelo menos n^2 “bytes” para representar uma configuração de um sistema com n nós, isto é, o espaço de memória “alocada” é uma função quadrática de n . Mesmo para sistemas de distribuição não muito grandes, a memória “alocada” torna-se um ponto crucial, uma vez que milhares dessas matrizes (representado indivíduos) são criadas pelo AGRE. Por outro lado, a representação por cadeias de grafo (matriz de cadeias) precisa de cerca de n “bytes” (veja a FIGURA 22: o setor 100* está em uma subestação, assim seu alimentador é chamado de alimentador 100), de forma que o espaço de memória “alocado” é uma função linear de n . Outro ponto crucial no uso de AG para restabelecimento de energia é o tempo gasto para se gerar uma nova configuração do sistema. Sempre que uma configuração para um sistema é escolhida, é necessário verificar se a nova configuração corresponde a uma configuração factível. É preciso assim, executar uma busca para verificar se as novas conexões correspondem a configurações factíveis e reconstruir a nova matriz. Portanto, a matriz incidência não pode ser eficientemente usada para representar a configuração de sistema de distribuição.

5.4 Dificuldades computacionais de implementação

Para se conseguir representar um sistema de distribuição por cadeias de grafo usando somente n “bytes” (onde n é número de setores do sistema), é necessário que se utilize “alocação” dinâmica de memória. Ou seja, as dimensões da matriz de cadeias não podem ser pré-definidas ao se iniciar o programa (conforme é feito, em geral). As matrizes de cadeia não têm tamanho definido. Os valores máximos possíveis em cada uma de suas dimensões são muito grandes, tornando impraticável defini-las através de suas maiores dimensões possíveis. Além disso, milhares dessas matrizes são geradas pelo AGSG. Para implementar

tal algoritmo, usou-se a linguagem C++ que permite certas facilidades para fazer “alocação” dinâmica.

Cadeia	nós						
1	1	2	3	4	5	6	7
2	8	9	10	11			
3	12	13	14	15	16	17	18
4	19	20	21	22	23		
5	24	25	26	27	28	29	30
6	24	25	26	27	28	29	31 32
7	33	34	35				
8	36	37					
9	38	39	40	41			
10	38	39	40	42	43	44	
11	38	39	40	42	43	45	47
12	38	39	40	42	43	45	46 48
13	49	50	51	52	53	54	55 56
14	57	58	59	60	61		
15	62	63	64	65			
16	66	67	68	69	70		
17	71	72	73				
18	71	72	74				
19	75	76	77	78	79	80	81
20	82	83	84	85	86	87	88
21	89	90	91	92			
22	89	90	91	93	94	95	
23	89	90	91	93	94	96	97 98 99
24	100*	101	102	103	104	105	
25	100*	101	102	106	107	108	109
26	110	111	112	113			
27	110	111	112	114			
28	115	116	117	118	119		
29	115	116	117	118	120		
30	115	116	117	125	124	122	123
31	115	116	117	125	126		
32	127	128	129	130	131	132	133
33	127	128	129	130	134	135	136
34	137	138	139	140			
35	141	142					

FIGURA 22: Cadeias de grafo do complexo sistema de distribuição da cidade de São Carlos.

Assim, para reduzir ainda mais a quantidade de memória RAM “alocada” , foram usados variáveis do tamanho de um “byte” para representar os números correspondentes a cada setor do sistema (FIGURA 03). Além disso, usou-se “alocação” dinâmica para: cada cadeia de grafo (vetor com valores “byte”); para cada matriz de cadeias de grafo (ou indivíduo); para estrutura “vetor de indivíduos” (que guarda um valor inteiro que identifica

cada indivíduo) e para a estrutura denominada “vetor de valores da função objetivo” (que guarda um valor “long double” para cada indivíduo).

Ainda, na construção de um novo indivíduo, os dados do indivíduo pai (basicamente os números que representam cada setor) não são copiados, mas simplesmente apontados por novos ponteiros (relacionados ao novo indivíduo) para as mesmas posições de memória dos dados do indivíduo pai. Com isso, economiza-se memória RAM e aumenta-se a velocidade de processamento (a velocidade do algoritmo foi aumentada em aproximadamente quatro vezes com esse procedimento).

5.5 Otimização multiobjetivo

Inicialmente limitou-se o algoritmo a um só objetivo: reduzir o desbalanço entre os alimentadores. Calculado o desbalanço z entre os alimentadores de um indivíduo, avalia-se este indivíduo através da seguinte função aptidão:

$$f = \exp(\exp(\sigma - z)^2) \quad (5)$$

onde z é o desbalanço (desvio padrão) dos carregamentos dos alimentadores em porcentagem e σ é um valor estipulado como o máximo desbalanço provável, também em porcentagem. Nos testes realizados usou-se $\sigma = 5,5$. Verificou-se que, utilizando a equação (5), consegue-se destacar bem indivíduos com z menores (mais aptos), ou mesmo tempo que não permite que indivíduos com z pouco maior sejam totalmente desprezados.

Para o caso em que o número de operações de chaves é considerado na função aptidão (tem-se um problema com múltiplos objetivos), a equação (5) não é alterada. No entanto, o desbalanço z é manipulado conforme a seguinte equação:

$$z' = z + \beta * (n_{\text{manobras}} / l_{\text{máx.}}) \quad (6)$$

onde n_{manobras} é o número de pares de operações de chaves, $l_{\text{máx}}$ é um limite aceitável de manobras no restabelecimento energia e β é o peso de $l_{\text{máx}}$ em termos de desbalanço entre os alimentadores. Nos testes realizados foi usado $l_{\text{máx}} = 20$ e $\beta = 1,5$.

Por outro lado, se não fizer sentido comparar desbalanço com número de manobras, a equação (5) não é mais capaz de tratar da otimização multiobjetivo. GOLDBERG (1989)

sugere, então, o conceito de *ótimo de Pareto*. Este conceito pode ser bem explicado com um exemplo.

Suponha que haja cinco configurações factíveis (A, B, C, D, E) para um sistema de distribuição, que resultam nos seguintes valores de z e n_{manobras} :

$$A = (2,0 ; 10) \text{ (} z ; n_{\text{manobras}} \text{)}$$

$$B = (4,0 ; 6)$$

$$C = (5,5 ; 4)$$

$$D = (6,0 ; 5)$$

$$E = (5,0 ; 8)$$

Estes dados são mostrados na FIGURA 23, um gráfico de z versus n_{manobras} . Os melhores pontos seriam os do canto inferior esquerdo do gráfico. As configurações A, B e C seriam boas escolhas, apesar de nenhum dos três ser o melhor nas duas dimensões (ou critérios). Na terminologia de otimização, é dito que esses três pontos são *não-dominantes* porque não há pontos melhores do que eles para todas os critérios. As configurações D e E são as piores escolhas porque são dominadas por um outro ponto (D é dominada por C; E é dominado por B). Portanto, neste problema, ao invés de se obter uma única resposta, obtém-se um conjunto de respostas que não são dominadas por nenhuma outra, isto é, o conjunto ótimo de Pareto (P-ótimo). Neste caso em particular, o conjunto P-ótimo é {A, B, C}. Uma vez que o conceito de P-ótimo não permite selecionar uma única alternativa do conjunto P-ótimo, os operadores do sistema deveriam fazer um julgamento das configurações do P-ótimo para chegar a uma solução particular.

FIGURA 23: Ilustração de otimização multiobjetivo.

Para tornar as condições do ótimo de Pareto matematicamente mais rigorosas, afirma-se que o vetor $\underline{x}$ é parcialmente menor que $\underline{y}$, simbolicamente $\underline{x} <_p \underline{y}$, se as seguintes condições são respeitadas:

$$(\underline{x} <_p \underline{y}) \Leftrightarrow (\forall i)(x_i \leq y_i) \wedge (\exists i)(x_i < y_i) \quad (7)$$

Sobre estas circunstâncias é dito que $\underline{x}$ domina o ponto $\underline{y}$. Se um ponto é não dominado por qualquer outro, ele é chamado *não-dominado* ou *não-inferior*.

O conceito de ótimo de Pareto não foi usado nos testes mostrados a seguir. Este conceito pode vir a melhorar o desempenho do algoritmo proposto e demonstra ser a melhor alternativa para se tratar com mais de dois critérios (dimensão de $\underline{x} > 2$).

5.6 Resultados dos testes

O algoritmo proposto foi testado para o complexo sistema de distribuição da cidade de São Carlos. Sua representação em cadeias de grafo é mostrada na FIGURA 22. Inicialmente, foi exigido do algoritmo “minimizar” o desbalanço de carga entre os alimentadores (supõe-se que cargas balanceadas irão “minimizar” a sobrecarga dos equipamentos). A FIGURA 24 mostra que o AGSG proposto atinge o mínimo desbalanço dos alimentadores em cerca de 1500 gerações (3 segundos) para o sistema da FIGURA 18.

Na FIGURA 25, é mostrado o desempenho do algoritmo para alcançar a solução ótima se o alimentador 100* é desenergizado (veja a FIGURA 22) e sua carga está totalmente transferida para um alimentador vizinho (a configuração ótima é atingida em cerca de 6700 gerações, 10 segundos). Finalmente, para este mesmo caso, exige-se também “minimizar” o número de manobras, a solução ótima é atingida em torno de 1600 gerações (38 segundos, veja a FIGURA 26). O AGSG demora mais neste caso do que nos anteriores: 1600/38 gerações por segundo. Foi usado um Pentium100 com 32 MB de memória RAM em todos os testes.

FIGURA 26: Desbalanço mínimo dos alimentadores com mínimo número de operações de chaves.

5.7 Algumas considerações

Os métodos para restabelecimento de energia em sistemas de distribuição disponíveis hoje são apenas capazes de tratar com otimizações locais conforme já foi mencionado. Para vencer este obstáculo, propõe-se uma técnica baseada em AG para obter um restabelecimento de energia ótimo. Esta técnica é capaz de realizar busca e otimização, inclusive para funções objetivos não lineares e não contínuas, simultaneamente. Uma nova representação da configuração dos sistemas de distribuição por cadeias de grafo foi proposta. Tal representação permite o AGSG tratar de sistemas de distribuição grandes, bem como grandes áreas desenergizadas.

Esta metodologia também pode solucionar casos com múltiplas faltas. Múltiplas faltas significa diversas áreas não “energizadas” ao mesmo tempo. Desta forma, basta executar o AGSG para a nova configuração da rede sem os setores isolados produzidos por cada uma das faltas.

6 CONCLUSÕES

O restabelecimento de energia automático em sistemas de distribuição tem recebido uma atenção crescente. Este trabalho espera ter contribuído para solucionar os principais entraves das técnicas empregadas para obter um plano de RESD. Como foi mostrado, a busca com heurística “fuzzy” é capaz de produzir rapidamente um plano para restabelecer energia mesmo nos casos de circuitos grandes ou de largas áreas desenergizadas.

Além de encontrarmos um plano de restabelecimento em um intervalo de tempo curto, verificamos que AGRE pode fornecer o restabelecimento de energia ótimo.

Os resultados indicam que o ROESD é possível mesmo para sistemas complexos e grandes. E ainda, um plano ótimo de restabelecimento de energia pode ser rapidamente alcançado utilizando-se o AGSG. Além de ser mais rápido, o AGSG quase sempre encontra uma solução ótima, em oposição as demais técnicas que só podem garantir otimizações locais e com alto custo de tempo de processamento.

Novos avanços podem ser feitos no algoritmo proposto, como por exemplo, o uso do conceito de otimização de Pareto. Novos critérios (ou objetivos) podem ser adicionados aos critérios de redução do número de manobras e de desbalanço entre alimentadores.

Nos testes realizados, o AGSG foi formulado com base nos AG clássicos, no entanto, variações deste com características específicas podem apresentar resultados ainda melhores. Por exemplo, o uso de um *fator de diversidade*, possibilita que indivíduos “ruins”, mas com características bem diferentes dos indivíduos “melhores”, tenham oportunidade de se destacar, permitindo o surgimento mais rápido de soluções melhores (pois o *fator de diversidade* tende a evitar ótimos locais).

Cogita-se também o uso de heurísticas “fuzzy” aplicadas ao AGSG. Por exemplo, tais heurísticas poderiam ser usadas na avaliação dos diversos critérios de uma otimização multiobjetivo.

Uma consequência natural é a aplicação de uma versão de AGSG em POSD, pois os métodos para POSD que utilizam AG possuem o problema da característica combinatorial conforme foi visto no item 4.4.

Concluindo, pode-se dizer que, dentre as três propostas apresentadas (busca com heurísticas “fuzzy”, AGRE e AGSG), o AGSG apresenta as melhores perspectivas para futuros trabalhos, sendo o principal alvo do nossos estudos após finalizada a proposta de busca com heurísticas *fuzzy*.

APÊNDICE 1

Regras de Inferência Utilizadas

1. Regras sobre folga dos alimentadores

SE a folga do alimentador do setor_i É baixa ENTÃO a temperatura do setor_i É baixa.

SE a folga do alimentador do setor_i É média ENTÃO a temperatura do setor_i É baixa.

SE a folga do alimentador do setor_i É alta ENTÃO a temperatura do setor_i É média.

SE a folga do alimentador do setor_i É muito alta ENTÃO a temperatura do setor_i É alta.

SE a folga do alimentador do setor_i É extra alta ENTÃO a temperatura do setor_i É muito alta.

2. Regras sobre proximidade dos setores

SE a proximidade do setor_i É baixa ENTÃO a temperatura do setor_i É baixa.

SE a proximidade do setor_i É média ENTÃO a temperatura do setor_i É média.

SE a proximidade do setor_i É média alta ENTÃO a temperatura do setor_i É alta.

SE a proximidade do setor_i É alta ENTÃO a temperatura do setor_i É muito alta.

SE a proximidade do setor_i É muito alta ENTÃO a temperatura do setor_i É extra alta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1 LIVROS

GOLDBERG, D. E. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. New York, Addison-Wesley Publishing Company.

LE, T. V. (1993). *Techniques of prolog programming*. Singapore, John Wiley & Sons.

WILSON, R. J. (1972). *Introduction to graph theory*. Glasgow, Bell & Bain Ltd.

WINSTON, P. H. (1993). *Artificial intelligence*. New York, Addison-Wesley.

2 ARTIGOS E PERIÓDICOS

AOKI, K. KUWABARA, H., SATOH, T., KANEZASHI, M. (1987). Outage state optimal load allocation by automatic sectionalizing switches operation in distribution systems. *IEEE Trans. on Power Delivery*, v.PWRD-2, n.4, p.1177-1185, Oct.

AOKI, K., NARA, K., ITOH, M., SATOH, T., KUWABARA, H. (1989). A new algorithm for service restoration in distribution systems. *IEE Trans. on Power Delivery*, v.4, n.3, p.1832-1839, July.

CASTRO, CARLOS H., BUNCH, JENNINGS B. TOPKA, TERRY M. (1980). Generalized algorithms for distribution feeder deployment and sectionalizing. *IEEE Trans. on PAS*, v.PAS-99, n.2, p.549-557, Mar./Apr.

CHEN, J. L., HSU, Y. Y. (1989). An expert system for load allocation in distribution expansion planning. *IEEE Trans. on Power Delivery*, v.4, n.3, p.1910-1917, July.

DEVI, V. S., GUPTA D. P. S., ANANDALINGAM G. (1995). Optimal restoration of power supply in large distribution systems in developing countries. *IEEE Trans. on Power Delivery*, v.10, n.1, Jan.

- DIALYNAS, E. N., MICHOS, D. G. (1989). Interactive modeling of supply restoration procedures in distribution system operation. *IEEE Trans. on Power Delivery*, v.4, n.3, p.1847-1854, July.
- FUKUYMA, Y., CHIANG, H.-D (1996). A parallel genetic algorithm for generation expansion planning. *IEEE Trans. on Power Systems*, v.11, n.2, p.955-961, May.
- GHOSHAL, K. (1997). Distribution automation: SCADA integration is key. *IEEE Computer Applications in Power*, p.31-35, Jan.
- HSU, Y. Y., HUANG, H. M., KUO, H. C., PENG, S. K., CHANG, C. W., CHANG, K. J., YU, H. S., CHOW, C. E., KUO, R. T. (1992). Distribution system service restoration using a heuristic search approach. *IEEE Trans. on Power Delivery*, v.7, n.2, p.734-740, July.
- HSU, Y. Y., KUO, H. (1994). A heuristic based fuzzy reasoning approach for distribution system service restoration. *IEEE Trans. on Power Delivery*, v.9, n.2, p.948-953, Apr.
- HSU, Y. Y., HUANG, H. (1995). Distribution system service restoration using the artificial neural network approach and pattern recognition method. *IEE Proc.-Gener. Transm.. Distrib.*, v.142, n.3, p.251-256, May.
- KAFKA, R. J., PENDERS D. R., BOUCHEY S. H., ADIBI, M. M. (1981). System restoration plan development for a metropolitan electric system. *IEEE Trans., on PAS*, v.100, n.8, p.3703-3711, Aug.
- KAGAN, N., ADAMS, R. N. (1994). Electrical power distribution systems planning using fuzzy mathematical programming. *Electrical Power & Energy Systems*, v.16, n.3, p.191-196.
- LIU, C. C., LEE, S. J., VENKATA, S. S. (1988). An expert system operational aid for restoration and loss reduction of distribution systems. *IEEE Trans. on Power Systems*, v.3, n.2, p.619-626, May.

MIRANDA, V., RANITO, J., V., PROENÇA, L., M. (1994), Genetic Algorithms in Optimal Multistage Distribution Network Planning. *IEEE Trans. on Power Systems*, v.9, n.4, p.1927-1933, Nov.

MORELATO, A. L. MONTICELLI, A. (1989), Heuristic search approach to distribution system restoration. *IEEE Trans. on Power Delivery*, v.4, n.4, p.2235-2241, Oct.

SAKAGUCHI, T., MATSUMOTO, K. (1983). Development of a knowledge based system for power system restoration. *IEEE Trans. on PAS*, v.102, n.2, p.320-328, Feb.

TER-GAZARIAN, A. G., KAGAN, N. (1992). Design model for electrical distribution systems considering renewable, conventional and energy storage units. *IEE Proceedings-C*, v.139, n.6, p.499-504, Nov.

WANG, J. C., CHIANG, H., DARLING G. R. (1996). An efficient algorithm for real-time network reconfiguration in large scale unbalanced distribution system. *IEEE Trans. on Power Systems*, v.11, n.1, p.511-517, Feb.

YEH, E.,-C., VENKATA, S., S., SUMIC, Z. (1996). Improved Distribution System Planning Using Computation Evolution. *IEEE Trans. on Power Systems*, v.11, n.2, p.668-674, May.

3 TRABALHOS APRESENTADOS E PUBLICADOS EM ANAIS

DELBEM, A. C. B., BRETAS, N. G., CARVALHO, A. C. P. L. F. (1996). Restabelecimento de energia ótimo em sistemas de distribuição utilizando algoritmos genéticos. In: III SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES NEURAIAS, Recife, 1996. *Anais*. p.75-82.

DELBEM, A. C. B., BRETAS, N. G., CARVALHO, A. C. P. L. F. (1997a). Optimal energy restoration in distribution systems using genetic algorithms. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTATIONAL INTELLIGENCE AND MULTIMEDIA APPLICATIONS (ICCIMA'97), Gold Coast, 1997. *Anais*. p.150-154.

DELBEM, A. C. B., BRETAS, N. G., CARVALHO, A. C. P. L. F. (1997b). *Restabelecimento de energia ótimo em sistemas de distribuição utilizando algoritmos genéticos*. Aceito no: XIV SNTPEE SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 26-30 de Outubro, Belém-PA, 1997.

DELBEM, A. C. B., BRETAS, N. G., CARVALHO, A. C. P. L. F. (1997c). *Energy restoration in distribution systems using search with fuzzy heuristics*. Accepted in: The 29th North American Power Symposium (IEEE Sponsored), October 13-14, Laramie, Wyoming, 1997.

4 RELATÓRIOS TÉCNICOS

DELBEM, A. C. B., BRETAS, N. G., CARVALHO, A. C. P. L. F. (1996). *Restabelecimento de energia ótimo em sistemas de distribuição: uma comparação entre o desempenho da busca com heurística "fuzzy" e algoritmos genéticos*. São Carlos. /Relatórios Técnicos - ICMSC - USP/ (n.48, nov.).

5 BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

BALAKRISHNAN, R., PAHWA, A. (1990). A computer assisted intelligent storm outage evaluator for power distribution systems. *IEEE Trans. on Power Delivery*, v.5, n.3, p.1591-1597, July.

DEO, M. (1974). *Graph theory with applications to engineering and computer science*. Englewood Cliffs, Prentice-Hall.

KLIR, G. J., FOLGER, T. A. (1988). *Fuzzy systems, uncertainty, and information*. New York, Prentice-Hall.

LANGSAM, Y., AUGENSTEIN, M. J., TENENBAUM, A. M. (1996). *Date structures using C and C++*. New York, Prentice-Hall.

MITCHELL, M. (1996). *An introduction to genetic algorithms*. Cambridge, MIT Press.

ROLDAN, M. C. S. C., BETANZOS, A. A., RODRIGUEZ, J. E. A. (1997). Developing an electrical distribution monitoring system. *IEEE Computer Applications in Power*, p.36-41, Jan.

SU, C. Y., STEPANENKO, Y. (1994). Adaptive control of a class of nonlinear systems with fuzzy logic. *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, v.2, n.4, p.285-294, Nov.

YAGER, R. R., FILEV, D. P. (1994). *Essentials of fuzzy modeling and control*. USA, John Wiley & Sons.

WANG, L. X. (1993). Stable adaptive fuzzy control nonlinear systems. *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, v.1, n.2, p.146-155, May.