

NELSON KAGAN

Engenheiro Eletricista, EPUSP, 1982

Mestre em Engenharia, EPUSP, 1988

Ph.D, University of London, 1993

**CONFIGURAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO ATRAVÉS DE
ALGORITMOS GENÉTICOS E TOMADA DE DECISÃO *FUZZY***

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Professor Livre Docente.

Área de Concentração:
Engenharia Elétrica

São Paulo

1999

NELSON KAGAN

Engenheiro Eletricista, EPUSP, 1982

Mestre em Engenharia, EPUSP, 1988

Ph.D, University of London, 1993

**CONFIGURAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO ATRAVÉS DE
ALGORITMOS GENÉTICOS E TOMADA DE DECISÃO *FUZZY***

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Professor Livre Docente junto
ao Departamento de Engenharia de
Energia e Automação Elétricas.

Universidade de São Paulo
Escola Politécnica

1999

*para Su,
só por
ser Su*

Agradecimentos

O autor deseja agradecer aos colegas do Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da EPUSP e, em particular, aos companheiros do Grupo de Estudos em Distribuição de Energia Elétrica, por terem, direta ou indiretamente, colaborado com a realização deste trabalho.

Deseja aproveitar este momento para agradecer ao Professor Carlos César Barioni de Oliveira, pelas inúmeras discussões realizadas ao longo do desenvolvimento do modelo para tratamento de problemas de configuração de redes por Algoritmos Genéticos.

Ao Professor Ernesto João Robba, amigo de todos os momentos, que não poupou esforços para suprir os dados necessários às simulações, de modo a possibilitar avaliação do modelo em problemas utilizando redes de distribuição com dimensões reais.

O autor deseja expressar sua satisfação pelo apoio obtido da FINEP, sob o projeto SAGE de redes cooperativas de pesquisa (RECOPE), o qual incorpora a área de pesquisa realizada neste trabalho.

Finalmente, gostaria de agradecer aos seus familiares, pelas inúmeras horas que esteve ausente durante o desenvolvimento deste trabalho, o qual espera-se seja semente para muitas pesquisas futuras.

CONFIGURAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO ATRAVÉS DE ALGORITMOS GENÉTICOS E TOMADA DE DECISÃO FUZZY

ÍNDICE

Resumo	iv
Abstract	v
1. Introdução	1
1.1 Motivação do Trabalho	1
1.2 Objetivos	4
1.3 Organização do Documento	5
2. Problemas de Configuração de Redes de Distribuição	8
2.1 Introdução	8
2.2 Modelos baseados em Programação Matemática	12
2.2.1 Formulação com um único objetivo	12
2.2.2 Formulação com múltiplos objetivos	16
2.3 Modelos baseados em Busca Heurística	19
2.3.1 Considerações Iniciais	19
2.3.2 Estratégias Heurísticas	20
2.3.3 Métodos de Busca Heurística	22
2.4 Inclusão de Conjuntos Fuzzy	24
2.4.1 Considerações iniciais	24
2.4.2 Métodos de agregação fuzzy	25
2.4.3 Métodos com parâmetros fuzzy	30
2.4.4 Conjuntos fuzzy em métodos heurísticos	31
2.5 Discussão e Perspectivas	37

3. Bases de Algoritmos Genéticos	39
3.1 Considerações Gerais	39
3.2 Algoritmo Básico	41
3.2.1 Estabelecimento da população inicial	43
3.2.2 Avaliação da população – <i>the fitness function</i>	46
3.2.3 Reprodução da população	50
3.2.4 Cruzamento e mutação	53
3.3 Exemplos Ilustrativos	56
3.3.1 Considerações gerais.....	56
3.3.2 Exemplo 1 – minimização das perdas elétricas.....	57
3.3.3 Exemplo 2 – minimização de investimentos no planejamento	63
3.3.4 Comentários gerais	68
4. Configuração de Redes por Algoritmos Genéticos	70
4.1 Considerações Gerais	70
4.2 Levantamento Bibliográfico	73
4.2.1 Análise do trabalho 1	73
4.2.2 Análise do trabalho 2.....	75
4.2.3 Análise do trabalho 3.....	78
4.2.4 Outras referências	80
4.3 Modelagem Proposta ao Problema de Configuração de Redes.....	82
4.3.1 Considerações iniciais.....	82
4.3.2 Codificação e decodificação dos <i>strings</i>	83
4.3.2.1 Blocos de carga	83
4.3.2.2 Codificação dos <i>strings</i>	84
4.3.2.3 Famílias de blocos de carga	86
4.3.2.4 Decodificação de um <i>string</i>	87
4.3.3 Função de Avaliação e Restrições	96
4.3.3.1 Função objetivo	96
4.3.3.2 Restrições	98
4.4 Conjuntos Fuzzy.....	110
4.4.1 Considerações iniciais.....	110

4.4.2	Agregação <i>fuzzy</i> no AG para configuração de redes	111
4.4.3	Incertezas representas por números <i>fuzzy</i>	114
4.4.4	Verificação de restrições	116
4.5	Considerações Finais	118
5.	Aplicações da Modelagem	120
5.1	Considerações Gerais	120
5.2	Reconfiguração de Redes	121
5.2.1	Considerações iniciais.....	121
5.2.2	Reconfiguração para minimização de perdas	123
5.3	Modelagem Aplicada ao Planejamento de Sistemas de Distribuição.....	131
5.3.1	Considerações iniciais.....	131
5.3.2	Consideração de novos trechos de rede e chaves de manobra.....	133
5.3.3	Consideração de novos alimentadores em subestações existentes	134
5.3.4	Consideração de novas subestações.....	136
5.3.5	Ampliação de subestações existentes	137
5.3.6	Recondutoramento de trechos de rede	138
5.3.7	Aspectos adicionais para o problema de planejamento	133
5.4	Casos Teste do Modelo de Planejamento por AG	141
5.4.1	Caso Teste 1	141
5.4.2	Caso Teste 2	141
5.4.3	Caso Teste 3	149
5.5	Discussão	155
6.	Conclusões.....	157
6.1	Conclusões Gerais.....	157
6.2	Principais Contribuições do Trabalho.....	163
6.3	Tópicos para Ulterior Desenvolvimento.....	166
	Referências Bibliográficas	168
	Anexo.....	177

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo apresentar uma nova modelagem para o tratamento de problemas de configuração de redes de distribuição de energia elétrica. Dentro desta classe de problemas, destacam-se aplicações à reconfiguração de redes e ao planejamento de sistemas de distribuição.

A modelagem é baseada em algoritmos genéticos, possibilitando o tratamento de redes de distribuição com dimensões reais. Aproximação nas funções objetivo ou desconsideração de determinadas restrições do problema não são necessárias.

A proposta desenvolvida nesta tese parte de modelos que utilizam técnicas de programação matemática e busca heurística. Os aspectos de tratamento de múltiplos objetivos e incertezas, representados nestes modelos - conforme desenvolvimentos apresentados em trabalhos anteriores do autor - são incorporados à modelagem por algoritmos genéticos.

Algoritmos genéticos são descritos em sua forma básica, com exemplos ilustrativos em configuração de redes, que mostram o potencial de sua aplicação. Propõe-se então um procedimento de codificação dos indivíduos da população dos algoritmos genéticos que, quando decodificados, resultam em alternativas de configuração viáveis sob o aspecto de topologia. Assim, esse procedimento inédito permite que sejam analisadas tão somente configurações radiais e conexas, o que torna o modelo extremamente eficiente. Contribuições relativas à incorporação das funções objetivo e das restrições do problema na modelagem são desenvolvidas em detalhe.

As configurações possíveis geradas durante o procedimento do algoritmo genético são avaliadas através de técnicas de análise de redes que incorporam as incertezas de dados dos problemas através de representação por conjuntos *fuzzy*. O modelo possibilita também a consideração dos aspectos subjetivos de tomada de decisão associados aos múltiplos objetivos e restrições do problema, através de procedimento de agregação *fuzzy*.

A aplicação em sistemas de distribuição de dimensões reais permite avaliar a potencialidade desta nova modelagem aplicada à configuração de redes de distribuição.

ABSTRACT

This thesis aims at presenting a new model to deal with configuration problems in electric power distribution systems. The proposed framework can be directly applied to modelling network reconfiguration and distribution system planning.

The model is based on genetic algorithms, what makes studying distribution networks of real size possible. No approximation to or limitation on the modelling of objective functions and problem constraints have to be enforced.

The methodology is gradually developed throughout the thesis. It derives from existing models based on mathematical programming and heuristic search techniques. This work shows that multiobjective and uncertainty aspects - represented in previous models developed by the author - can be incorporated into the novel approach based on genetic algorithms.

Basic genetic algorithms are described along with illustrative examples showing the potential of applying such technique to network configuration problems. The main contribution of this work concerns the codification (and decodification) of individuals in the genetic algorithm population. The decodification procedure ensures feasible configuration alternatives as topology regards. Such novel approach is extremely efficient since the evaluation process deals with radial and connected network configurations only. Contributions regarding the modelling of objective functions and problem constraints within the genetic algorithm framework are also developed in detail.

The alternative configurations generated as the genetic algorithm evolves are evaluated by a fuzzy load flow which considers uncertainty in demand values, represented by fuzzy numbers. The model also considers subjective aspects in the decision making process related to multiple objectives and problem constraints, by fuzzy aggregation of the corresponding membership functions.

A computational model is applied to distribution systems of real size, showing all benefits regarding the application of the proposed novel methodology to network configuration problems.

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação do Trabalho

O problema de planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica é objeto de estudo de muitos pesquisadores, durante as três últimas décadas. As pesquisas nesta área têm tentado vencer duas barreiras, na verdade bastante relacionadas, conforme descrito a seguir.

A primeira linha de pesquisa concentra-se na tentativa de modelagem de todos os aspectos do problema de planejamento dos sistemas de distribuição. A partir da década de 60, os modelos nitidamente acompanharam os desenvolvimentos das áreas de pesquisa operacional e programação matemática, o que permitiu a gradual implementação de novas características do problema. Tais características dizem respeito a aspectos como:

- Otimização conjunta de subestações e alimentadores, que nos primeiros modelos eram tratadas de forma independente. É clara a inter-relação muito forte destes dois subproblemas, que levaram ao seu tratamento de forma conjunta. Nestes problemas, deseja-se saber quando, onde e com qual capacidade (“quanto”) serão instalados os novos reforços em subestações: novas ou ampliações de existentes; e os novos reforços na rede elétrica: novos alimentadores, trechos de rede e chaves de manobra e recondutoramento de trechos existentes.
- Consideração de custos variáveis e custos fixos: as primeiras formulações do problema, através de programação linear (PL), não permitiam a otimização dos custos fixos, que possibilitam a representação correta dos custos de investimentos em reforços no sistema. Com a formulação por programação linear inteira mista (PLIM), foi possível representar tantos os custos fixos

como os custos variáveis, desde que estes últimos fossem representados através de funções lineares das variáveis do problema (no caso das perdas elétricas em componentes série da rede, deve-se proceder à linearização da função quadrática de perdas com o fluxo de potência passante).

- Consideração de restrições relativas a critérios técnicos. Os modelos iniciais representavam basicamente a 1ª Lei de Kirchhoff, ou seja, atendimento da condição de balanço de demanda, sendo possível a incorporação da restrição de limites máximos de carregamento dos componentes da rede. Posteriormente, foram incorporadas restrições que permitiam a representação da 2ª Lei de Kirchhoff e a conseqüente limitação imposta sobre os níveis de tensão no sistema. Também o aspecto de radialidade do sistema pode ser considerado como uma restrição de operação das redes de distribuição e deve, sempre que possível, ser incorporada às formulações.
- Abordagem dinâmica do problema de planejamento, considerando o período de planejamento subdividido em múltiplos estágios, o que permite a determinação dos instantes de instalação dos reforços no sistema. O principal problema desta abordagem em formulações PLIM é o aumento do número de variáveis, proporcional ao número de estágios. Para consideração do aspecto de tempo, foi proposta abordagem pseudo-dinâmica [1] do problema, na qual analisa-se seqüências de problemas de otimização com um único estágio.

Mais recentemente, vários trabalhos trataram da consideração de múltiplos objetivos e incertezas nos modelos, através de extensões das técnicas de otimização convencionais, tais como, tomada de decisão com múltiplos objetivos [3, 4], programação matemática probabilística [5] e programação matemática *fuzzy* [3, 38].

Desta forma, a modelagem do problema de planejamento por formulação PLIM mostrou-se bastante completa, permitindo a consideração de inúmeros aspectos relevantes. No entanto, apesar do desenvolvimento das técnicas de solução destas formulações (método SIMPLEX e suas variantes com método branch-and-bound, métodos de otimização por ponto interior, etc.), estas não conseguiram acompanhar as dificuldades inerentes da característica de explosão combinatória do problema, face ao elevado número de variáveis, principalmente das variáveis de decisão (variáveis inteiras).

Assim sendo, uma segunda linha de pesquisa, que na verdade complementa a anterior, consistiu em viabilizar a modelagem do problema de planejamento para sistemas de dimensão real.

Para permitir o tratamento de redes de grande porte, algoritmos de transporte foram aplicados com sucesso em diversos modelos [6, 8, 19, 25]. O principal problema é a limitação imposta na formulação, que deve ser adequada para a formulação específica do algoritmo de transporte. Aspectos como restrições nos níveis de tensão e radialidade da rede devem então ser analisados após o processo de otimização ser realizado; também, a abordagem pseudo-dinâmica deve ser utilizada para consideração do aspecto temporal do planejamento.

Uma outra tentativa, proposta pelo autor [4, 10], utiliza técnicas de decomposição que subdivide a formulação PLIM do problema em subproblemas de PL para cada estágio e um problema de programação inteira (PI) pura com todas as variáveis inteiras. Esta proposição, apesar de interessante, por tratar do aspecto de múltiplos estágios em problemas de planejamento, ou seja, por constituir abordagem dinâmica, não permite a simulação de redes reais.

Uma outra tentativa de cobrir algumas deficiências da modelagem por formulação PLIM aborda o problema de planejamento por técnica de busca heurística [11]. Através desta técnica, permite-se a modelagem de todos os aspectos do problema, sem necessidade de aproximações nos objetivos ou limitação nas restrições. Porém, estes modelos impõem abordagem pseudo-dinâmica e são limitados a redes de porte médio, quando o número de variáveis de decisão deve ser restringido devido a explosão combinatória na busca dentro do espaço de soluções (árvore de busca).

Algoritmos evolucionários, em particular algoritmos genéticos (AGs), vem tendo grande aplicação em diversos problemas da engenharia, principalmente a partir da década de 80. Na área de sistemas elétricos de potência, muitas aplicações vem sendo desenvolvidas com sucesso, principalmente nestes últimos anos [12]. Para o problema de planejamento de sistemas de distribuição, alguns modelos foram propostos e mostraram grandes vantagens na utilização dos AGs, possibilitando a consideração de muitos aspectos do problema. No entanto, estes modelos apresentam algumas deficiências, que serão apontadas no corpo deste trabalho.

Em vista do panorama geral exposto, torna-se clara a necessidade de melhoria nos modelos desenvolvidos até o presente momento. O grande desafio está em ser proposto um modelo que represente todas as características importantes do problema, e que tenha eficiência sob o aspecto de esforço computacional, de modo que sistemas de distribuição reais possam ser estudados. Para

tanto, vislumbra-se a aplicação de AGs para o problema de configuração de redes que, conforme será detalhado no capítulo seguinte, constitui uma classe de problemas que engloba o planejamento de sistemas de distribuição. Assim, espera-se não só aprimorar os modelos desenvolvidos para configuração de redes por AGs, mas também incorporar desenvolvimentos de outros modelos apresentados pelo autor no passado [3], com destaque para o tratamento de múltiplos objetivos e incertezas.

1.2 Objetivos

As dificuldades existentes nos modelos de configuração de rede existentes, seja por não permitirem o tratamento de redes reais de grande dimensão, seja por não possibilitarem a representação de todos os aspectos do problema, deverão ser consideradas através do desenvolvimento de um modelo por AG. Assim, os objetivos desta tese são os seguintes:

- Descrição dos modelos de configuração de redes baseados em programação matemática e em busca heurística, com suas extensões para o tratamento de múltiplos objetivos e incertezas, desenvolvidos em trabalhos anteriores pelo autor. Este objetivo assume importância ainda maior pelo fato que muitos dos desenvolvimentos efetuados nestes modelos serão incorporados posteriormente no modelo por AG a ser apresentado ao longo do trabalho.
- Descrição do funcionamento de um algoritmo genético básico, descrevendo a sua terminologia, e o potencial de aplicação dos AGs em problemas de configuração de redes através de exemplos ilustrativos;
- Análise crítica dos modelos de configuração de redes desenvolvidos até o momento e proposta de uma nova modelagem para o tratamento de redes de distribuição de grande porte.
- Aplicação de técnicas de conjuntos *fuzzy* para o tratamento de múltiplos objetivos com seus aspectos subjetivos de tomada de decisão e para o tratamento de incertezas presentes nos problemas de configuração de redes.

- Aplicação da metodologia proposta em uma série de exemplos de aplicação em sistemas de distribuição de médio e grande porte, principalmente nos problemas de minimização de perdas através da reconfiguração da rede e nos problemas de planejamento a médio prazo.

1.3 Organização do Documento

O trabalho segue uma estrutura tal que os objetivos almejados sejam perseguidos seqüencialmente ao longo dos 6 capítulos que compõem esta tese.

No capítulo 2, define-se o problema de configuração de redes de distribuição, que representa uma classe de problemas a serem resolvidos pela nova modelagem a ser proposta neste trabalho. Neste capítulo, basicamente são descritos modelos desenvolvidos pelo autor em trabalhos anteriores, mas que assumem relevância especial neste documento por serem utilizados posteriormente, em capítulos posteriores, no modelo por AG. Desta forma, são inicialmente tratados os modelos baseados em programação matemática, com um único objetivo o qual, na seqüência, é estendido para o tratamento de múltiplos objetivos. São também descritos os modelos baseados em busca heurística, que permitem uma abordagem pseudo-dinâmica, com todas as características do problema. A apresentação deste modelo também é bastante importante para o desenvolvimento do novo modelo por AG, dado que existem muitas similaridades nos dois modelos, sendo que as diferenças básicas estão no processo de busca pela solução do problema. A maneira pela qual conjuntos *fuzzy* foram aplicados nos modelos por programação matemática e nos modelos por busca heurística para representação de incertezas e aspectos subjetivos de tomada de decisão é também apresentada neste capítulo. Também este tópico, amplamente considerado pelo autor em trabalhos anteriores, serve de base para a aplicação à modelagem por AG, a ser realizada nos capítulos 4 e 5.

No capítulo 3, são descritas as bases de AGs, necessárias para o entendimento do funcionamento do algoritmo básico, em sua forma canônica. Os exemplos ilustrativos, apresentados ao longo e no final do capítulo, são aplicados à problemas de configuração de redes de distribuição, que direcionam para desenvolvimento do modelo a ser proposto no capítulo 4. Deve-se destacar que, ao longo do trabalho, não existe preocupação em apresentar as inúmeras variantes do AG básico. Para não perder o foco principal deste trabalho, pesquisas do uso destas variantes, que podem melhorar ainda mais a eficiência do modelo, serão consideradas como tópicos para ulterior desenvolvimento.

O capítulo 4 tem por objetivo a descrição da nova modelagem por AGs para o problema de configuração de redes, quando são apresentadas as principais contribuições deste trabalho. A modelagem proposta parte de um levantamento dos principais trabalhos desenvolvidos por outros autores na aplicação de AGs em alguns problemas de configuração de redes, que foram analisados de forma crítica. A partir desta análise e dos conceitos topológicos de blocos de carga e de famílias de blocos de carga, propõe-se um método que permite com que somente soluções radiais, sem barras desconexas, sejam geradas durante o procedimento efetuado pelo algoritmo genético. Esta proposição torna o modelo extremamente eficiente, eliminando muitas das desvantagens existentes nos modelos analisados previamente. Tais configurações de rede são avaliadas a partir de um procedimento de análise de redes, que permite determinar o valor da(s) função(ões) objetivo e se as restrições do problema são atendidas. AGs implicitamente tratam da otimização de uma única função, sem restrições. Assim, o problema de configuração de redes, que é um problema de otimização com restrições, é transformado num outro sem restrições através de penalização da função objetivo, que será tanto mais severa quanto maior for a violação de restrições. Diversas formas de penalização da função objetivo são propostas neste capítulo. O problema assim apresentado não considera múltiplos objetivos ou as incertezas nos dados. Para tanto, são incorporados os conjuntos *fuzzy*, utilizando-se a agregação *fuzzy* de objetivos e restrições para a tomada de decisão, o tratamento de incertezas representadas por números *fuzzy*, e análise de violação de restrições por comparação de números *fuzzy*.

O capítulo 5 é reservado para aplicação da modelagem geral de configuração de redes por AGs para dois problemas. O primeiro é relativo a reconfiguração de redes, mais especificamente para a minimização de perdas através de alteração dos estados das chaves de manobra do sistema. Um caso teste mostra que a modelagem proposta no capítulo 4 aplica-se diretamente ao problema, e como a agregação *fuzzy* permite a consideração das restrições do problema e a possível consideração de múltiplos objetivos na formulação. Em seguida, considera-se a aplicação da modelagem proposta ao problema de planejamento de sistemas de distribuição. Para tanto, são feitas algumas considerações quanto aos diversos tipos de reforços a serem instalados no sistema, para depois mostrar que a modelagem proposta aplica-se de forma bastante eficiente, sem dificuldades maiores para acomodação ao problema específico de planejamento. Alguns casos teste ilustram a modelagem, mostrando a potencialidade do modelo na análise de todas as características do problema (análise de múltiplos objetivos, das restrições de tensão, carregamento, radialidade, etc.) para redes de pequeno, médio e grande porte.

O capítulo 6 corresponde ao fechamento do trabalho, apresentando as suas conclusões gerais, as suas principais contribuições e os tópicos para ulterior desenvolvimento, principalmente quanto a estudos de extensões da modelagem proposta, tornando-o mais eficiente sob o aspecto computacional e possibilitando uma série de outras aplicações em problemas correlatos na área de distribuição de energia elétrica e na área mais ampla de sistemas elétricos de potência.

Problemas de Configuração de Redes de Distribuição

2.1 Introdução

Este trabalho considera, genericamente, a modelagem de uma classe de problemas denominada configuração de redes de distribuição de energia elétrica. Nesta classe, podem ser incluídos principalmente os problemas de planejamento da operação e planejamento de médio prazo de sistemas de distribuição de energia elétrica.

No caso do planejamento da operação de sistemas de distribuição, podem ser considerados principalmente os problemas relacionados com a reconfiguração das redes.

Nesta categoria, um primeiro problema seria o de determinação do estado das chaves do sistema para otimizar objetivos bem definidos (por exemplo, minimização das perdas elétricas do sistema, otimização do perfil de tensão, balanceamento das cargas dos alimentadores, etc.). Este tipo de problema, em geral, pode contar com um processamento *off-line*, no qual são avaliadas as melhores configurações (ou uma única configuração) do sistema para atender o objetivo pré-definido; uma vez conhecida aquela configuração, procede-se à alteração do estado das chaves do sistema.

Um segundo problema nesta categoria, também bastante importante, relacionado à operação de sistemas de distribuição, é o de atendimento à contingências em blocos na rede. Uma vez que as redes de distribuição operam radialmente, quando ocorre um defeito em um dado bloco de carga¹, consumidores do alimentador são desenergizados por determinado tempo.

¹ Um bloco de carga é entendido, neste trabalho, como o conjunto de barras e trechos de rede limitado por chaves de seccionamento ou dispositivos de proteção.

Em particular, uma vez que o ponto de defeito é localizado pela equipe de manutenção e, posteriormente, isolado, os consumidores do bloco e os consumidores a sua jusante continuam desenergizados. Em algumas empresas, é prática atender os consumidores a jusante do bloco através de alimentadores vizinhos ou, quando possível, por chaves normalmente abertas do próprio alimentador. Para tanto, é necessária a verificação se a manobra leva à transgressão de critérios no(s) alimentador(es) que socorre(m) os blocos a jusante. Nestas condições de emergência, a minimização das perdas não é o objetivo mais importante; outros objetivos, como por exemplo o número de chaves manobradas, perfis de tensão e de carregamento, são em geral objetivos mais importantes a serem perseguidos. Neste tipo de problema, os processamentos podem ser realizados *on-line*, no instante de ocorrência do defeito, ou *off-line*, quando são simuladas as contingências em todos os blocos de cada alimentador de distribuição e são armazenadas as (melhores) manobras necessárias para atendimento de cada contingência específica.

O problema de planejamento de médio/curto prazo de sistemas de distribuição considera o crescimento da carga em horizontes que variam de 1 a 5 anos de duração. Neste tipo de problema, podem ser classificados os subproblemas de otimização de alimentadores primários e de subestações de distribuição. Apesar de serem tratados separadamente nos trabalhos iniciais nesta área [3], os modelos atuais consideram esses dois subproblemas conjuntamente, dado que existe forte inter-relação entre as suas soluções. A idéia básica destes estudos é o de se obter um plano de expansão no qual o sistema atende continuamente a demanda e um conjunto de critérios técnicos, tais como limites de tensão e de capacidade dos equipamentos da rede. Também, devem ser considerados um ou mais objetivos a serem otimizados, de acordo com as políticas de expansão da empresa de distribuição. O problema de planejamento assim estabelecido consiste no estudo de uma região específica em intervalo de tempo (do ano inicial ao horizonte) também bem definido. Com o crescimento da demanda, o aumento dos fluxos de potência pode ocasionar sobrecargas em equipamentos do sistema, bem como violação dos limites de tensão. Tais conseqüências podem geralmente ser antecipadas através de um estudo de diagnóstico do sistema [6, 7, 8, 9], ou seja, a simulação de fluxo de potência da rede do ano inicial com a carga do ano horizonte. Desta forma, medidas corretivas devem ser propostas antecipadamente para serem implantadas antes da ocorrência de possíveis violações de critérios técnicos. Como resultado, obtém-se um plano de obras do sistema que corresponde aos investimentos em subestações, alimentadores e equipamentos correspondentes, para o período de estudo, garantindo que a demanda e seu crescimento, bem como os critérios técnicos sejam continuamente atendidos.

Para efeito destes estudos, considera-se, em geral, as cargas de consumidores de baixa tensão acumuladas no lado de alta tensão dos transformadores de distribuição. Centros de demanda então representam um grupo de consumidores de baixa tensão e podem também representar consumidores primários, que são supridos diretamente pela média tensão. Assume-se a realização de estudo prévio para avaliação das demandas diversificadas nos diversos centros de carga, isto é, são obtidas as contribuições em demanda de cada centro de carga para diferentes condições de carregamento (por exemplo, carga pesada, média e leve). Este estudo, que não será detalhado aqui, em geral baseia-se nos dados de faturamento de consumidores secundários e primários e em medições de potência em cada alimentador da rede [6]. Outros trabalhos determinam estes valores através de agregação de curvas de consumidores [13, 14]. Tais curvas são obtidas por análise de hábitos de consumo e tratamento estatístico de medições em consumidores típicos [13].

No caso do planejamento de sistemas de distribuição, sob horizonte de médio prazo, necessita-se ainda do estabelecimento do mercado global e do mercado espacial [15]. O mercado espacial, que é extremamente relevante para o planejamento, baseia-se em informações relativas ao uso do solo, uso final, etc., e tem por objetivo avaliar, para cada centro de carga, os valores de demanda diversificada para cada um dos anos (ou horizontes parciais) até o horizonte de estudo. Obviamente, a composição de todas as demandas diversificadas de centros de carga deve coincidir com a demanda da região, obtida a partir do mercado global. A partir do conhecimento das demandas, por centro de carga, para o horizonte de estudo, pode-se realizar um diagnóstico da rede e serem obtidas as áreas carentes de reforços. Deve-se então propor alternativas de reforços na rede para o atendimento do crescimento de carga. Esta proposição pode ser realizada diretamente pelo planejador em função de análises de restrições físicas, do sistema de transmissão e subtransmissão, e considerações políticas e ambientais. Alternativamente, tal proposição pode ser orientada por algoritmos que automatizam possíveis locais de comissionamento de reforços candidatos em função das áreas carentes [7, 9]. Dentre os tipos de reforços no sistema a serem propostos, podem ser citados:

- a instalação de novos alimentadores na rede;
- a instalação de novas subestações de distribuição ou novas unidades transformadoras em subestações existentes;
- recondutoramento de trechos de rede;
- a instalação de novos trechos de rede;

- a instalação de novas chaves de manobra.

Uma alternativa muito vantajosa, a ser utilizada no planejamento, é a otimização da operação da rede, através da mudança de topologia dos alimentadores, pela abertura de chaves NF e fechamento de chaves NA. Obviamente, este último tipo de operação viabiliza a determinação do carregamento dos alimentadores em sua configuração final e as áreas de influência de subestações (novas ou existentes) no sistema.

A combinação de todas as possibilidades de reforços, no tempo e no espaço, leva a um número extremamente alto de possíveis planos de obras [3, 11]. Supondo-se que todos esses possíveis planos pudessem ser explicitamente conhecidos, e ainda descartados aqueles que não atendem aos critérios técnicos, restaria ainda o problema de ser avaliado o melhor plano de obra. Uma maneira de resolver tal problema seria a fixação de uma função objetivo, por exemplo o custos de investimento e de operação da rede, e a escolha da alternativa que otimize tal função. Outras possibilidades são exploradas em [3], quando considera-se o problema de planejamento como o de tomada de decisão com múltiplos objetivos

Nota-se, do exposto acima, que os problemas de reconfiguração de rede (p.ex. minimização de perdas elétricas na rede e atendimento a contingências) podem ser considerados como caso particular do problema de planejamento e, no contexto deste trabalho, são tratados genericamente como problemas de configuração de redes.

Quando do estudo de redes reais, torna-se impraticável a enumeração explícita do número total de planos de obras possíveis, em função do elevado número de chaves de manobra, nos problemas de reconfiguração e de planejamento, e do número de reforços propostos, para o problema de planejamento.

Para os problemas de planejamento, podem ser classificados os subproblemas relativos a (i) instante de instalação do reforço, (ii) localização do reforço e (iii) dimensionamento do reforço. Obviamente, mudanças do estado de chaves de manobra podem ser entendidas como parte do subproblema (ii). Desta maneira resolvem-se, simultaneamente, os subproblemas de otimização de subestações (*quando, onde e com qual capacidade* novas unidades devem ser instaladas e a área de influência de SEs novas e existentes) e o de otimização de alimentadores (estabelecendo o carregamento de cada alimentador, a sua topologia e condutores utilizados, ano a ano). O período de

planejamento é normalmente dividido em horizontes parciais, ou estágios, que geralmente correspondem a um ano de duração. É prática normal assumir a demanda constante em cada estágio. O planejamento é um problema intrínseco de múltiplos estágios, dado que a expansão do sistema de distribuição é função do tempo (mesmo que discretizado). Formulações que consideram a variável tempo no processo de otimização aumentam fortemente a dimensão do problema e, conseqüentemente, o esforço computacional para resolução. Em geral, nos problemas de planejamento, considera-se então uma abordagem pseudo-dinâmica, que trata o problema de planejamento como uma seqüência de formulações com um único estágio [1, 3, 16].

Quando problemas desta natureza foram estudados no final dos anos 60, a rápida evolução de equipamentos computacionais estimulou o desenvolvimento de muitos métodos de solução. Concomitantemente com a habilidade de computadores para realizar cálculos repetitivos, muitos métodos e algoritmos foram desenvolvidos nas áreas de pesquisa operacional e programação matemática. Uma visão destes modelos, específica para tratamento do problema de planejamento de redes de distribuição, é considerada no item 2.2 deste trabalho. No item 2.3 são considerados métodos baseados em técnicas de busca heurística [11]. Os métodos apresentados neste capítulo servem de base para um novo modelo para a configuração de redes, que será detalhado nos capítulos posteriores.

2.2 Modelos baseados em Programação Matemática

Neste item apresenta-se a formulação por programação matemática para o tratamento do problema de planejamento de sistemas de distribuição. Ela é considerada inicialmente como um problema de otimização com um único objetivo e, depois, estendida para a consideração de múltiplos objetivos.

2.2.1 Formulação com um Único Objetivo

Os símbolos utilizados na formulação são apresentados a seguir:

$X_{ij,t}$	fluxo de potência do nó i para o nó j , estágio t .
$D_{j,t}$	demanda máxima diversificada no nó j , estágio t .
$A_{o,i,t}, A_{i,t}$	carregamento na subestação existente e na subestação nova, respectivamente, no nó i , estágio t .
M_{ij}	capacidade máxima do trecho $i-j$.

MS_i	capacidade máxima da subestação i ou da unidade transformadora na subestação i .
$\Delta V_{i,t}$	queda de tensão da subestação ao nó i , estágio t .
Z_{ij}	impedância equivalente entre os nós i e j , avaliada por $R_{ij} \cos \varphi + X_{ij} \sin \varphi$, onde R_{ij} e X_{ij} são, respectivamente, a resistência e reatância entre os nós i e j e φ é o ângulo de defasagem entre tensão e corrente, assumido igual para todas as cargas.
ΔV_{mx}	queda de tensão máxima da subestação a qualquer nó da rede.
$\delta_{ij,t}$	variável de decisão para instalação (=1) ou não (=0) de um reforço candidato entre os nós i e j , estágio t .
$\delta s_{i,t}$	variável de decisão para ampliação ou construção de subestação nova i , estágio t .
C_{ij}, C_i	custos fixos de novo alimentador, trecho $i-j$, e de unidade transformadora na subestação i , respectivamente.
C'_{ij}, C'_i	custos variáveis no trecho $i-j$ e na subestação i , respectivamente.
n_d, n	número de nós de centros de carga e número total de nós, respectivamente.
n_{fex}, n_{sex}	número de trechos existentes e de subestações existentes, respectivamente.
h	número total de estágios.
Ω_i	conjunto de nós conectados ou a serem conectados ao nó i .
$\Omega_{fe}, \Omega_{fn}, \Omega_f$	conjunto de trechos existentes, trechos candidatos e todos os trechos do sistema, respectivamente.
$\Omega_{se}, \Omega_{sn}, \Omega_s$	conjunto de subestações existentes, subestações candidatas e todas subestações do sistema, respectivamente.
k_t	valor de atualização do capital, estágio t .
λ_{ij}, λ_i	taxas de falha do trecho $i-j$ e da subestação i , respectivamente.
τ_{ij}, τ_i	tempos de restabelecimento do trecho $i-j$ e da subestação i , respectivamente. Estes tempos incluem o tempo de decisão, tempo de reparo, tempo médio de viagem e tempo médio de manobra do componente.
k_m	relação entre a demanda média e a demanda diversificada.

O problema de planejamento de sistemas de distribuição, para otimização de um único objetivo, é detalhado em várias publicações [1, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25]. Em [3], desenvolve-se um modelo com formulação por programação linear inteira mista (PLIM). Neste, uma função objetivo econômica, incluindo os custos fixos (instalação de componentes) e variáveis (perdas na rede) é considerada. Além disso, um conjunto de restrições é representado, englobando: (a) restrições de balanço de demanda – 1ª Lei de Kirchhoff; (b) limites de capacidade de subestações e trechos de rede existentes e candidatos; (c) restrições para o cálculo de queda de tensão – 2ª Lei de Kirchhoff; (d) limites de tensão nas barras da rede; (e) restrições de radialidade da rede e (f) restrições lógicas, que envolvem basicamente as variáveis binárias de decisão. Devido a formulação ser do tipo PLIM, o custo de perdas é linearizado. No caso da formulação (2.1) a seguir, considera-se que o custo de perdas é proporcional ao fluxo de potência; no entanto é possível aprimorar esse

modelo por linearização por partes (*piecewise linearisation*), conforme apresentado em [18, 1], porém aumentando o número de variáveis da formulação. O número máximo de trechos de rede entre dois nós quaisquer é limitado a unidade, o que é bastante comum em redes de distribuição aéreas radiais. Algumas restrições do modelo são opcionais, principalmente as relativas aos níveis de tensão e seus limites e às restrições de radialidade da rede, de modo a acelerar o tempo de processamento, bem como permitir a utilização de algoritmos de otimização específicos, como os algoritmos de transporte, que permitem aceleração ainda maior dos tempos de processamento. O problema de planejamento, com minimização de custos fixos e variáveis, pode então ser formulado como se segue:

$$\min \sum_{t=1}^h k_t \left[\sum_{ij \in \Omega_{fn}} \delta_{ij,t} C_{ij} + \sum_{i \in \Omega_{sn}} \delta_{s_{i,t}} C_i + \sum_{ij \in \Omega_f} (X_{ij,t} + X_{ji,t}) C'_{ij} + \sum_{i \in \Omega_s} (A_{o,i,t} + A_{i,t}) C'_i \right] \quad (2.1)$$

sujeito a:

$$\sum_{j \in \Omega_i} (X_{ji,t} - X_{ij,t}) - D_{i,t} + A_{o,i,t} + A_{i,t} = 0 \quad i = 1, \dots, n \quad (a)$$

$$X_{ij,t} + X_{ji,t} \leq M_{ij} \quad ij \in \Omega_{fe} \quad (b.1)$$

$$X_{ij,t} + X_{ji,t} \leq M_{ij} \sum_{\tau=1}^t \delta_{ij,\tau} \quad ij \in \Omega_{fn} \quad (b.2)$$

$$A_{o,i,t} \leq M s_i \quad i \in \Omega_{se} \quad (b.3)$$

$$A_{i,t} \leq M s_i \sum_{\tau=1}^t \delta_{s_{ij},\tau} \quad i \in \Omega_{sn} \quad (b.4)$$

$$\Delta V_{i,t} - \Delta V_{j,t} + Z_{ij} (X_{ij,t} - X_{ji,t}) = 0 \quad ij \in \Omega_{fe} \quad (c.1)$$

$$\Delta V_{i,t} - \Delta V_{j,t} + Z_{ij} (X_{ij,t} - X_{ji,t}) \leq \left[1 - \sum_{\tau=1}^t \delta_{ij,\tau} \right] M \quad ij \in \Omega_{fn} \quad (c.2)$$

$$\Delta V_{i,t} - \Delta V_{j,t} + Z_{ij} (X_{ij,t} - X_{ji,t}) \geq \left[\sum_{\tau=1}^t (\delta_{ij,\tau}) - 1 \right] M \quad ij \in \Omega_{fn} \quad (c.3)$$

$$\Delta V_{i,t} \leq \Delta V_{mx} \quad i = 1, \dots, n_d \quad (d.1)$$

$$\Delta V_{i,t} \leq \left[1 - \sum_{\tau=1}^t \delta_{s_{i,\tau}} \right] \Delta V_{mx} \quad i \in \Omega_{sn} \quad (d.2)$$

$$n_{fex} + \left[\sum_{\tau=1}^t \sum_{ij \in \Omega_{fn}} \delta_{ij,\tau} \right] \leq n - n_{sex} - \left[\sum_{\tau=1}^t \sum_{i \in \Omega_{sn}} \delta_{s_{ij},\tau} \right] \quad (e)^2$$

$$\sum_{t=1}^h \delta_{ij,t} \leq 1 \quad ij \in \Omega_{fn} \quad (f.1)$$

$$\sum_{t=1}^h \delta_{s_{i,t}} \leq 1 \quad i \in \Omega_{sn} \quad (f.2)$$

A variável M , nas restrições c.2 e c.3, é escolhida como um número positivo suficientemente grande e as restrições **a**, **b**, **c**, **d** & **e** são aplicadas para todos os estágios. A formulação acima pode também ser representada matricialmente através da formulação 2.2:

$$\begin{aligned} \min z(\mathbf{x}, \mathbf{y}) &= \mathbf{c}_1 \mathbf{x} + \mathbf{c}_2 \mathbf{y} \\ s.a. \quad \mathbf{A}_1 \mathbf{x} + \mathbf{A}_2 \mathbf{y} &\leq \mathbf{b} \\ \mathbf{A}_3 \mathbf{y} &\leq \mathbf{d} \end{aligned} \quad (2.2)$$

onde:

$z(\mathbf{x}, \mathbf{y})$: função custo;

x: vetor de variáveis contínuas (ou reais positivas): fluxos de potência em trechos de rede e subestações e quedas de tensão nas barras do sistema;

y: vetor de variáveis binárias: variáveis de decisão para a possível instalação de trechos de rede e subestações;

c₁, **c**₂: vetores dos coeficientes das funções objetivo, relativos respectivamente às variáveis contínuas e binárias;

A₁, **A**₂, **A**₃: matrizes relativas aos coeficientes dos primeiros membros de cada restrição;

b, **d**: vetores relativos aos coeficientes dos segundos membros de cada restrição.

As formulações 2.1 e 2.2 praticamente incorporam todas as opções possíveis de modelagem com PLIM. Diferentes algoritmos podem ser utilizados para a solução desta formulação. No entanto, dada a dimensão dos sistemas de distribuição reais, torna-se necessária a utilização de algoritmos rápidos e eficientes para sua solução. Em particular, algoritmos de transporte são relativamente eficientes no aspecto computacional; porém, apresentam limitações quanto à modelagem: podem

² A restrição (e) é uma condição necessária para radialidade da rede. Em geral, esta não é considerada [6, 7], devendo a solução ótima sofrer um processo de radialização posterior ao processo de otimização.

ser representadas tão somente as restrições relativas à 1ª Lei de Kirchhoff e capacidade máxima dos componentes da rede, sendo necessária a adoção do modelo pseudo-dinâmico. Referências [3, 6, 19, 25] apresentam modelos baseados em algoritmos de transporte.

2.2.2 Formulação com Múltiplos Objetivos

A formulação do problema de planejamento pode ser expandida para uma formulação de programação matemática com múltiplos objetivos [3, 4]. Confiabilidade, efeitos ambientais, sociais, políticos e financeiros podem ser então representados simultaneamente no modelo de planejamento. Cada objetivo é representado pela otimização de um atributo específico, refletindo o aspecto novo a ser considerado. Alguns objetivos que podem ser considerados dentro da estrutura de PLIM são apresentados a seguir.

Um objetivo relativo à confiabilidade pode ser modelado, tomando-se como hipótese que a rede é radial e que são disponíveis chaves em todos os trechos da rede [2]. Uma função pode então representar algum índice global de confiabilidade, como por exemplo a energia não distribuída total no sistema. Esta função (ENS_t), para cada estágio t , é dada por:

$$\sum_{ij \in \Omega_f} (X_{ij,t} + X_{ji,t}) \lambda_{ij} \tau_{ij} k_m + \sum_{i \in \Omega_s} (A_{o,i,t} + A_{i,t}) \lambda_i \tau_i k_m \quad (2.3)$$

Um objetivo relativo a aspectos visuais é particularmente relevante quando o sistema é constituído por linhas aéreas e subterrâneas, ou quando linhas aéreas não são desejáveis em determinadas áreas da região de estudo. O atributo “comprimento total de linhas aéreas em áreas discriminadas” pode ser dado por uma expressão do tipo (2.4), onde l_{ij} representa o comprimento do trecho ij :

$$\sum_{t=1}^h \sum_{ij \in \Omega_{fn}} l_{ij} \delta_{ij,t} \quad (2.4)$$

Objetivos que consideram situações práticas podem também ser considerados, de modo a melhorar o sistema projetado. Nesta categoria, podem ser considerados objetivos tais como minimização de

cruzamentos com ferrovias, rodovias e rios, cruzamentos com linhas de transmissão, etc.. Todos esses objetivos são relacionados linearmente com as variáveis binárias de decisão.

A formulação de programação linear inteira mista com p objetivos pode ser simplesmente escrita pela formulação 2.5:

$$\begin{aligned} \text{"min"} \mathbf{z}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = [z_1 \quad \dots \quad z_k \quad \dots \quad z_p]^t &= \mathbf{C}_1 \mathbf{x} + \mathbf{C}_2 \mathbf{y}^3 \\ \text{s.t. } \mathbf{A}_1 \mathbf{x} + \mathbf{A}_2 \mathbf{y} &\leq \mathbf{b} \\ \mathbf{A}_3 \mathbf{y} &\leq \mathbf{d} \end{aligned} \quad (2.5)$$

onde:

$\mathbf{z}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = [z_1 \quad \dots \quad z_k \quad \dots \quad z_p]^t$ - vetor de p funções objetivo.

$\mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2$ - matrizes de coeficientes de variáveis contínuas e binárias, respectivamente.

Em problemas de otimização com múltiplos objetivos, o tomador de decisão busca a solução de melhor compromisso, uma solução eficiente ou não-dominada que melhor atende às suas aspirações. Soluções não-dominadas são definidas a partir dos conjuntos de restrições e objetivos. Basicamente, uma solução não-dominada é tal que nenhuma outra solução viável apresenta o mesmo ou melhor desempenho com respeito a todos os objetivos, com pelo menos um objetivo melhor. A solução ideal é uma solução não necessariamente viável, no qual todos os objetivos seriam otimizados simultaneamente. A cada ponto no espaço de variáveis, pode-se mapear um ponto no espaço de objetivos, o que é muito interessante pois, em geral, o número de objetivos é muito menor que o número de variáveis do problema. As referências [3, 26] apresentam detalhamento destes conceitos.

Métodos para tratar problemas de otimização com múltiplos objetivos são em geral divididos em três categorias, em função de como o tomador de decisão articula sua estrutura de preferências. Assim, tem-se os métodos de articulação (i) a priori, (ii) a posteriori e (iii) progressivos ou iterativos.

Em métodos a priori, o tomador de decisão deve articular completamente as suas preferências previamente a ser obtida uma solução. A aplicação destes métodos não é muito simples, dado que é muito difícil serem estabelecidos os compromissos entre objetivos. No entanto são eficientes em termos de esforço computacional.

³ O termo "min" aqui utilizado refere-se à solução que melhor satisfaz os objetivos simultaneamente.

Métodos a posteriori são aqueles que mais requerem esforço computacional, pois têm por objetivo gerar todo (ou uma grande parte) o conjunto de soluções não-dominadas. Depois que este conjunto de soluções é gerado, o tomador de decisão seleciona a melhor solução de compromisso, expressando suas preferências. Com o intuito de ser gerado este conjunto, muitos métodos são conhecidos na literatura [26], tal como o método de ponderação e o método de restrição- ϵ . No método de ponderação, as funções objetivo devem ser compostas numa única função de ponderação, dada por (2.6):

$$\min[\lambda_1 z_1(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + \dots + \lambda_k z_k(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + \dots + \lambda_p z_p(\mathbf{x}, \mathbf{y})], \text{ com } \sum_{k=1}^p \lambda_k = 1 \quad (2.6)$$

A solução de 2.6 gera uma solução não dominada. Na realidade, se os pesos são fixados previamente, pode-se classificar tal método como a priori. Por outro lado, se todas as combinações de pesos fossem consideradas, o conjunto de soluções não-dominadas seria gerado. O método de restrição- ϵ gera soluções não-dominadas otimizando um dos objetivos, escolhido arbitrariamente, e limitando os demais objetivos. A formulação (2.7) corresponde a esse método:

$$\begin{aligned} & \min z_m(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \\ & \text{s.t. } (\mathbf{x}, \mathbf{y}) \in (\mathbf{X}, \mathbf{Y}) \\ & z_k(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \leq \epsilon_k \quad k = 1, \dots, p, \quad k \neq m \end{aligned} \quad (2.7)$$

A solução do problema com um único objetivo 2.7 resulta em uma solução não dominada, sempre que a solução for viável. Se os limites nos objetivos forem variados de maneira sistemática, é possível a obtenção do conjunto de soluções não-dominadas.

Em métodos iterativos, o tomador de decisão expressa sua estrutura de preferências enquanto o processo evolui. O procedimento é finalizado quando o tomador de decisão se diz satisfeito com uma das soluções obtidas. Muitos métodos podem ser considerados dentro desta categoria [26, 27]. Nos métodos derivados dos métodos de ponderação e da técnica de restrição- ϵ , soluções não-dominadas podem ser geradas iterativamente, pela variação de pesos e/ou de limites nos objetivos.

2.3 Modelos baseados em Busca Heurística

2.3.1 Considerações Iniciais

Nesse item, apresenta-se um outro enfoque para a solução do problema de configuração de redes, baseado em técnicas de busca heurística, representando uma alternativa às formulações do tipo PLIM apresentadas no item anterior. O esforço computacional, para redes de grande porte, pode cair desde que as heurísticas utilizadas sejam bem selecionadas de modo a limitar o tempo de busca. A idéia básica é que o planejador, neste caso, tenha acesso a diferentes heurísticas, que podem ser facilmente alteradas; esta modelagem difere completamente de modelos de otimização com heurísticas incorporadas (como é, por exemplo, o caso do enfoque pseudo-dinâmico que determina soluções otimizadas para o problema dinâmico), quando o planejador não pode alterá-las facilmente.

Métodos da área de Inteligência Artificial, hoje denominados sistemas inteligentes, especialmente os sistemas de produção, utilizam técnicas de busca heurística para determinar soluções de problemas genéricos. Ambientes de trabalho, denominados *shells*, têm sido desenvolvidos, incorporando mecanismos de inferência como utilizados nos sistemas especialistas. A principal vantagem de utilizar estes métodos é que a base de conhecimento (formada, em geral, por regras e operadores), a base de dados e o mecanismo de inferência são separados do processo, permitindo que diferentes enfoques e estratégias sejam adaptadas para cada problema específico. Referências [11, 28, 29, 30] apresentam uma *shell* que trata de problemas de decisão com restrições, mostrando que o enfoque é muito conveniente para o tratamento de problemas de configuração com múltiplos objetivos, em particular para a configuração de redes de distribuição.

Em enfoques heurísticos, é geralmente necessário que sejam avaliadas soluções parciais durante a busca. Nos problemas de configuração de redes, esta avaliação pode ser realizada através de um procedimento de análise de redes (fluxo de potência, avaliação de confiabilidade, etc.), que determina, dentre outros parâmetros, a energia não distribuída na rede, os níveis de tensão nas barras, correntes, fluxos de potência e perdas nos trechos. A partir da determinação destes parâmetros, as funções objetivo (por exemplo, minimização de custos fixos e variáveis, minimização da energia não distribuída, etc.) são avaliadas diretamente. A vantagem maior deste enfoque é que não são necessárias as aproximações dos modelos baseados em PLIM,

principalmente no cálculo das perdas e no cálculo dos índices de confiabilidade. Uma vez determinados os perfis de tensão e carregamento, é possível avaliar se a solução parcial é viável, isto é, se atende a demanda e as restrições técnicas. Além disso, os valores das funções objetivo podem fornecer informação extremamente relevante para a busca, indicando melhores direções a serem seguidas.

2.3.2 Estratégias Heurísticas

Diferentes estratégias heurísticas podem ser utilizadas para determinar uma solução para o problema de configuração de redes. Normalmente se utiliza uma das seguintes três alternativas: estratégia construtiva, estratégia destrutiva ou estratégia de troca de ramos [31]. Assume-se que tais estratégias são consideradas em conjunto com uma técnica de busca [32], que serão descritas mais detalhadamente no próximo item.

A técnica construtiva, aplicada ao problema de configuração de redes, assume que, inicialmente, todos os possíveis recursos (reforços candidatos ou chaves da rede) não estão utilizados. No caso das chaves, todas são inicializadas abertas, quer sejam chaves NA ou chaves NF. A figura 2.1a ilustra o estado inicial de uma rede hipotética. A estratégia então busca um recurso para ser utilizado (chave, alimentador, subestação, etc.). Somente chaves e trechos candidatos com uma das barras terminais conectada à rede e a outra ainda não conectada são considerados em cada passo. Esta condição assegura que somente configurações radiais são geradas durante o procedimento de busca. As novas subestações candidatas são sempre consideradas, obviamente desde que ainda não tenham sido utilizadas. Um programa de análise de redes determina os perfis de carregamento e tensão na parte da rede já conectada. Se alguma violação é identificada, a solução parcial é descartada (qualquer adição de trechos ou chaves radiais levaria a piora dos índices técnicos) e o procedimento passa por um retrocesso (*backtrack*) para continuar a busca. Quando uma solução completa e viável é identificada, os valores da função objetivo e das variáveis de decisão são armazenados. Com o objetivo de serem pesquisadas soluções com melhor desempenho, a operação de retrocesso permite a continuação do processo de busca. Soluções parciais ou completas com piores índices de desempenho são cortadas, de modo que somente soluções melhores, de acordo com a estrutura de preferências do tomador de decisão, sejam geradas. Este processo pode ser repetido até que a árvore de possíveis soluções seja completamente (explícita ou implicitamente) investigada. A figura 2.1.b mostra como os recursos são sequencialmente inseridos no sistema para formar uma primeira solução viável, assumindo que nenhuma operação de retrocesso tenha sido

necessária. Obviamente, a escolha de qual recurso deve ser inserido em cada passo determina o desempenho de cada estratégia. Por esta razão, é conveniente considerar, para cada passo, uma ordenação dinâmica dos recursos de tal modo que a solução do problema seja direcionada para a solução de melhor compromisso.

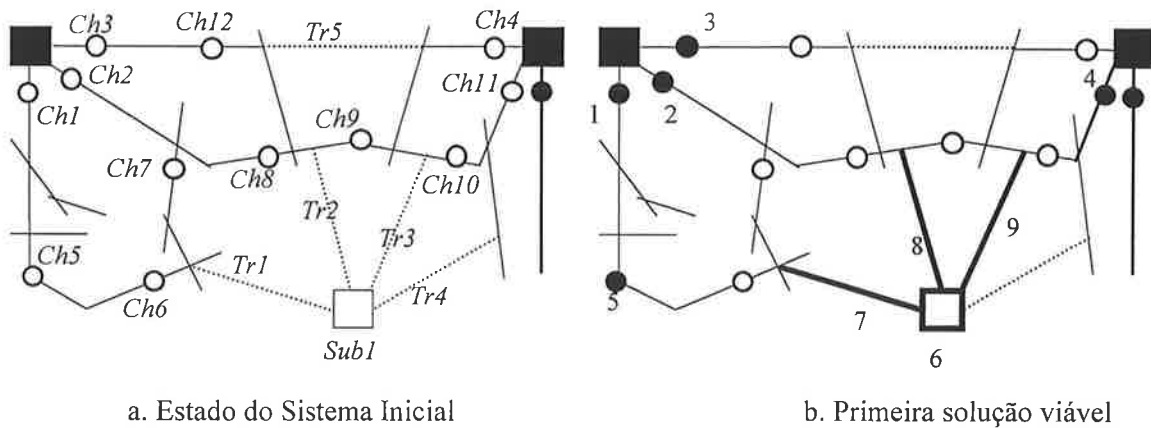


Fig. 2.1. Estratégia Construtiva

A estratégia destrutiva aplicada ao problema de configuração de redes pode ser considerada como a estratégia dual da construtiva. Seu estado inicial corresponde a todos os recursos sendo utilizados, formando uma rede em malha, na qual todas as chaves são fechadas e todos os trechos de rede e subestações candidatas estão conectados ao sistema. Deste estado inicial, um recurso é escolhido para ser removido (no caso de uma chave, esta é aberta). Para cada operação de remoção de um recurso, uma análise topológica da rede é realizada para verificar se esta está operando em malha, radialmente ou se contém barras isoladas. Se uma rede em malha é identificada, o procedimento continua, isto é, novos recursos são removidos. Se barras isoladas são identificadas, o procedimento realiza uma operação de retrocesso, isto é, o último recurso removido é novamente inserido, e a busca na árvore continua. Quando uma solução radial é identificada, então um programa de fluxo de carga permite verificar a possível existência de transgressão de critérios técnicos. Se todas as restrições do problema são atendidas, uma nova solução completa e viável é encontrada e os resultados são armazenados. Quando uma restrição é transgredida, ou novas soluções são desejadas, realiza-se uma operação de retrocesso e o processo continua até que uma nova solução viável seja encontrada, ou quando a árvore tenha sido (implícita ou explicitamente) investigada. Para melhoria do desempenho, esta estratégia também necessita uma ordenação dinâmica dos recursos candidatos a serem removidos. A figura 2.2 ilustra esta estratégia, na qual a seqüência de remoção de recursos coincidentemente levou à mesma primeira solução viável da estratégia construtiva.

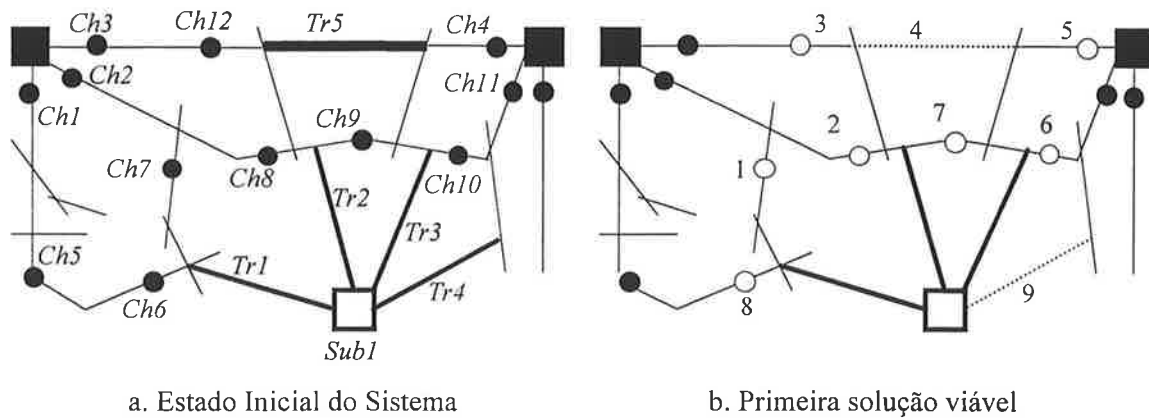


Fig. 2.2. Estratégia destrutiva

A estratégia de troca de ramos, aplicada ao problema de configuração de redes, considera somente soluções radiais e completas durante o procedimento de busca. Nesta estratégia, deve-se iniciar a partir de uma solução radial, na qual uma parte dos recursos é utilizada. O procedimento se desenvolve de um estado corrente para um estado vizinho, isto é, removendo-se um recurso usado e incluindo-se um recurso, para que uma nova solução radial seja gerada. Muitas estratégias derivadas podem ser consideradas e usadas para direcionar a busca pelos estados vizinhos no espaço de soluções; dentre as estratégias conhecidas podem ser citadas as estratégias do tipo TABU [31]. Durante a evolução do processo, configurações radiais são avaliadas por um fluxo de carga, que determina os parâmetros elétricos e os valores da função objetivo que orientam a busca na direção da solução. Da mesma forma que nas demais estratégias, o procedimento é interrompido quando o espaço de soluções seja completamente, implícita ou explicitamente, investigado.

2.3.3 Métodos de Busca Heurística

Este item descreve brevemente alguns métodos de busca heurística a serem incorporados nas estratégias apresentadas anteriormente. Três tipos de enfoque são considerados aqui, quais sejam busca em profundidade, busca em amplitude e busca pela melhor escolha [32]. Os métodos são descritos no contexto do problema de configuração de redes.

Iniciando de um estado inicial, o método de busca em profundidade tenta encontrar possíveis regras (ou operadores) a serem aplicados. Para um dado critério de seleção, uma regra é disparada e as correspondentes atribuições (por exemplo, mudar o estado de uma chave de manobra) formam um novo estado atual. O procedimento continua a partir do estado atual até que uma solução seja encontrada, ou uma violação de restrições seja identificada. Nestes casos, a busca em árvore

continua depois de uma operação de retrocesso. A figura 2.3 ilustra o enfoque de busca em profundidade, aplicado às redes dos exemplos das figuras 2.1 e 2.2, relativas às estratégias construtiva e destrutiva, respectivamente. Uma das principais vantagens deste enfoque corresponde ao baixo requisito de memória de computador.

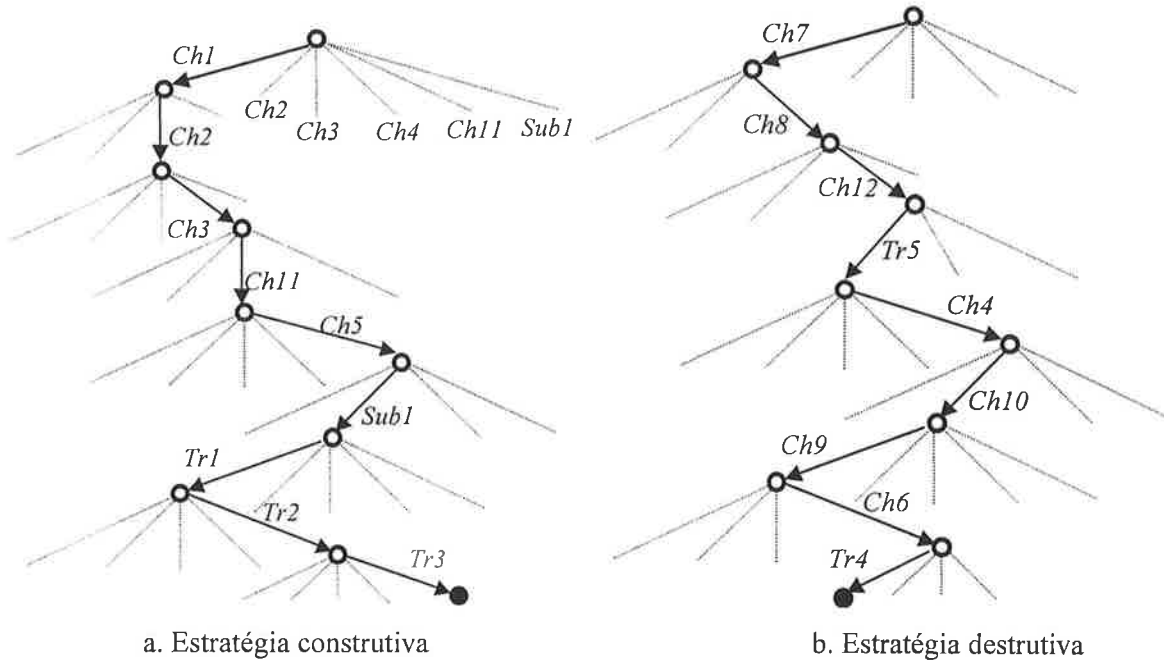


Fig. 2.3. Método de busca em profundidade

O método de busca em amplitude tenta encontrar regras que sejam aplicadas ao estado atual. Depois de disparada uma regra específica, o estado atual é atualizado, e o processo continua até que todas as possíveis regras sejam aplicadas. A figura 2.4 mostra dois níveis deste enfoque, quando aplicado conjuntamente com a estratégia construtiva do problema de configuração de redes. Dado que o número de níveis necessário para obter uma solução viável é alto, este enfoque não é geralmente recomendado.

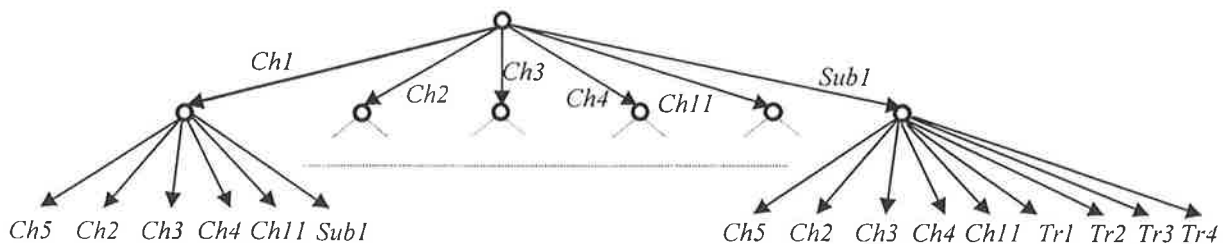


Fig. 2.4. Método de busca em amplitude

O método de busca pela melhor escolha, combina ambos os métodos de busca em profundidade e busca em amplitude. Para efeito ilustrativo, considere-se o caso no qual a função objetivo corresponde à minimização de custos e que a estratégia seja construtiva. A partir do estado inicial

(todos recursos não utilizados), determinam-se todos os possíveis operadores (recursos possíveis) ou regras que podem ser aplicadas. Para cada recurso candidato, uma função heurística estima o custo total da solução completa derivada daquela solução parcial. De todas as soluções parciais geradas até o passo correspondente, seleciona-se a mais promissora, isto é, aquela que apresenta o mínimo valor da função heurística naquele instante. Tal solução parcial é explorada, independentemente de seu nível na árvore de busca. Pode-se demonstrar que quando a função heurística sempre subestima o valor do custo real, então a primeira solução encontrada é a ótima. Também, quanto mais precisa é esta estimativa, mais rápido será o procedimento, ou seja, um menor número de estados será explicitamente enumerado. A referência [11] apresenta este método em detalhe, aplicado ao problema de configuração de redes.

2.4 Inclusão de Conjuntos *Fuzzy*

2.4.1. Considerações Iniciais

Este item trata da consideração da teoria de conjuntos *fuzzy* em problemas de configuração de redes, mostrando a sua importância para a incorporação de aspectos subjetivos relacionados à tomada de decisão e a consideração explícita de incertezas, como por exemplo nas demandas em centros de carga.

A área que trata especificamente da inclusão de conjuntos *fuzzy* em técnicas de otimização pode ser chamada de programação matemática *fuzzy* (*fuzzy mathematical programming*). No caso do problema de configuração de redes, a formulação PLIM com múltiplos objetivos passa a considerar aspectos subjetivos e de incertezas.

Conjuntos *fuzzy* também podem ser incorporados em modelos de configuração de redes, baseados em busca heurística, quando as incertezas podem ser incorporadas no modelo pela representação de parâmetros como números *fuzzy*. Assim, a partir de um fluxo de potência que utiliza operações aritméticas *fuzzy*, podem ser computadas tensões de barras, perdas e fluxos de potência que são grandezas representadas por números *fuzzy*, pois as demandas dos centros de carga são representadas por números *fuzzy*. Um índice de agregação *fuzzy* traduz a estrutura de preferência do tomador de decisão, com respeito aos múltiplos objetivos, estrutura essa que pode ser expressa por

variáveis lingüísticas. Orientação do processo de busca e satisfação de restrições são avaliadas durante o procedimento por comparação de números *fuzzy*.

2.4.2. Métodos de agregação *fuzzy*

O problema de configuração de redes pode ser considerado como de programação matemática *fuzzy*, conforme descrito por Bellman e Zadeh [33], sendo designado aqui de método de agregação *fuzzy* [3, 34]. Conforme apresentado no item 2.2.2, em problemas de otimização com múltiplos objetivos, o tomador de decisão persegue soluções que sejam tão próximas quanto possível da alternativa ideal. Esta característica subjetiva de problemas com múltiplos objetivos pode ser considerada pela introdução de objetivos *fuzzy*. Desta forma, funções de pertinência [3, 26] são definidas para expressar o grau de satisfação de cada objetivo relativamente à solução ideal. Por exemplo, a função de pertinência da função objetivo de custo será tão mais próxima de 1 quanto mais próximo o ponto estiver daquele de mínimo custo e tão mais próxima de zero para pontos afastados deste ideal (ou mais próximos de um ponto anti-ideal [3, 26]). Além disso, a informação sobre demanda traz consigo grande grau de incerteza, principalmente devido ao mercado espacial, no caso de planejamento de redes de distribuição. Desta forma, uma alternativa seria o engenheiro de planejamento simular diferentes cenários de crescimento da carga para obter um projeto da rede satisfazendo diferentes possibilidades de crescimento global e espacial. Assim, soluções determinísticas são encontradas para cada cenário e o tomador de decisão deve escolher uma delas. A idéia de considerar o problema dentro de uma estrutura de programação matemática *fuzzy* evita este problema, quando a primeira lei de Kirchhoff é considerada através de restrições *fuzzy*. Outras restrições, como é o caso de restrições de tensão, podem também ser consideradas no modelo *fuzzy*: é de interesse que os valores de tensão estejam tão próximos quanto possível da faixa satisfatória e tão longe quanto possível de violações. A figura 2.5 ilustra funções de pertinência que poderiam ser consideradas para objetivos e restrições do problema de configuração de redes de distribuição.

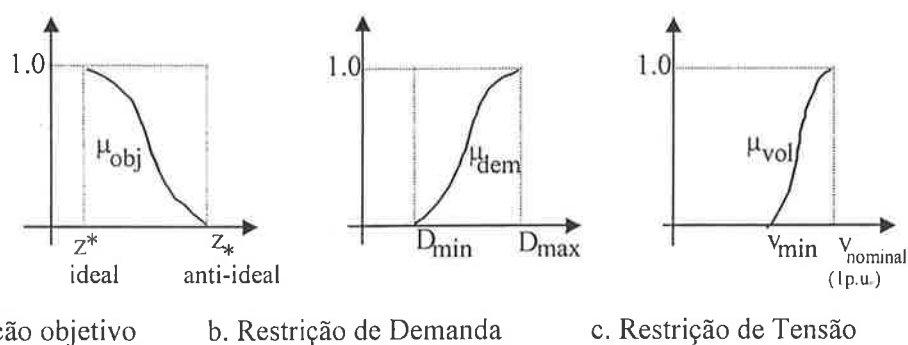


Fig. 2.5. Funções de pertinência dos objetivos e restrições do problema de configuração de redes

A formulação determinística (2.2) pode ser estendida para programação matemática *fuzzy* da seguinte maneira [35]:

$$\begin{aligned}
 & \text{satisfazer} && C_1x + C_2y \lesseqgtr \bar{z} \\
 & \text{s.a.} && A_1x + A_2y \lesseqgtr \bar{b} \\
 & && A_3y \lesseqgtr \bar{d}
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

onde os símbolos \lesseqgtr e \lesseqgtr representam relações *fuzzy* entre o primeiro e segundo membros de cada inequação e os valores do vetor \bar{z} correspondem a valores de referência das funções objetivo. Funções de pertinência são definidas para cada um dos p objetivos e para cada uma das m restrições. Deve-se então avaliar o conjunto *fuzzy* que satisfaz os objetivos e as restrições. Se o operador mínimo [35] for escolhido para agregação de objetivos e restrições, o conjunto de decisão *fuzzy* pode ser determinado pela seguinte função de pertinência:

$$\mu_D(x,y) = \min_{\substack{j=1,\dots,p \\ i=1,\dots,m}} \{ \mu_j[z_j(x,y)], \mu'_i[B_i(x,y)] \} \tag{2.9}$$

onde $B_i(x,y)$ representa o primeiro membro de cada restrição. A figura 2.6b ilustra o conjunto de decisão *fuzzy*, para o caso de um único objetivo, uma única restrição e uma variável, contrapondo-se ao caso determinístico, da figura 2.6a.

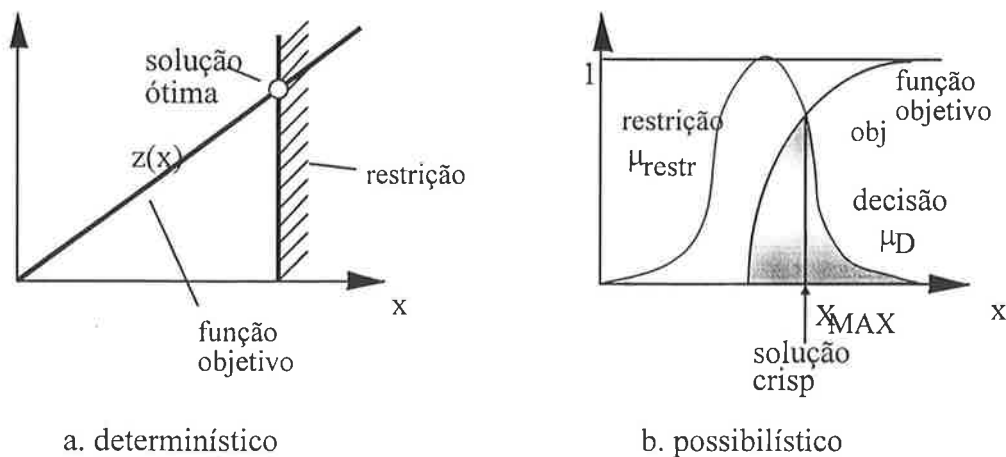


Fig. 2.6. Tomada de decisão em ambientes determinístico e *fuzzy* (possibilístico)

Uma solução determinística (*crisp*) que maximiza a função de pertinência μ_D representa uma alternativa que satisfaz, simetricamente, objetivos e restrições. Uma formulação equivalente, com otimização de um único objetivo, pode ser expressa conforme (2.10):

$$\begin{aligned}
 & \max \lambda \\
 & \text{s.a.} \\
 & \lambda \leq \mu_j [z_j(\mathbf{x}, \mathbf{y})] \quad j = 1, \dots, p \\
 & \lambda \leq \mu'_i [B_i(\mathbf{x}, \mathbf{y})] \quad i = 1, \dots, m_1 \\
 & B_i(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \leq d_i \quad i = m_1 + 1, \dots, m \\
 & \mathbf{x}, \mathbf{y} \geq \mathbf{0} \quad \mathbf{y} \in \{0,1\}
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

onde λ - corresponde ao valor da função de pertinência de decisão.

m_1, m - número de restrições *fuzzy* e número total de restrições.

$\mu_j [z_j(\mathbf{x}, \mathbf{y})]$ - função de pertinência do j -ésimo objetivo.

$\mu'_i [B_i(\mathbf{x}, \mathbf{y})]$ - função de pertinência da i -ésima restrição.

Diferentes tipos de funções de pertinência podem ser adotados para objetivos e restrições. No caso de formulações PLIM, é conveniente a adoção de funções lineares e, eventualmente, logísticas. Para ambos os casos, os problemas podem ser conduzidos para formulações com um único objetivo, do tipo PLIM.

No caso de funções de pertinência lineares, a função de pertinência de um dado objetivo, $\mu_{obj,i}$ pode ser calibrada tomando como base os valores do objetivo para as soluções ideal, z_i^* , e anti-ideal, z_{i*} . Assim, a função de pertinência correspondente pode ser escrita como:

$$\mu_{obj,i} [z_i(\mathbf{x}, \mathbf{y})] = \frac{z_{i*} - z_i(\mathbf{x}, \mathbf{y})}{z_{i*} - z_i^*} \tag{2.11}$$

De modo análogo, podem ser definidas as funções de pertinência das restrições de demanda ($\mu_{dem,it}$) e de tensão ($\mu_{vol,it}$):

$$\begin{aligned}\mu_{dem,it}[B_{it}(\mathbf{x},\mathbf{y})] &= \frac{B_{it}(\mathbf{x},\mathbf{y}) - D_{\min,it}}{D_{\max,it} - D_{\min,it}} & i = 1,\dots,n \\ \mu_{vol,it}[\Delta V_{it}(\mathbf{x},\mathbf{y})] &= \frac{\Delta V_{\max} - \Delta V_{it}(\mathbf{x},\mathbf{y})}{\Delta V_{\max}} & t = 1,\dots,h\end{aligned}\quad (2.12)$$

onde $B_{it}(\mathbf{x},\mathbf{y})$ segundo membro das equações de balanço de demanda.
 $D_{\min,it}, D_{\max,it}$ níveis mínimo e máximo de demanda na barra i , estágio t .
 $\Delta V_{it}(\mathbf{x},\mathbf{y})$ queda de tensão na barra i , estágio t .
 ΔV_{\max} queda de tensão máxima nas barras do sistema.

Por substituição de (2.12) e (2.11) em (2.10), a formulação equivalente pode ser escrita como:

$$\begin{aligned}\max & \lambda \\ \text{s.a.} & \\ & \lambda(z_{j^*} - z_j^*) + z_j(\mathbf{x},\mathbf{y}) \leq z_{j^*} & j = 1,\dots,p \\ & -\lambda(D_{\max,i_1} - D_{\min,i_1}) + B_{i_1}(\mathbf{x},\mathbf{y}) \geq D_{\min,i_1} & i_1 = 1,\dots,m_{11} \\ & \lambda\Delta V_{\max} + \Delta V_{i_2}(\mathbf{x},\mathbf{y}) \leq \Delta V_{\max} & i_2 = m_{11} + 1,\dots,m_1 \\ & B_i(\mathbf{x},\mathbf{y}) \leq d_i & i = m_1 + 1,\dots,m \\ & \mathbf{x},\mathbf{y} \geq \mathbf{0}, \mathbf{y} \in \{0,1\}\end{aligned}\quad (2.13)$$

onde m_{11} número de restrições de balanço de demanda.
 $m_1 - m_{11}$ número de restrições de limite de queda de tensão.
 m número total de restrições.

Funções de pertinência não lineares também podem ser adotadas. Referências [36, 37] apresentam utilização de linearização por partes para representar funções não lineares, o que pode levar a maior esforço computacional. Funções logísticas foram também sugeridas, e são particularmente interessantes para representar o grau de satisfação de objetivos. A figura 2.7 ilustra a forma e equação da função logística, onde γ e \bar{z} são parâmetros escolhidos pelo tomador de decisão para controlar a forma da curva. Se as funções de pertinência dos objetivos e restrições forem todas logísticas, a formulação (2.13) pode ser transformada na seguinte equivalente:

$$\begin{aligned}
 & \max \lambda' \\
 & \text{s.a.} \\
 & \lambda'(z_{j*} - z_j^*) / \gamma_{z_j} + z_j(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \leq \bar{z}_j \quad j = 1, \dots, p \\
 & -\lambda'(D_{\max, i_1} - D_{\min, i_1}) / \gamma_{B_{i_1}} + B_{i_1}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \geq \bar{D}_{i_1} \quad i_1 = 1, \dots, m_{11} \\
 & \lambda' \Delta V_{\max} / \gamma_{V_{i_2}} + \Delta V_{i_2}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \leq \Delta \bar{V}_{i_2} \quad i_2 = m_{11} + 1, \dots, m_1 \\
 & B_i(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \leq d_i \quad i = m_1 + 1, \dots, m \\
 & \mathbf{x}, \mathbf{y} \geq \mathbf{0}, \mathbf{y} \in \{0, 1\}
 \end{aligned} \tag{2.14}$$

onde $\lambda' = \ln\left(\frac{\lambda}{1-\lambda}\right)$ - variável auxiliar.

γ_{z_j}, \bar{z}_j - parâmetros das funções objetivo.

$\gamma_{B_{i_1}}, \bar{D}_{i_1}$ - parâmetros das funções de restrições de demanda.

$\gamma_{V_{i_2}}, \Delta \bar{V}_{i_2}$ - parâmetros das funções de restrições de tensão.

Da transformação $\lambda' = \ln\left(\frac{\lambda}{1-\lambda}\right)$, a formulação não linear (2.10) é levada para um problema PLIM.

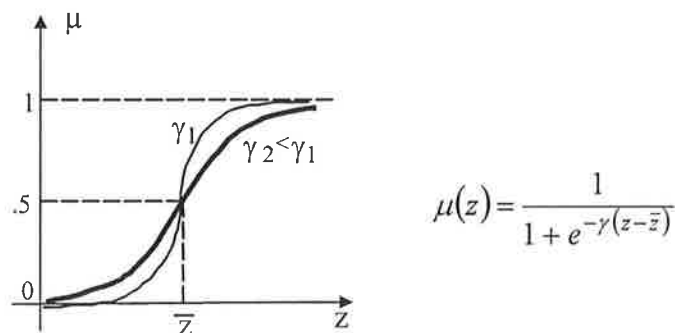


Fig. 2.7. A função logística

Conforme descrito, o conjunto de decisão *fuzzy* deve ser tal a agregar os objetivos e restrições. O operador *mínimo* não é necessariamente o melhor operador para representar a intersecção de objetivos e restrições, conforme [3, 35]. Como este operador não é compensatório, no sentido que aumentos no grau de pertinência podem não afetar o conjunto de decisão *fuzzy*, duas alternativas podem ser consideradas para o operador de agregação.

A primeira, corresponde ao operador *e-compensatório*, que combina os operadores *mínimo* e *máximo*, isto é $\mu_c(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ pode ser escrito:

$$\mu_c(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \gamma \min_{i=1, \dots, n_t} [\mu_i(\mathbf{x}, \mathbf{y})] + (1 - \gamma) \max_{i=1, \dots, n_t} [\mu_i(\mathbf{x}, \mathbf{y})], \gamma \in [0, 1] \quad (2.15)$$

onde n_t é o número total de objetivos e restrições. A segunda alternativa corresponde ao operador *e-fuzzy*, $\mu_{ef}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$, que é dado por:

$$\mu_{ef}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \gamma \min_{i=1, \dots, n_t} [\mu_i(\mathbf{x}, \mathbf{y})] + (1 - \gamma) \frac{1}{n_t} \sum_{i=1}^{n_t} \mu_i(\mathbf{x}, \mathbf{y}), \gamma \in [0, 1] \quad (2.16)$$

Ambos os operadores *e-compensatório* e *e-fuzzy* possuem formulações equivalentes, conforme descrito em [3, 35].

2.4.3. Métodos com parâmetros *fuzzy*

Outra maneira de considerar incertezas no problema de configuração de redes é através da modelagem dos parâmetros utilizando números *fuzzy* [3, 38]. Este enfoque representa uma alternativa para programação matemática estocástica, principalmente pelas informações quanto aos dados de demanda no sistema de distribuição. Nesta abordagem, coeficientes das funções objetivo e das restrições, bem como as metas podem ser modeladas como números *fuzzy*. A formulação matricial apresentada em 2.5 (englobando as variáveis inteiras no vetor \mathbf{x}) pode ser estendida para:

$$\begin{aligned} \max \tilde{\mathbf{C}}\mathbf{x} &= [\tilde{\mathbf{c}}_1 \mathbf{x} \dots \tilde{\mathbf{c}}_p \mathbf{x}] \\ \text{s.t. } \tilde{\mathbf{A}}\mathbf{x} &\leq \tilde{\mathbf{b}} \end{aligned} \quad (2.17)$$

onde:

$\tilde{\mathbf{C}}$ matriz de objetivos e seus coeficientes.

$\tilde{\mathbf{A}}$ matriz de restrições.

$\tilde{\mathbf{b}}$ vetor de termos independentes.

\sim representa coeficientes dados por número *fuzzy*.

Vários trabalhos foram propostos na literatura para tratar o problema acima de programação matemática possibilística. O enfoque implementado em [38] deriva-se da comparação de números *fuzzy*, aplicada a objetivos e restrições. Ou seja, no caso das restrições, um número *fuzzy*, resultante do primeiro membro da i -ésima restrição (termo $\tilde{\mathbf{a}}_i \mathbf{x}$) pode ser avaliado pela operação de adição utilizando aritmética *fuzzy* [39]. Este número *fuzzy* é comparado com o correspondente segundo

membro da inequação, que é representado pelo número *fuzzy* \tilde{b}_i . No caso de objetivos, o número *fuzzy* resultante do primeiro membro $\tilde{c}_i x$ do *i*-ésimo objetivo também é determinado pela operação de adição com aritmética *fuzzy*. Este, por sua vez, é comparado com a meta *fuzzy* (por exemplo, soluções tão próximas quanto possível do ideal), o que também pode ser representado por um número *fuzzy* que tende a 1 quando a função objetivo tende ao seu valor ótimo. A referência [3, 38] mostra como uma formulação matemática equivalente (não *fuzzy*) pode ser estabelecida, de modo que uma solução *crisp* do problema seja determinada, dentro de riscos de violação controlados pelo usuário, através de parâmetros pré-fixados.

2.4.4. Conjuntos *fuzzy* em métodos heurísticos

Conforme visto no item 2.3.3, nos métodos heurísticos, é necessária a verificação de soluções parciais através de procedimentos de fluxo de carga e avaliação se as restrições são satisfeitas. Caso haja alguma violação de restrição, o mecanismo de inferência do método realiza um retrocesso na busca. Os conjuntos *fuzzy* podem ser incorporados neste tipo de abordagem, aumentando bastante a capacidade do método, que passa a permitir a representação de incertezas do problema, bem como aspectos subjetivos de tomada da decisão, como aqueles apresentados no item 2.4.2.

Neste item apresenta-se inicialmente como pode-se estender de maneira relativamente simples o cálculo elétrico de redes radiais, incorporando grandezas *fuzzy* como dados e resultados do problema. Em seguida, podem ser verificadas se as restrições *fuzzy* são atendidas através de comparação de números *fuzzy* e pode-se inclusive avaliar o mérito da alternativa através de agregação de objetivos *fuzzy*, utilizando pesos *fuzzy*.

O Fluxo de Potência *Fuzzy*: Incertezas em dados da demanda existente em centros de carga, para problemas de operação, ou da demanda futura, para problemas de planejamento, podem ser modeladas representando os valores das demandas por números *fuzzy*. É relativamente direto inferir que, desta forma, os parâmetros elétricos da rede, quais sejam tensões nas barras, correntes, fluxos de potência e perdas nos trechos também resultem representados por números *fuzzy*. Consequentemente, os valores das funções objetivo, tais como custos fixos e variáveis e energia não distribuída, que dependem não somente dos fluxos de potência mas também de seus coeficientes (também assumidos *fuzzy*), podem ser representados também por números *fuzzy*.

Assumindo um modelo de corrente constante para a representação das cargas da rede, o procedimento básico pode ser descrito como se segue:

- i. *Ordenação da rede*: iniciando da barra da subestação, as primeiras barras descendentes (e trechos) são inseridos numa lista. Para cada barra inserida, verificam-se novamente as primeiras barras e trechos descendentes, que também são inseridos na lista, até que todas as barras e trechos sejam considerados.
- ii. *Correntes de carga*: assumindo o modelo de corrente constante, e que são conhecidos os valores dos números *fuzzy* relativos à potência ativa na barra p , \tilde{P}_p , e potência reativa na barra, \tilde{Q}_p , para um dado nível de tensão, por exemplo V_{nom} , então a corrente de carga pode ser determinada por:

$$\tilde{I}_{r,p} - j\tilde{I}_{i,p} = (\tilde{P}_p - j\tilde{Q}_p) / V_{nom} \quad (2.18)$$

- iii. *Cálculo das correntes e quedas de tensão nos trechos*: iniciando dos trechos no final da lista, calcula-se (i) a queda de tensão no trecho qp pela equação:

$$\Delta\tilde{V}_{r,pq} + j\Delta\tilde{V}_{i,pq} = Z_{pq}(\tilde{I}_{r,p} - j\tilde{I}_{i,p}) = (R_{pq}\tilde{I}_{r,p} + X_{pq}\tilde{I}_{i,p}) + j(X_{pq}\tilde{I}_{r,p} - R_{pq}\tilde{I}_{i,p}) \quad (2.19)$$

A corrente é então acumulada na barra antecessora, ou seja na barra q :

$$\tilde{I}'_{r,q} - j\tilde{I}'_{i,q} = (\tilde{I}_{r,q} + \tilde{I}_{r,p}) - j(\tilde{I}_{i,q} + \tilde{I}_{i,p}) \quad (2.20)$$

O processo continua em direção ao início da lista, até que a barra da subestação seja atingida, ou seja, a corrente total seja avaliada.

- iv. *Cálculo das quedas de tensão acumuladas nas barras*: Iniciando da barra da subestação (ou seja, do início da lista ordenada), as tensões nas barras da rede são avaliadas pela diferença entre as tensão na barra antecessora e a queda de tensão no trecho determinada no passo iii. Assim, a tensão na barra p , que vem da barra q , pode ser calculada por:

$$\tilde{V}_{r,p} + j\tilde{V}_{i,p} = (\tilde{V}_{r,q} - \Delta\tilde{V}_{r,pq}) + j(\tilde{V}_{i,q} - \Delta\tilde{V}_{i,pq}) \quad (2.21)$$

e, o módulo da tensão:

$$|\tilde{V}_p| = \sqrt{\tilde{V}_{r,p}^2 + \tilde{V}_{i,p}^2} \quad (2.22)$$

O procedimento continua, em direção ao final da lista, até que todas as barras da rede tenham suas tensões calculadas.

v. *Cálculo das perdas*: as perdas ativas, em cada trecho de rede, podem ser avaliadas por:

$$\tilde{P}_{perda,pq} = R_{pq} (\tilde{I}_{r,pq}^2 + \tilde{I}_{i,pq}^2) \quad (2.23)$$

O procedimento acima admite que não haja alteração significativa no ângulo de fase das correntes de carga, e o processo torna-se direto, ou seja, não iterativo. Caso esse efeito fosse considerado, os passos de ii a iv deveriam ser repetidos até que não houvesse variação significativa dos valores de tensão, em todas as barras do sistema, entre duas iterações consecutivas.

O procedimento de fluxo de carga *fuzzy* necessita basicamente de operações aritméticas *fuzzy*. Quando são considerados números *fuzzy* triangulares, representados por triplas $\tilde{A} = (a_1, a_2, a_3)$, conforme figura 2.8, as operações aritméticas *fuzzy* são facilmente avaliadas pelo princípio da extensão [39], levando a números *fuzzy*, que podem ser assumidos triangulares.

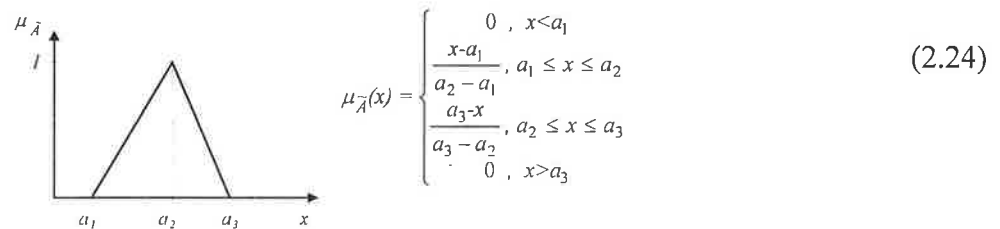


Fig. 2.8. Número *fuzzy* triangular, \tilde{A} , e sua função de pertinência

Dados dois números *fuzzy* triangulares, \tilde{A} e $\tilde{B} = (b_1, b_2, b_3)$, as seguintes operações, utilizadas no fluxo de carga, podem ser avaliadas:

$$\begin{aligned} \tilde{A} + \tilde{B} &= (a_1 + b_1, a_2 + b_2, a_3 + b_3) & \tilde{A} - \tilde{B} &= (a_1 - b_3, a_2 - b_2, a_3 - b_1) & (2.25) \\ k \cdot \tilde{A} &= (k \cdot a_1, k \cdot a_2, k \cdot a_3) & \tilde{A} \cdot \tilde{B} &= (a_1 \cdot b_1, a_2 \cdot b_2, a_3 \cdot b_3) \\ \tilde{A}^{-1} &= (1/a_3, 1/a_2, 1/a_1) & \tilde{A}/\tilde{B} &= (a_1/b_3, a_2/b_2, a_3/b_1) & \tilde{A}^n &= (a_1^n, a_2^n, a_3^n) \end{aligned}$$

A rede da figura 2.9 ilustra o procedimento de fluxo de potência *fuzzy*. Todas as ligações apresentam mesma impedância, dada por $z = (r + jx) = (0.1 + j0.2) pu / km$. Assume-se potência de base de 100MVA e tensão de base, igual a nominal, de 13.8kV. Todas cargas podem variar entre -20% e +10% em relação ao valor mais possível, indicado na figura 2.9, isto é, a potência ativa de cada carga é dada por $\tilde{P}_p = (0.8P_p, P_p, 1.1P_p)$; assume-se também $\tan \varphi = 0.5$, isto é, potência reativa dada por $\tilde{Q}_p = 0.5\tilde{P}_p$.

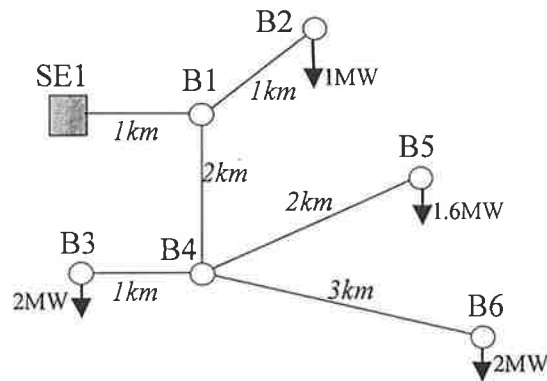


Fig. 2.9 – Rede para o fluxo de potência *fuzzy*

A tabela 2.1 apresenta a lista ordenada com os elementos (nós e ligações) da rede da figura 2.9. Apresenta os resultados, em pu, dos valores mais possíveis de correntes nos trechos e tensões nos nós, correspondentes aos mesmos resultados que seriam determinados pelo fluxo de potência determinístico.

Tabela 2.1 – Cálculo do fluxo de potência determinístico

Pos.	Ligações		Correntes Carga		Correntes nas ligações			Quedas de tensão		Tensões nos nós		
	Barra filho (p)	Barra pai (q)	$I_{r,p}$	$I_{i,p}$	$I'_{r,p}$	$I'_{i,p}$	$ I_{pq} $	$\Delta V_{r,pq}$	$\Delta V_{i,pq}$	$V_{r,p}$	$V_{i,p}$	$ V_p $
0	SE ₁	-	-	-	0.066	0.033	0.0738	-	-	1.0000	.0000	1.0000
1	B ₁	SB ₁	-	-	0.066	0.033	0.0738	0.0132	0.0099	0.9868	-.0099	0.9868
2	B ₂	B ₁	0.010	0.005	0.010	0.005	0.0112	0.0020	0.0015	0.9848	-.0114	0.9849
3	B ₄	B ₁	-	-	0.056	0.028	0.0626	0.0224	0.0168	0.9644	-.0267	0.9648
4	B ₃	B ₄	0.020	0.010	0.020	0.010	0.0224	0.0040	0.0030	0.9604	-.0297	0.9609
5	B ₅	B ₄	0.016	0.008	0.016	0.008	0.0179	0.0064	0.0048	0.9580	-.0315	0.9585
6	B ₆	B ₄	0.020	0.010	0.020	0.010	0.0224	0.0120	0.0090	0.9524	-.0357	0.9531

O mesmo procedimento foi realizado incorporando as operações aritméticas *fuzzy* no cálculo de correntes acumuladas, quedas de tensão e tensões nodais. Os resultados principais, que correspondem à corrente na subestação, \tilde{I}'_{SE_1} , à mínima tensão na rede, \tilde{V}_{\min} na barra B₆, e as perdas totais na rede, $\tilde{P}_{perdas,tot}$, são os seguintes:

$$\begin{aligned}\tilde{I}'_{SE_1} &= (0.05904, 0.0738, 0.08118)pu = (247, 309, 340)A \\ \tilde{V}_{\min} &= (0.9481, 0.9531, 0.9627)pu = (13.09, 13.15, 13.29)kV \\ \tilde{P}_{perdas,tot} &= (102.8, 160.6, 194.3)kW\end{aligned}$$

Verifica-se que uma variação de -20% a +10% no valor de todas as cargas do sistema leva à mesma variação nas correntes dos trechos; porém, com relação às tensões nodais, resulta variação inferior de, -0.5% a 1% do valor mais possível, enquanto, para as perdas totais, resulta variação superior, de -36% a +21% do valor mais possível.

Verificação de restrições: Uma vez avaliados os carregamentos em trechos da rede, \tilde{X}_{pq} , os carregamentos nas subestações, \tilde{A}_p , e as tensões, \tilde{V}_p , em todas as barras da rede, todas essas grandezas representadas por números *fuzzy* triangulares, o procedimento de busca heurística necessita que sejam verificadas se as restrições são satisfeitas, isto é, se os critérios técnicos são atendidos. Genericamente, o segundo membro destas restrições também podem ser representados por números *fuzzy* triangulares, sendo assim estabelecidos os limites *fuzzy* de tensão mínima, \tilde{V}_{\min} , de carregamento de trechos de rede, \tilde{M}_{pq} , e de carregamento de subestações, \tilde{M}_{s_p} . A figura 2.10 ilustra como esta verificação pode ser realizada em ambiente *fuzzy*. Nesta, nota-se que os três tipos de restrições são satisfeitos, sempre que um índice otimista, σ , representando a interseção da variável e de seu limite, seja maior que valor mínimo de segurança, τ . Formalmente, para o limite de capacidade de trechos de rede (τ_{tr}), limite de capacidade de subestações (τ_{sub}) e para as limites de tensão (τ_v), tem-se que:

$$\sigma(\tilde{X}_{pq} \leq \tilde{M}_{pq}) \geq \tau_{tr} \quad \sigma(\tilde{A}_p \leq \tilde{M}_{s_p}) \geq \tau_{sub} \quad \sigma(\tilde{V}_p \geq \tilde{V}_{\min}) \geq \tau_v \quad (2.26)$$

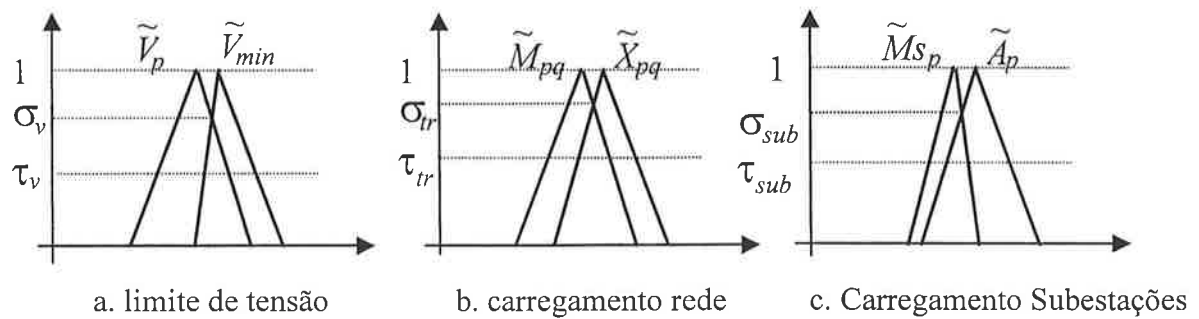


Fig. 2.10 – Comparações *fuzzy* para verificação de restrições

Quando as restrições (2.26) são satisfeitas durante o procedimento de busca, para uma dada configuração radial, correspondendo a uma solução parcial ou completa, os critérios técnicos estão atendidos. Relaxação dos critérios, desta forma, pode ser controlada pelos parâmetros de segurança associados.

Depois que uma primeira solução viável do problema de configuração de redes é determinada, no método de busca em profundidade na estratégia construtiva, a árvore de soluções pode ser mais explorada através de pesquisa de soluções que apresentem melhoria de um índice de agregação dos múltiplos objetivos. Conforme [11, 67], pode-se compor uma soma ponderada *fuzzy* dos objetivos, formando o índice de agregação, \tilde{I}_{Ag} , que pondera os objetivos de acordo com os respectivos graus de importância, levando a soluções não-dominadas. Os pesos de ponderação dos objetivos podem ser formulados como números *fuzzy*, de modo a aprimorar a estrutura de preferência do tomador de decisão. Sendo os objetivos dados por $\tilde{z}_k(\tilde{x}, \tilde{y})$, os pesos $\tilde{\lambda}_k$, o índice de agregação *fuzzy* pode ser escrito como:

$$\tilde{I}_{Ag} = \frac{\sum_{k=1}^p [\tilde{\lambda}_k \cdot \tilde{z}_k(\tilde{x}, \tilde{y})]}{\sum_{k=1}^p \tilde{\lambda}_k} \quad (2.27)$$

A referência [40] mostra um eficiente método para avaliar o índice 2.27, que pode ser facilmente adaptado para o caso de números *fuzzy* triangulares [11]. Os aspectos subjetivos do processo de tomada de decisão podem ser implicitamente considerados neste índice. A figura 2.11 mostra exemplos de possíveis pesos *fuzzy*, que podem ser interpretados pelas variáveis lingüísticas: (1) objetivo muito pouco importante, (2) objetivo pouco importante, (3) objetivo medianamente importante, (4) objetivo de alta importância e (5) objetivo de altíssima importância.

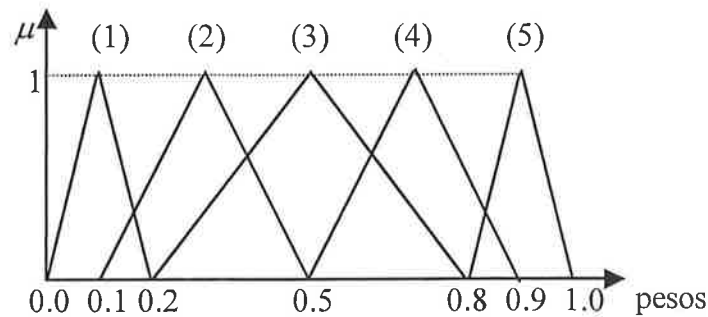


Fig. 2.11. Exemplo de pesos *fuzzy* ($\tilde{\lambda}_k$)

Definido o índice de agregação 2.27, pode-se interromper a exploração em um determinado caminho da árvore de busca (corte), desde que o índice de agregação identificado seja pior do que o obtido pela melhor solução encontrada até aquele instante. Esta opção melhora o desempenho do procedimento heurístico e pode ser incorporada através da inclusão da seguinte restrição 2.28, que é verificada simultaneamente com as restrições técnicas do modelo:

$$\Delta \tilde{I}_{Ag} \geq \tilde{\varepsilon} \quad (2.28)$$

onde $\Delta \tilde{I}_{Ag}$ representa uma melhoria *fuzzy* no índice de agregação e $\tilde{\varepsilon}$ representa uma tolerância *fuzzy*.

2.5 Discussão e Perspectivas

Os métodos expostos neste capítulo tratam do problema de configuração de redes abordando praticamente todas as suas características, ou seja, podem ser considerados nas formulações, se não todos, grande parte dos aspectos deste problema.

A principal dificuldade na aplicação destes métodos é o tratamento de redes reais, quando, no caso de modelos baseados em programação matemática, o número de variáveis contínuas e, principalmente, inteiras (de decisão), tornam o problema de solução impossível ou com tempos de processamento proibitivos. Assim, algoritmos de transporte, aliados a técnicas de tratamento do problema de custo fixo, que são bem mais eficientes, têm sido utilizados para o tratamento de sistemas reais [8, 19]. A principal desvantagem na aplicação de tais algoritmos é que só alguns aspectos do problema podem ser considerados. Restrições envolvendo limites de queda de tensão e

envolvendo radialidade da rede não podem ser impostas e, portanto, devem ser tratadas posteriormente ao processo de otimização, o que obviamente pode afastar as soluções do “ótimo”. Também, quando da tentativa de radialização da rede, podem ocorrer casos em que nem mesmo uma solução viável seja encontrada a partir da abertura ou instalação de chaves na rede de distribuição.

Por outro lado, neste capítulo, foram apresentadas técnicas de busca heurística, que possibilitam o tratamento do problema de configuração de redes, considerando todas as restrições do problema, com a ressalva que, no caso de planejamento de sistemas de distribuição, deve ser utilizada abordagem pseudo-dinâmica. Apesar de bons resultados alcançados com esta metodologia, conforme os apresentados em [11], ainda a sua aplicação é limitada a redes de médio porte, ou a redes de grande porte que passam por um processo de redução com um número limitado de recursos sendo selecionados para serem operados ou instalados (no caso de reconfiguração de redes, corresponderia à escolha daquelas chaves que podem ser manobradas e, no caso de planejamento, além destas chaves, também a escolha de alguns reforços candidatos), de modo a manter o problema tratável pelas estratégias e heurísticas apresentadas.

Estas dificuldades no tratamento de problemas reais de configuração de redes tem inspirado muitos pesquisadores a considerarem técnicas alternativas. Nesta tese, a partir do capítulo posterior, apresenta-se uma nova técnica que tomou fôlego na última década, qual seja a de Algoritmos Genéticos (AGs), e são desenvolvidas aplicações específicas para a classe de problemas apresentada neste capítulo.

Bases de Algoritmos Genéticos

3.1 Considerações Gerais

Neste capítulo, apresenta-se breve introdução sobre algoritmos genéticos (AGs). O objetivo não é o aprofundamento da teoria na qual se baseiam os AGs, mas sim, na expectativa de tornar este trabalho completo para o leitor, descrever as suas principais idéias e conceitos e o funcionamento do algoritmo básico. O livro [41] trata o assunto com diferentes níveis de detalhe, e deve servir como um texto importante e de referência para os iniciantes nesta área.

A principal motivação na aplicação de AGs vem de sua potencialidade como uma técnica de otimização de características particulares, combinando intrinsecamente procedimentos de busca direcionada e aleatória, de modo a ser obtido O pontos ótimo de dada função, mesmo quando esta apresenta características não lineares, múltiplos picos e descontinuidades. Assim, os AGs realizam uma busca que evita a convergência para ótimos locais.

No problema específico de configuração de redes, a principal motivação é quanto à dimensionalidade do problema, em função do número de variáveis envolvidas; além de ser um problema de natureza combinatória, também apresenta algumas dificuldades de modelagem, principalmente quando são utilizados métodos convencionais de otimização. Por exemplo, os métodos baseados em programação matemática, apresentados no capítulo anterior, impõem uma série de limitações de modelagem, tais como a necessidade de linearização das perdas, a dificuldade de considerar as restrições de queda de tensão e radialidade, dentre outras.

Na aplicação de algoritmos genéticos a este problema, possíveis alternativas de configuração de redes deverão ser geradas e só então avaliadas. Esta avaliação pode valer-se dos métodos convencionais de análise de redes que determinam, de forma expedita e exata (principalmente em redes de distribuição radiais), os principais parâmetros elétricos envolvidos e, conseqüentemente, também as funções objetivo.

Em AGs, o espaço de possíveis soluções é percorrido com certa aleatoriedade incorporada, porém sem ser um tipo de busca sem direção, levando à grande eficiência para a obtenção da solução almejada do problema real em questão.

Conforme salientado em [41], a vantagem principal dos AGs em relação aos outros métodos de busca e de otimização, como aqueles apresentados no capítulo anterior, refere-se à robustez do métodos, pois os seguintes pontos básicos os diferem dos demais:

- AGs trabalham com uma codificação do conjunto de parâmetros, e não com os parâmetros propriamente ditos;
- AGs trabalham a partir de uma população de soluções alternativas e não a partir de uma alternativa única;
- AGs se utilizam de informação da função objetivo e não de suas derivadas ou de informações auxiliares;
- AGs utilizam regras de transição probabilísticas para busca no espaço de soluções e não regras determinísticas.

Neste capítulo, os pontos acima ficarão evidentes. Cabe, no entanto, ressaltar novamente que o principal objetivo é a apresentação do método para iniciantes no assunto e a demonstração de seu potencial no contexto desse trabalho, através de exemplos ilustrativos em pequenas redes de distribuição. Mais adiante, uma aplicação ilustrativa de AGs é comparada com alguns métodos de solução apresentados no capítulo 2. De posse do algoritmo básico e da demonstração do potencial dos AGs, o capítulo 4 aprofunda-se na modelagem utilizada para o tratamento de problemas de configuração de redes de distribuição de energia elétrica, com dimensões reais.

É importante também destacar que, apesar deste trabalho voltar-se à aplicação de AGs para o problema de configuração de redes, não serão pesquisadas as diversas variantes destes algoritmos existentes na literatura. Espera-se que esse trabalho possa fornecer os subsídios básicos para

inúmeras outras pesquisas, dentre elas variações no AG aqui apresentado e utilizado, bem como o desenvolvimento de aplicações correlatas. Assim, o trabalho embasar-se-á no algoritmo genético básico, que será apresentado no item seguinte.

3.2 O Algoritmo Básico

Neste item, apresenta-se uma descrição relativamente sucinta do funcionamento de um AG. Algoritmos genéticos partem de um *string*, elemento que deve ter uma relação explícita com os parâmetros do problema; tal relação, conforme detalhado adiante, define uma dada codificação. Assim, conforme mencionado no item anterior, os parâmetros do problema não são diretamente tratados pelo AG. Um *string* é composto por diversos *bits*, sendo que cada *bit* pode assumir o valor 0 ou 1; no exemplo da figura 3.1, o *string* contém 6 *bits*.

1	2	3	4	5	6
1	0	1	1	0	1

Fig. 3.1 – Exemplo de um *string*

Um *string* pode ser entendido, da genética, como um cromossomo que apresenta genes (ou *bits*), em diferentes locus do cromossomo (posições no *string*), representando diversas características de um indivíduo. O valor de cada gene, que corresponde a determinada característica, corresponde a um alelo. Ainda, o pacote genético, normalmente chamado de genótipo, pode ter sua correspondência em AGs pelas estruturas de dados que definem o *string*. A interação deste pacote genético com o ambiente, que define as características do indivíduo é chamado de fenótipo, o que corresponde, em AGs, na decodificação da estrutura para formar uma possível solução alternativa ou possível conjunto de parâmetros de solução do problema.

A rede da figura 3.2. ilustra como o *string* pode se relacionar a um problema real, em particular o problema de reconfiguração de redes (por exemplo, minimização de perdas por alteração dos estados das chaves da rede). Se, no processo de codificação, for assumido que o valor de um *bit* no *string* igual a 1 corresponde à chave na posição fechada e valor igual a 0 corresponde à chave aberta, então uma determinada combinação de *bits* do *string* corresponderá a uma dada configuração da rede.

A configuração da figura 3.2 reflete o *string* da figura 3.1, que representa as características decodificadas do indivíduo. Ou seja, diferentes valores de *bits* (ou dos genes), ou ainda diferentes alelos, corresponderão diferentes características; no caso deste exemplo, diferentes configurações de rede.

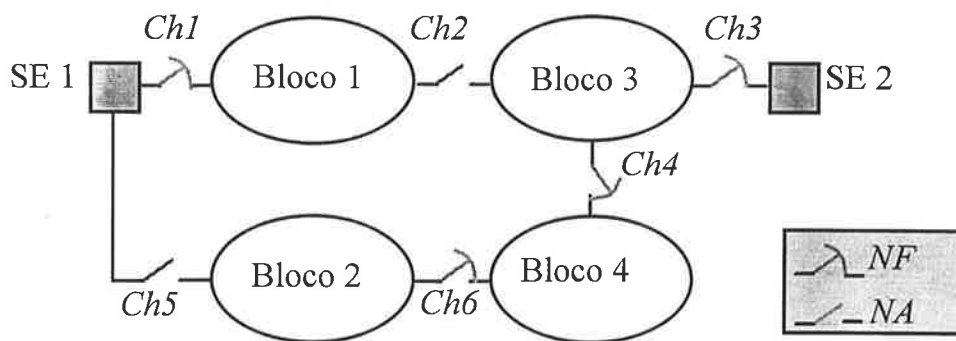


Fig. 3.2 – Rede exemplo

Conforme mencionado no item anterior deste capítulo, AGs trabalham com uma população de soluções alternativas, e não uma alternativa única. Ou seja, estabelecida a regra de formação de um *string* e sua relação com o problema real (codificação), um AG trabalha com diferentes combinações de *string*, ou um número de indivíduos, que irão compor uma população.

Uma vez estabelecido o elemento básico de AGs, isto é um *string*, e sua relação com o problema real, ou seja sua codificação, o mecanismo de um AG é relativamente simples. O problema básico reside na determinação do “melhor” indivíduo ou o “mais ajustado”, o que é medido pelo valor de uma função de avaliação aplicada a cada indivíduo. Tal função deverá, obviamente, apresentar relação direta com a função objetivo. Por exemplo, para avaliação do indivíduo da figura 3.1, que corresponde à configuração da rede da figura 3.2, pode ser estabelecida uma certa função inversamente proporcional às perdas elétricas; ou seja, quanto maior for o valor de tal função, mais ajustado estará aquele indivíduo às características desejadas, neste caso relativas a minimizar perdas. Daí também ser designada a função de avaliação como função de ajuste (*fitness function*). A função de avaliação pode ser considerada o segundo ponto de relacionamento do AG com o problema real.

A população inicial de indivíduos, ou seja, um conjunto inicial de *strings*, é geralmente estabelecida de modo aleatório, conforme será visto no item subsequente. Em seguida, as populações evoluem em gerações, basicamente através de três operadores:

- Reprodução, que corresponde a um processo no qual os indivíduos são copiados para a geração futura em função de sua função de avaliação;
- Cruzamento, que corresponde a um operador que atua sobre um par de *strings* escolhidos aleatoriamente;
- Mutação, que corresponde a um operador que pode modificar, com certa probabilidade, os valores de genes (alelos) dos *strings*.

Ou seja, os três operadores acima são realizados sobre uma dada população para formar uma nova geração; geralmente, o número de indivíduos da população, ao longo das gerações, é mantido constante. Os operadores de reprodução, cruzamento e mutação são de implementação extremamente simples, o que é uma das vantagens da utilização de AGs. Eles são responsáveis por realizar as operações que imitam, de certa forma, fenômenos da natureza, como a teoria de seleção natural de Darwin.

Desta forma, espera-se que as populações, de geração a geração, tornem-se cada vez melhores ou ajustadas, o que é medido pelas funções de avaliação de seus indivíduos. O melhor indivíduo, aquele com maior valor desta função, depois de um determinado número de gerações, representa a solução do problema em questão. O algoritmo genético é apresentado, de modo simplificado, no diagrama de blocos da figura 3.3. Todos os passos deste diagrama serão descritos nos itens subsequentes.

3.2.1 Estabelecimento da População Inicial

O número de indivíduos da população, em cada geração, deve ser fixado a priori, o que é um dos parâmetros importantes de um AG. Este número, em função de práticas de utilização, tende a ser fixado em torno de uma a duas centenas de indivíduos.

Em geral, a população inicial de um AG é estabelecida de maneira aleatória. Se isso fosse feito “manualmente”, bastaria determinar o valor de cada *bit* de cada *string* (ou indivíduo) da população inicial através do lançamento de uma moeda, dado que as probabilidades do resultado ser cara ou coroa são iguais a 50% cada; ou seja ao valor do *bit* igual a 0 (zero) poderia ser associado o resultado cara e igual a 1 (um), o resultado coroa.

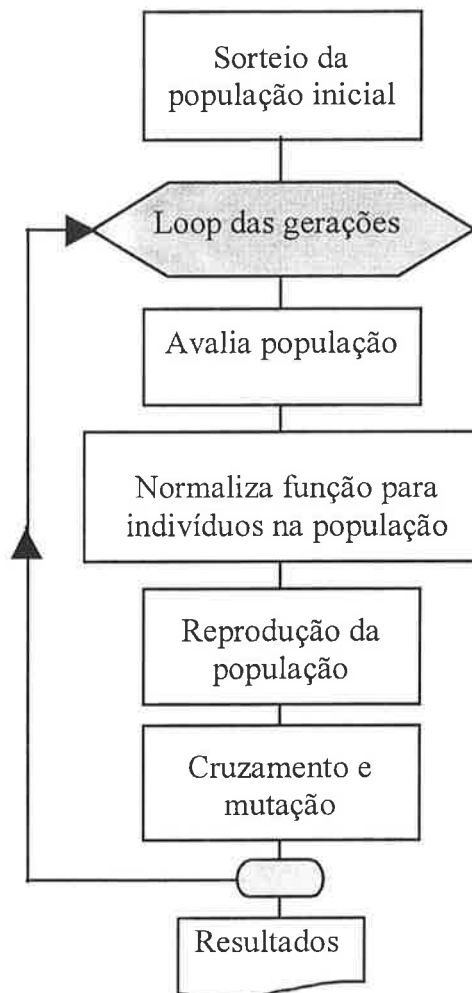


Fig. 3.3 – Diagrama de Blocos de um AG

Obviamente, a operação manual acima seria bastante trabalhosa, pois o número de lançamentos de moeda seria igual ao número de *bits* de cada *string* multiplicado pelo número de indivíduos da população, o que pode chegar a milhares de lançamentos. Os computadores digitais contam com funções que geram números aleatórios com distribuição uniforme. Em geral, o número é aleatoriamente gerado no intervalo $[0,1]$, como mostrado na figura 3.4, onde $p(x)$ representa a função densidade de probabilidade da variável aleatória x .

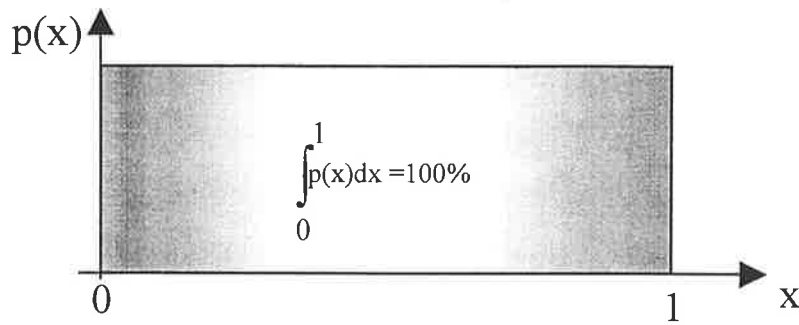


Fig. 3.4 – Distribuição uniforme

Desta forma, a geração da população inicial torna-se bastante simples, bastando utilizar tal função de geração de número aleatório (que será designada, daqui para frente, simplesmente como função *RAND*). Gera-se um número aleatório para cada *bit* de cada *string* da população. Para cada número aleatório gerado, testa-se se o seu valor é menor que 0,5; se sim o valor do *bit* é feito igual a 0 (zero) e se não o valor do *bit* é feito igual a 1 (um).

A título ilustrativo, suponha que uma população inicial com 5 indivíduos seja gerada aleatoriamente para o problema de configuração de redes das figuras 3.1 e 3.2. Na tabela 3.1, apresentam-se os *strings* gerados e as configurações correspondentes.

Obviamente, cada configuração resulta num determinado valor de perdas elétricas, o que permite o cálculo da função de avaliação correspondente. É interessante notar que as configurações relativas aos indivíduos 3 e 5 da tabela 3.1 correspondem a soluções não viáveis do problema, pois a primeira apresenta blocos de carga desconexos (restrição de balanço de demanda não atendida para os blocos 3 e 4), e a segunda conta com a existência de malhas (restrição de radialidade não atendida: malha SE1-Bloco1-Bloco3-Bloco4-Bloco2-SE1). No capítulo 4, ficará claro que a codificação adotada neste exemplo ilustrativo pode realmente levar a muitas configurações com ilhas (barras desconexas) ou malhas, e que este inconveniente pode ser evitado através de outro tipo de codificação dos *strings*.

Tabela 3.1 – População Inicial e Configurações Correspondentes

Indivíduo	String	Configuração Correspondente												
1	<table border="1"> <tr> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> <td>5</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> </table>	1	2	3	4	5	6	1	0	1	1	0	1	
1	2	3	4	5	6									
1	0	1	1	0	1									
2	<table border="1"> <tr> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> <td>5</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> </table>	1	2	3	4	5	6	1	0	0	1	1	1	
1	2	3	4	5	6									
1	0	0	1	1	1									
3	<table border="1"> <tr> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> <td>5</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> </table>	1	2	3	4	5	6	1	0	0	1	1	0	
1	2	3	4	5	6									
1	0	0	1	1	0									
4	<table border="1"> <tr> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> <td>5</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> </table>	1	2	3	4	5	6	0	1	1	1	0	1	
1	2	3	4	5	6									
0	1	1	1	0	1									
5	<table border="1"> <tr> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> <td>5</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> </table>	1	2	3	4	5	6	1	1	0	1	1	1	
1	2	3	4	5	6									
1	1	0	1	1	1									

3.2.2 Avaliação da População – The fitness function

Conforme visto ao longo deste capítulo, é intuitivo pensar que quanto maior for a função de avaliação, mais ajustado um determinado indivíduo vai estar com relação às características desejadas. Na realidade, pelo modo de funcionamento do operador de reprodução, que será visto no item seguinte, a função de avaliação deve também ser um índice de mérito não negativo.

No caso de problemas de otimização, o objetivo de maximizar ou minimizar determinado atributo, que é função das variáveis do problema, deve ser mapeado na função de avaliação. Obviamente,

diferentes formas de mapeamento levarão a diferentes características de convergência e direcionamento da busca da solução ótima, ou seja, de desempenho do AG, como ficará mais claro ao longo deste trabalho.

Para o exemplo das figuras 3.1 e 3.2, poder-se-ia adotar várias funções de avaliação para o mapeamento do objetivo de minimização de perdas elétricas na rede. Sendo as perdas elétricas do indivíduo i representadas por $perdas_i$, então duas possíveis opções para a função de avaliação, $f_{aval,i}$, seriam:

$$f_{aval,i} = \frac{perda_{max} - perdas_i}{perda_{max} - perdas_{min}} \quad (3.1)$$

$$f_{aval,i} = \frac{perda_{min}}{perdas_i} \quad (3.2)$$

onde $perda_{max}$ e $perda_{min}$ representam valores máximo e mínimo, de referência, das perdas na rede. A opção (3.1) resulta sempre positiva, desde que seja garantido que as perdas na rede elétrica não excedam $perda_{max}$. Já a opção (3.2) é sempre positiva e, obviamente, a alternativa ótima terá função de avaliação tão mais próxima de 1 quanto mais próximo do ótimo for o valor de $perda_{min}$. A figura 3.5 ilustra as diferenças dessas duas opções, quando as funções de avaliação correspondentes são dispostas graficamente em relação às perdas elétricas na rede.

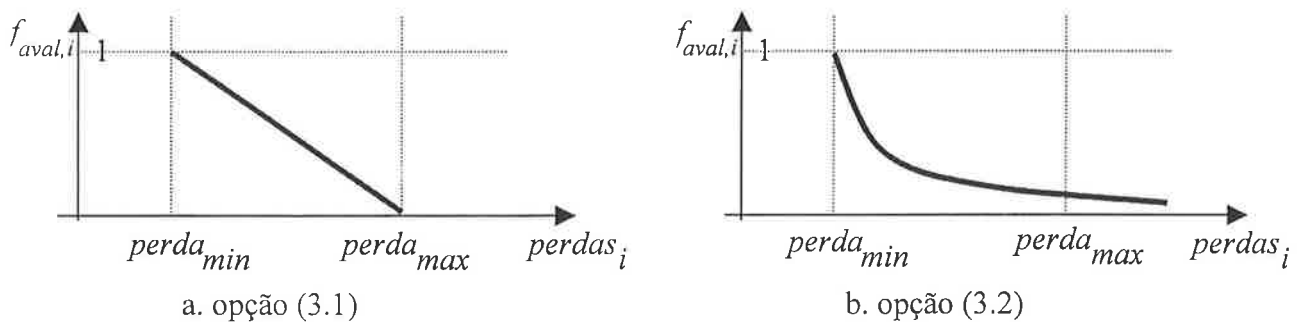


Fig. 3.5 – Opções de função de avaliação

É interessante notar que nem sempre a função de avaliação deve ser estabelecida simplesmente com base na função objetivo do problema real sob análise, como é em geral o caso de problemas de otimização de função sem existência de restrições. Porém, na maioria dos problemas práticos e, em

particular, no problema objeto deste trabalho (cfr. Cap. 2), um conjunto de restrições deve ser satisfeito. Uma maneira para abordar o problema seria simplesmente avaliar, para um dado indivíduo, se existem violações de restrições; em caso afirmativo, a função de avaliação seria feita igual a zero e, em caso negativo, esta não seria modificada. Segundo [41], este método é desaconselhável em problemas altamente restritos, onde a determinação de uma solução viável já é extremamente difícil de ser obtida (em geral, problemas de otimização do tipo PLIM e, em particular, problemas de configuração de redes, podem ser considerados dentro desta categoria). Nestes casos é importante levar em consideração a informação contida, até mesmo nas soluções não viáveis para que, no processo de evolução do AG, estas sejam utilizadas (no item 3.2.4 um exemplo ilustrativo deste fato é explicitamente mostrado). A forma mais usual para abordar este ponto é o de degradar a função de avaliação; tal degradação deverá ser tanto maior quanto maior for a transgressão de restrições determinada.

Métodos de penalização [42] realizam esta degradação na função objetivo. Nestes, o problema de minimização com restrições é transformado em um problema sem restrições associando-se uma penalização (ou custo) a cada violação de restrições e incorporando-se a soma destes custos ao valor da função objetivo.

Seja o problema de minimização:

$$\begin{aligned} \min \quad & z(\mathbf{x}) \\ \text{s.a.} \quad & h_j(\mathbf{x}) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \\ & \mathbf{x} - \text{vetor de } m \text{ variáveis} \end{aligned} \quad (3.3)$$

No método das penalidades, define-se uma função objetivo auxiliar $z'(\mathbf{x}, r)$ que é dada por:

$$z'(\mathbf{x}, r) = z(\mathbf{x}) + r.P(\mathbf{x}) \quad (3.4)$$

onde $P(\mathbf{x})$ é uma função penalidade e r é o coeficiente de penalidade. Obviamente, a função penalidade é positiva quando restrições são violadas e nula quando todas as restrições são atendidas. Uma possível função penalidade, muito utilizada, é a seguinte:

$$P(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^n \left\{ \max[0, h_j(\mathbf{x})] \right\}^k \quad (3.5)$$

onde k é um expoente positivo e o operador max resulta na consideração da restrição j na penalidade somente quando esta é positiva.

Outro método alternativo para consideração das restrições, que é uma contribuição específica deste trabalho, será visto no capítulo 4.

Do exemplo ilustrativo das figuras 3.1 e 3.2, pode-se entender que a função de avaliação não deve ser estabelecida tão somente a partir das perdas elétricas, mesmo que não sejam levadas em consideração no modelo de reconfiguração de redes as restrições de carregamento e tensão. Por exemplo, na tabela 3.1, a configuração correspondente ao indivíduo número 3 apresenta blocos que não foram supridos, o que corresponde a perdas elétricas menores em relação a uma solução viável, que atende a restrição de balanço de demanda, pelo fechamento de qualquer uma das chaves abertas; desta forma, nota-se a necessidade de alguma penalização na função de avaliação, o que será explorado mais adiante neste trabalho. Também, a configuração relativa ao indivíduo número 5 resulta em malha; as perdas elétricas provavelmente resultam menores do que com a abertura de qualquer uma das chaves fechadas, porém consiste em uma violação do modo de operação da rede de distribuição. Neste caso também, alguma penalização deve ser imposta à função de avaliação, de modo a levar o AG a determinação de configurações viáveis e de mínimas perdas.

Um outro ponto que merece destaque é de como AGs podem tratar problemas com múltiplos objetivos. De acordo com o método explicitado em [41, 43] o AG é modificado para a determinação de soluções não dominadas, ou pelo menos grande parte do conjunto correspondente. Neste método, a população de indivíduos é dividida em um número de sub-populações igual ao número de objetivos; cada sub-população é avaliada por função consistente com a respectiva função objetivo; porém os operadores genéticos são aplicados à toda população (por exemplo, dois indivíduos de sub-populações distintas podem ser submetidos ao operador cruzamento). Este método não será explorado neste trabalho, mas constitui-se numa linha de pesquisa interessante para ulteriores desenvolvimentos.

Conforme [3], a maioria dos métodos para o tratamento de problemas com múltiplos objetivos recaem em uma série de problemas de um único objetivo, independentemente de como o tomador

de decisão articula suas preferências. O que é interessante destacar é que o problema não necessita mais apresentar uma formulação de PLIM equivalente, dado que AGs tratam, indiretamente através da função de avaliação, funções objetivo não lineares. Por exemplo, o método das utilidades (*multi-attribute utility function*), que é um método de estabelecimento de preferências a priori, parte de uma função utilidade que pode ser entendida como um super-objetivo que agrega todos os demais [3]; tal função objetivo, não necessariamente linear, serve para definir a função de avaliação do AG. No capítulo 4, este ponto será novamente abordado para os problemas de configuração de redes.

3.2.3 Reprodução da População

O processo de reprodução tem por objetivo copiar *strings* ou indivíduos de uma geração para a outra, de modo que aqueles indivíduos mais ajustados tenham maior probabilidade de se reproduzirem nas gerações futuras. Este operador tende, desta forma, a emular o que acontece na natureza, na sobrevivência dos mais aptos de uma geração para outra, conforme a teoria de seleção natural de Darwin. Ser apto, no ambiente artificial de AGs, consiste simplesmente no indivíduo apresentar alto valor de função de avaliação, ou seja, estar o mais ajustado possível com respeito às características desejadas. No caso do exemplo ilustrativo das figuras 3.1 e 3.2, seria aquele indivíduo (e configuração correspondente) que resulta na minimização das perdas elétricas, atendendo as restrições do problema.

Em AGs, este operador pode ser implementado de várias formas, mas aqui é escolhido o método baseado em roleta [41]. Neste método, cada indivíduo ocupa uma fatia da roleta que é proporcional ao seu ajuste ao problema, isto é, proporcional à função de avaliação. Assim, ao girar a roleta, a probabilidade de cada indivíduo ser selecionado será diretamente proporcional à função de avaliação. A figura 3.6 ilustra o procedimento, porém através de geração de número aleatório entre 0 e 1, isto é, através da função *RAND*, que representa mais fielmente a implementação em computador. Tendo-se em vista a manutenção de números de indivíduos na nova população, este procedimento de sorteio é realizado tantas vezes quanto for o número de indivíduos da população. Nada impediria dos AGs trabalharem com número de indivíduos variáveis ao longo das gerações mas, no algoritmo básico aqui descrito, o tamanho da população é mantido fixo.

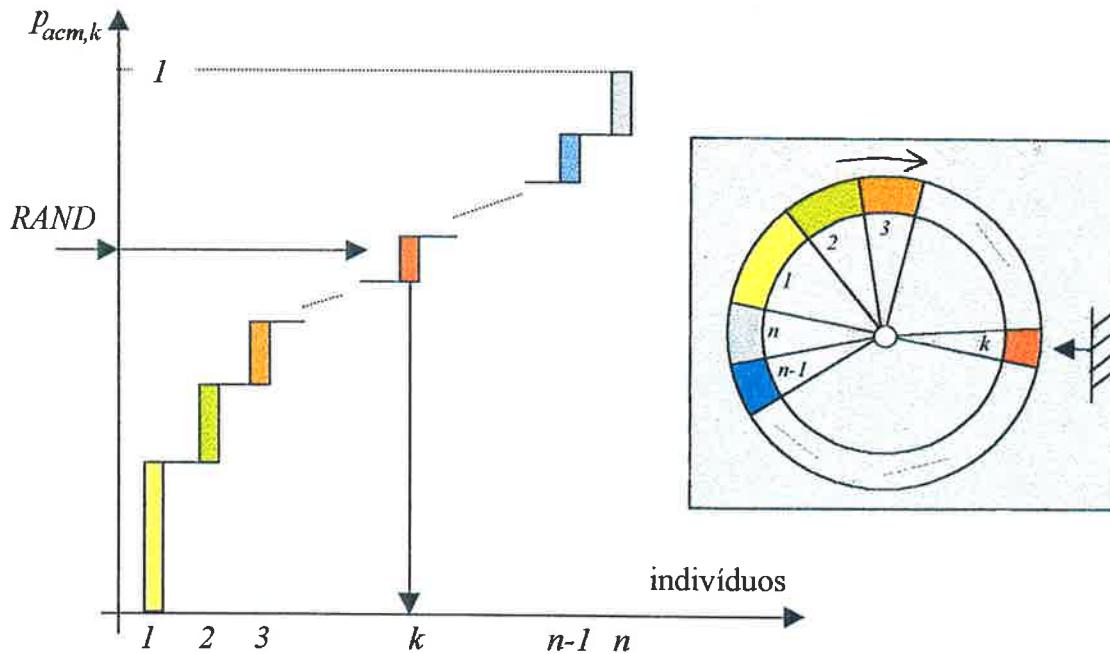


Figura 3.6 – Seleção de indivíduos pelo método da roleta

Na figura 3.6, no eixo das ordenadas, são dispostos os valores das funções de avaliação acumuladas e normalizadas pela respectiva soma, de modo que cada indivíduo contribua com um comprimento proporcional à sua probabilidade. A probabilidade acumulada de um indivíduo k é dada pela seguinte expressão:

$$P_{acm,k} = \frac{\sum_{j=1}^k f_{aval,j}}{\sum_{j=1}^n f_{aval,j}} \quad (3.6)$$

O procedimento acima garante que aqueles indivíduos mais ajustados tenham maior probabilidade de serem reproduzidos na geração posterior. Nota-se que existe, neste processo de reprodução, uma total dependência na definição da função de avaliação para o problema que está sendo tratado pelo AG.

Diferenças altas entre os valores na função de avaliação podem levar à convergência prematura do algoritmo, sem ser encontrada a solução ótima, o que é facilmente explicado pelo método de reprodução, que privilegia aqueles indivíduos mais ajustados. Este fato pode ocorrer principalmente no início do processo em AGs com populações pequenas, quando é comum ocorrerem poucos indivíduos muito bem avaliados e muitos indivíduos pouco ajustados.

Outra situação que pode ocorrer é mais adiante no processamento do algoritmo, em gerações mais avançadas quando, apesar de existir diversidade na avaliação de indivíduos da população, os valores médio e máximo da função de avaliação naquela população são muito próximos; neste caso, os indivíduos com valor médio ou máximo têm praticamente o mesmo número de cópias nas gerações futuras e o processo de busca torna-se, como afirma [41], “um vagar aleatório entre indivíduos medíocres”.

Um método que contorna os dois problemas expostos acima, no início do processo e em gerações mais avançadas, é denominado de normalização da função de avaliação. Várias maneiras de normalização podem ser propostas, mas neste trabalho apenas a normalização linear é considerada. Para tanto, previamente ao operador de reprodução, modifica-se a função de avaliação pela seguinte transformação:

$$f'_{aval,i} = a \cdot f_{aval,i} + b \quad (3.7)$$

O cálculo dos coeficientes a e b , conforme ilustrado na figura 3.7, é realizado para cada população/geração de modo a garantir que:

- os valores médios de f_{aval} e f'_{aval} sejam os mesmos;
- a relação entre os valores máximo e médio de f'_{aval} seja dada por um valor pré-definido (C_{mult}).

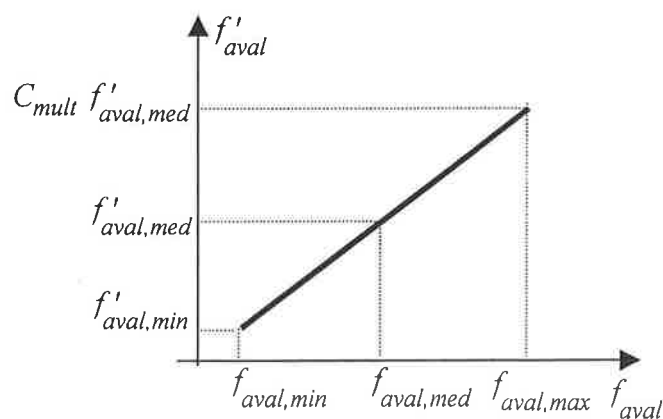


Figura 3.7 – Normalização da função de avaliação

Deve-se notar que, no processo exposto de cálculo dos coeficientes, quando os valores máximo e médio de f_{aval} tornam-se muito próximos, existe a possibilidade do valor mínimo de f'_{aval} resultar negativo, o que acarretaria problemas no operador de reprodução; neste caso, os valores médios de f_{aval} e f'_{aval} são mantidos iguais, porém a imposição da relação entre valores máximo e médio de f_{aval} é descartada e o valor mínimo de f'_{aval} é feito igual a zero. Em geral, esta imposição não provoca problemas, pois ocorre em gerações mais avançadas, quando o algoritmo já está em direção à convergência.

3.2.4 Cruzamento e Mutação

Conforme o diagrama de blocos do AG básico na figura 3.3, depois da operação de reprodução sobre a população em uma dada geração, são executados os operadores genéticos de cruzamento e mutação.

O operador cruzamento opera sobre pares de *strings* escolhidos aleatoriamente. Obviamente, estes pares são escolhidos a partir dos indivíduos gerados pelo operador de reprodução. A partir do par de *strings*, em particular os indivíduos *i* e *j*, a operação de cruzamento pode ser realizada de várias formas mas, no algoritmo básico aqui adotado, ela será realizada pelo procedimento descrito a seguir, conforme figura 3.8.

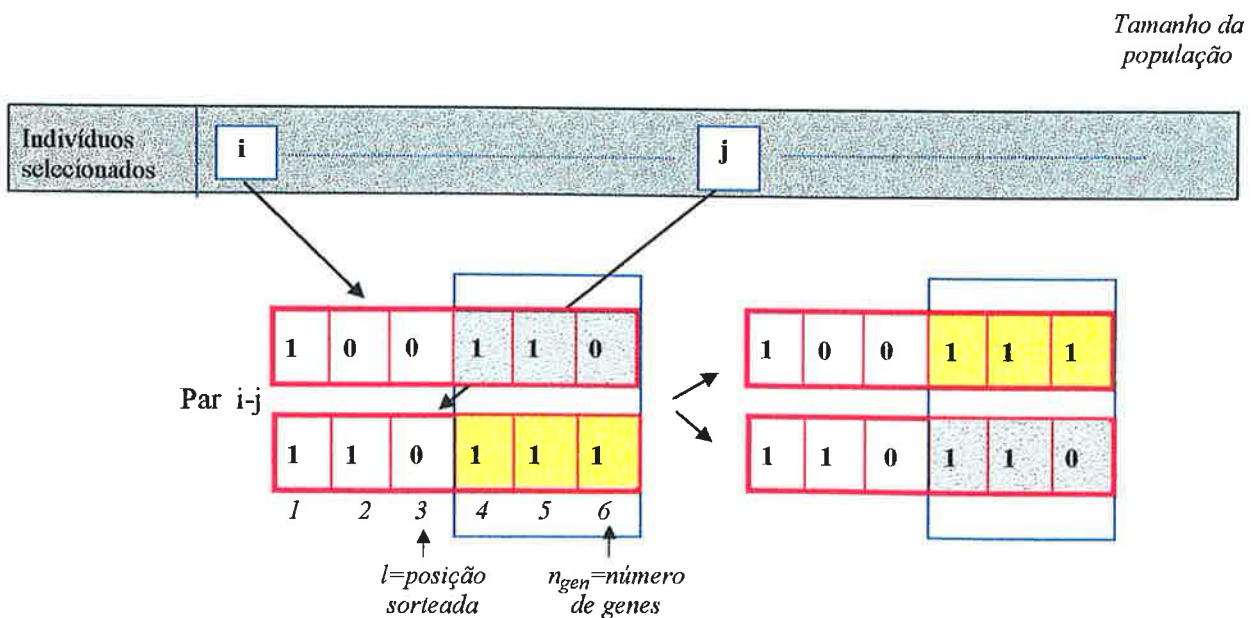


Fig. 3.8 – Operador cruzamento

- Gera-se aleatoriamente um *locus*, posição de gene, identificada por l , entre 1 e $n_{gen}-1$;
- Trocam-se os valores dos *bits* (ou alelos) dos dois *strings*, entre as posições $l+1$ e n_{gen} .

Obviamente, o sorteio do par de *strings* i e j na população e o sorteio da posição l dos *strings*, com distribuições uniformes, são facilmente implementados em computador, a partir da função *RAND*.

Nem todos os pares de indivíduos selecionados passam pela operação de cruzamento. Isto é controlado, em AGs, através de um valor de probabilidade fornecido a priori, denominado aqui de taxa de cruzamento, p_c . Ou seja, uma certa porcentagem dos indivíduos na nova população são simplesmente copiados, sem ocorrência de trocas de informações (material genético) entre elementos da população. Em geral, por experiência prática, esta taxa é mantida entre 0,6 e 0,8¹; porém tal valor poderia ser pesquisado para cada problema específico.

No exemplo da figura 3.8, o par de indivíduos 3 e 5, quando submetido ao operador cruzamento, cria dois novos indivíduos para a nova geração, denominados $(3 \times 5)_a$ e $(3 \times 5)_b$. Tais indivíduos, e codificações correspondentes, são representados na tabela 3.2. É interessante notar o fato dos dois indivíduos, depois de decodificados, resultarem em soluções viáveis, com relação às restrições de radialidade e balanço de demanda (todos os blocos são atendidos, isto é, rede conexa). Nota-se claramente que a troca de material genético pode ser bastante produtiva, denotado neste caso particular por viabilizar as configurações relativas aos dois indivíduos gerados. Na realidade, durante o procedimento, inúmeras tentativas de trocas são realizadas pelo operador cruzamento na busca por indivíduos cada vez mais ajustados.

Os operadores de reprodução e cruzamento representam grande parte do sucesso de AGs. Porém, utiliza-se também, no algoritmo básico, o operador genético de mutação. De acordo com [41]:

“... apesar da reprodução e cruzamento efetivamente buscarem e recombinarem noções existentes, tais operações podem tornar-se por demais zelosas e resultarem na perda de algum material genético importante em determinado locus, ... que pode ser recuperado através do operador de mutação”.

¹ Sua implementação é simples: basta chamar a função *RAND*, e comparar o valor gerado com a taxa de cruzamento; se for menor ou igual a p_c , a operação de cruzamento é realizada; caso contrário, o par é mantido intacto.

Tabela 3.2 – Indivíduos resultantes dos operadores cruzamento e mutação, e suas configurações

Indivíduo	String	Configuração Correspondente												
(3x5) _a	<table border="1"> <tr> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> <td>5</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> </table>	1	2	3	4	5	6	1	0	0	1	1	1	
1	2	3	4	5	6									
1	0	0	1	1	1									
(3x5) _b	<table border="1"> <tr> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> <td>5</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> </table>	1	2	3	4	5	6	1	1	0	1	1	0	
1	2	3	4	5	6									
1	1	0	1	1	0									
(3) ₆ ^o	<table border="1"> <tr> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> <td>5</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> </table>	1	2	3	4	5	6	1	0	0	1	1	1	
1	2	3	4	5	6									
1	0	0	1	1	1									
(5) ₆ ^o	<table border="1"> <tr> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> <td>5</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> </table>	1	2	3	4	5	6	1	1	0	1	1	0	
1	2	3	4	5	6									
1	1	0	1	1	0									

Em AGs, o operador de mutação simplesmente altera, ocasionalmente, o valor de um *bit* de um *string* da nova população criada a partir dos dois outros operadores. Ou seja, se o valor do *bit* vale 1, o operador o altera para 0, e vice-versa.

A probabilidade de mutação em um dado *bit* é também estipulada a priori, e será designada por p_m . Obviamente, sua implementação em computador também é realizada pela função *RAND*, analogamente a aplicação da probabilidade de cruzamento a um dado par de *strings*¹. Valores práticos desta taxa estão em torno de 0,001, ou seja, 1 mutação a cada milhar de *bits*.

A título de exemplo, a ocorrência de mutação no 6º *bit* do indivíduo 3 ou do indivíduo 5 da tabela 3.1, modifica-os para os indivíduos designados por $(3)_{6^o}$ e $(5)_{6^o}$, respectivamente, apresentados na tabela 3.2. Em particular, as configurações correspondentes tornam-se viáveis; no primeiro caso pelo fechamento da chave *Ch6* e no segundo caso pela sua abertura.

3.3 Exemplos ilustrativos

3.3.1 Considerações Gerais

Neste item apresentam-se exemplos ilustrativos para avaliação da potencialidade de AGs na modelagem de problemas de configuração de redes. Mesmo em problemas bastante simplificados, mostra-se que os AGs permitem o tratamento de todas as características necessárias do problema, em particular, a consideração de funções objetivo não lineares.

Para ilustrar esse potencial, são utilizados dois exemplos. O primeiro, em um pequeno sistema de distribuição, no qual deseja-se minimizar o valor das perdas elétricas. O interesse deste exemplo está no fato que existe solução direta fácil para o problema, o que permite comparação da utilização dos métodos baseados em programação linear, busca heurística e algoritmos genéticos. Neste exemplo, a codificação do AG para o problema é bastante distinta da apresentada nos itens anteriores, pois trabalha diretamente sobre as variáveis contínuas de fluxo de potência nas ligações da rede.

Um segundo exemplo refere-se a aplicação dos diversos modelos ao problema de planejamento de sistemas de distribuição, ainda numa rede de dimensões pequenas. Neste modelo, a codificação do AG é muito parecida à mostrada nos itens anteriores, pois trabalha diretamente com as variáveis de decisão do problema (correspondentes às variáveis binárias dos modelos baseados em programação matemática), e não com as variáveis contínuas (por exemplo, fluxo de potência e queda de tensão), o que já direciona para o modelo a ser melhor elaborado no próximo capítulo.

3.3.2 Exemplo 1 – Minimização das Perdas Elétricas

A figura 3.9 ilustra a porção de uma rede de distribuição na qual se deseja minimizar o valor das perdas elétricas. O problema básico é o de determinação dos fluxos de potência que devem fluir pelas ligações 1 e 2 (provenientes dos sub-sistemas $S1$ e $S2$, respectivamente), para que as perdas elétricas no sistema sejam minimizadas. Admite-se que a demanda D no nó 1 possa ser dividida de acordo com os fluxos provenientes das duas ligações.

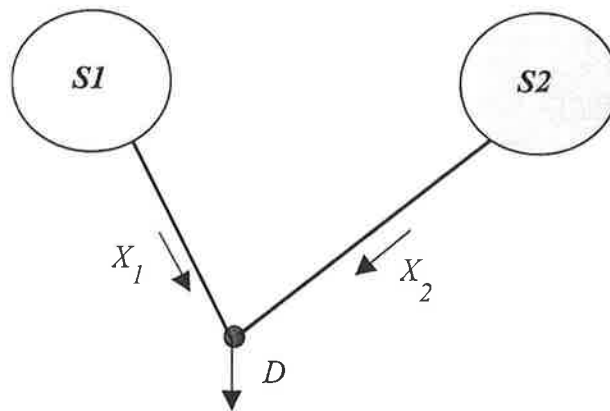


Fig. 3.9 - Rede para o Exemplo Ilustrativo 1

Assumindo-se também que os fluxos nas ligações 1 e 2 sejam não limitados, o problema pode então ser formulado conforme (3.8) a seguir:

$$\begin{aligned} \min p_{tot} &= r_1 X_1^2 + r_2 X_2^2 \\ \text{s.a.} \quad X_1 + X_2 &\geq D \end{aligned} \quad (3.8)$$

onde:

p_{tot} - perdas totais na porção de rede em análise;

r_1, r_2 - resistências ôhmicas nas ligações 1 e 2, respectivamente.

O problema (3.8) é bastante simples, e de resolução direta. Notando que a inequação pode ser escrita como uma igualdade pelo problema ser de minimização, tem-se que $X_2 = D - X_1$, donde:

$$\min p_{tot} = r_1 X_1^2 + r_2 (D - X_1)^2 = (r_1 + r_2) X_1^2 - 2r_2 D X_1 + r_2 D^2 \quad (3.9)$$

e, a partir de $\frac{dp_{tot}}{dX_1} = 2(r_1 + r_2)X_1 - 2r_2D = 0$, o ponto de mínimas perdas resulta:

$$X_1 = \frac{r_2}{r_1 + r_2}D; \quad X_2 = \frac{r_1}{r_1 + r_2}D \quad \text{e} \quad p_{tot} = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}D^2 \quad (3.10)$$

A formulação (3.8) não pode ser resolvida por programação linear, pois a função objetivo é não linear. Existe então a necessidade de linearização desta função, por exemplo utilizando linearização por partes (*piecewise linearisation*), conforme ilustrado na figura (3.10). Na aproximação 1, tem-se aproximação por um segmento de reta e $p_{aprox1} = c_1 \cdot X$, $c_1 = \bar{p} / \bar{X}$. Na aproximação 2, tem-se linearização por dois segmentos e ainda:

$$p_{aprox2} = c'X' + c''X'', \quad c' = \bar{p} / \bar{X}, \quad c'' = (p_{max} - \bar{p}) / (X_{max} - \bar{X}) \quad (3.11)$$

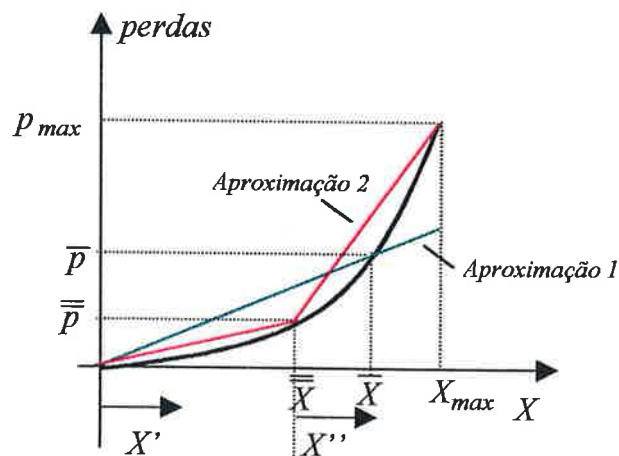


Fig. 3.10 – Perdas e sua linearização

Na aproximação 1, o problema (3.8) pode ser assim escrito: $\min c_1 X_1 + c_2 X_2, \text{ s.a. } X_1 + X_2 \geq D$. Neste caso, pela resolução gráfica da figura 3.11, nota-se o erro que se incorre utilizando-se o modelo linear. Neste caso, a solução recai para $X_1 = D$ ou $X_2 = D$, dependendo se c_1 é, respectivamente, menor (que é o caso da figura 3.11) ou maior que c_2 .

Obviamente, com a segunda aproximação o erro deve diminuir, porém com a necessidade de serem utilizadas mais variáveis de fluxo de potência por ligação. Não é possível a visualização gráfica da segunda aproximação; mas ela será ilustrada com um exemplo numérico a ser apresentado mais

adiante neste item.

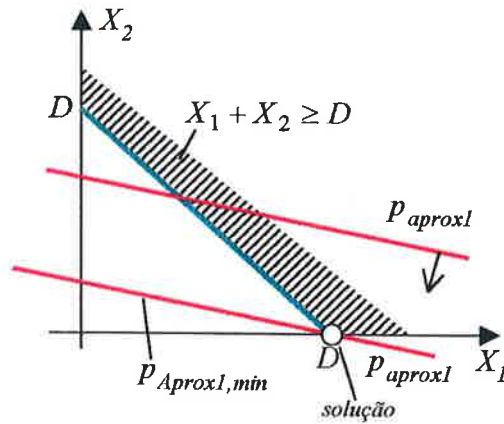


Figura 3.11 – Resolução gráfica – aproximação 1

Para a modelagem do problema utilizando-se AG, deve-se inicialmente estabelecer-se a codificação dos *strings* que representarão uma possível alternativa de solução do problema. Deve-se notar que os dois parâmetros principais do problema, formulado em (3.8), são as variáveis contínuas de fluxos nas ligações. As variáveis contínuas podem ser relacionadas ao *string* de um indivíduo de várias formas. A maneira adotada aqui é ilustrada na figura 3.12.

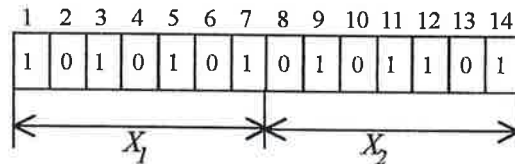


Fig.3.12 – Codificação para o Exemplo 1

Dado um indivíduo i , e seu *string* correspondente, os valores de $X_{1,i}$ e $X_{2,i}$ podem ser decodificados conforme (3.12) a seguir, onde $bit_{i,k}$ corresponde ao valor do *bit* na posição k do *string* i :

$$X_{1,i} = \frac{(2^0 bit_{i,1} + 2^1 bit_{i,2} + 2^2 bit_{i,3} + 2^3 bit_{i,4} + 2^4 bit_{i,5} + 2^5 bit_{i,6} + 2^6 bit_{i,7})}{(2^7 - 1)} X_{\max} \quad (3.12)$$

$$X_{2,i} = \frac{(2^0 bit_{i,8} + 2^1 bit_{i,9} + 2^2 bit_{i,10} + 2^3 bit_{i,11} + 2^4 bit_{i,12} + 2^5 bit_{i,13} + 2^6 bit_{i,14})}{(2^7 - 1)} X_{\max}$$

Para a escolha da função de avaliação, utiliza-se o método das penalidades, cfr. item 3.2.2. Assim, impõe-se um 'custo adicional' na função objetivo, f_{obj} , a ser minimizada, ou seja:

$$f_{obj,i} = r_1 X_{1,i}^2 + r_2 X_{2,i}^2 + r \left\{ \max \left[0, (D - X_{1,i} - X_{2,i}) \right] \right\}^2 \quad (3.13)$$

onde r é um fator multiplicativo da penalidade. O valor do desvio da restrição corresponde ao montante $\max \left[0, (D - X_{1,i} - X_{2,i}) \right]$, que é obviamente considerado somente quando a carga D não é atendida, ou seja a restrição de balanço de demanda não é satisfeita. A função de avaliação de um dado indivíduo i , para o exemplo em questão, é escolhida como sendo: $f_{aval,i} = 100 / f_{obj,i}$.

Para comparar os modelos, é interessante a análise de um caso numérico de aplicação. Para tanto, assumem-se os seguintes dados: $D=0,08$ pu; $X_{\max}=0,08$ pu; $r_1=1,0$ pu e $r_2=1,5$ pu.

A aplicação de (3.10) resulta na solução exata que minimiza as perdas elétricas na rede, a ser usada como referência de comparação: $X_1 = 0,048$ pu; $X_2 = 0,032$ pu e $p_{tot} = 0,00384$ pu.

Na modelagem por programação linear, aproximação 1, admitindo-se $\bar{X} = X_{\max} / \sqrt{2}$ [17, 24] resultam os custos das ligações 1 e 2 $c_1 = (\sqrt{2}/2) r_1 X_{\max} = 0,05657$ pu e $c_2 = 0,08485$ pu. Sendo o custo da ligação 1 inferior ao da ligação 2, resulta $X_1 = 0,08$ pu; $X_2 = 0$ pu e $p_{tot} = 0,0064$ pu. Na aproximação 2, admite-se $\bar{\bar{X}} = X_{\max} / 2$, que resulta nos custos unitários de cada intervalo de linearização, para as duas ligações iguais a $c'_1 = 0,04$ pu; $c''_1 = 0,12$ pu; $c'_2 = 0,06$ pu; $c''_2 = 0,18$ pu. A solução do problema de programação linear abaixo:

$$\begin{aligned} \min & c'_1 X'_1 + c''_1 X''_1 + c'_2 X'_2 + c''_2 X''_2 \\ \text{s.a.} & X'_1 \leq 0,04; X''_1 \leq 0,04 \\ & X'_2 \leq 0,04; X''_2 \leq 0,04 \\ & X'_1 + X''_1 + X'_2 + X''_2 \geq 0,08 \end{aligned} \quad (3.14)$$

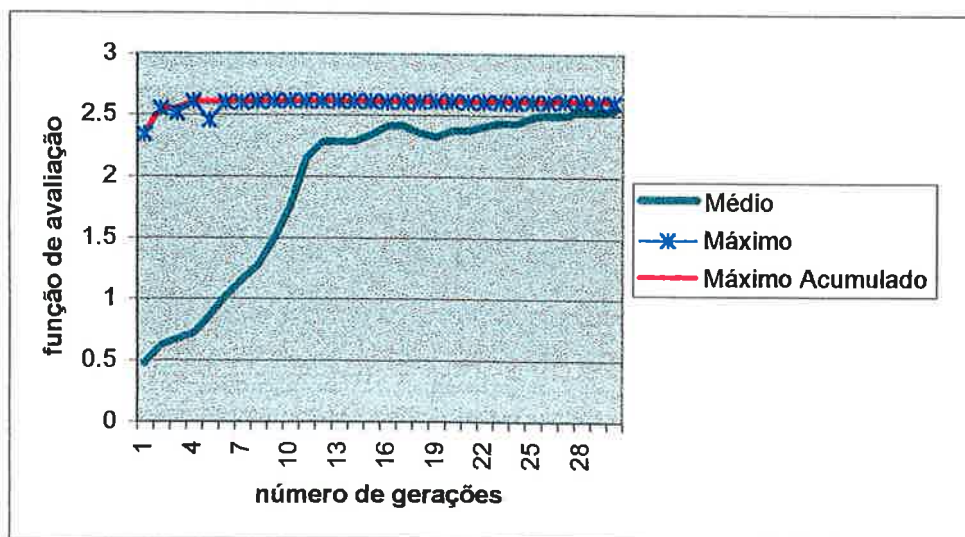
resulta na solução: $X'_1 = 0,04$ pu; $X''_1 = 0$ pu; $X'_2 = 0,04$ pu e $X''_2 = 0$ pu, ou seja, $X_1 = 0,04$ pu, $X_2 = 0,04$ pu e as perdas totais são iguais a $p_{tot} = 0,0040$ pu.

Para resolução deste exemplo numérico por AG, utilizou-se a codificação apresentada na figura 3.12. Os parâmetros básicos utilizados no algoritmo foram os seguintes:

- Taxa de cruzamento: $p_c=80\%$
- Taxa de mutação: $p_m=0,1\%$
- Tamanho da população: 150 indivíduos
- Número de gerações: 10

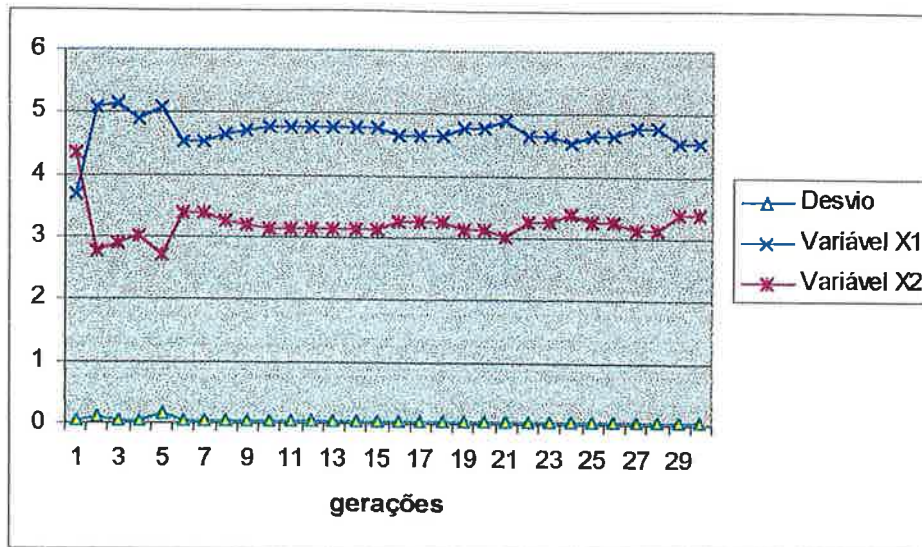
O AG foi implementado conforme diagrama de blocos da figura 3.3, resultando no desenvolvimento da função de avaliação conforme mostrado na figura 3.13a. Na figura 3.13b e 3.13c mostram-se a evolução dos valores das variáveis, o desvio no valor das restrições e as perdas mínimas para cada geração. É interessante notar que desvios nulos correspondem a soluções viáveis, pois o desvio é dado por $\max[0, (D - X_{1,i} - X_{2,i})]$, conforme eq. (3.13). A geração 5, em particular, apresenta perdas mínimas, como mostrado na figura 3.13c, porém a função de avaliação não é a máxima geral, pois o desvio de restrição nesta geração relativamente alto impõe a penalização, isto é, a solução não é viável (o que explica as perdas serem até menores que as determinadas na solução ótima).

Os resultados finais para a simulação do AG feita são $X_1=0,0479$ pu e $X_2=0,0315$ pu, com perdas totais de 0,00378pu.

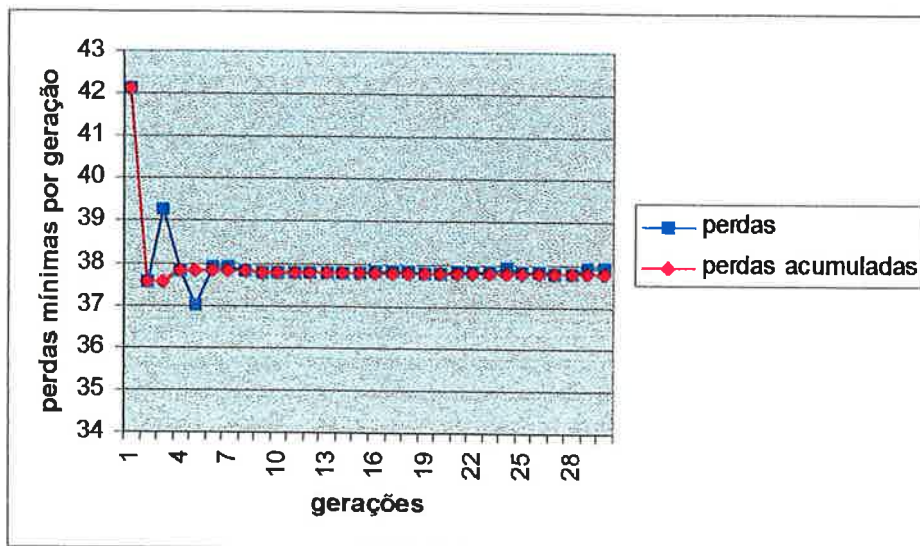


a. Acompanhamento da Função de Avaliação

Figura 3.13 (1/2) – Resultados para o Exemplo 1 por AG



b. Acompanhamento do Desvio na Restrição e Variáveis do Problema



c. Acompanhamento das perdas mínimas por geração

Figura 3.13 (2/2)– Resultados para o Exemplo 1 por AG

Na tabela 3.3 apresentam-se os resultados para os quatro métodos utilizados, quais sejam, o cálculo exato, os modelos de programação linear (aproximações 1 e 2) e o modelo baseado em AG.

Tabela 3.3 - Comparação dos modelos para resolução do Exemplo 1

Método Utilizado	Variável X_1		Variável X_2		Variável p_{tot}	
	(pu)	erro (%)	(pu)	erro (%)	(pu)	erro (%)
Exato	0,0480	0	0,0320	0	0,00384	0
PL – aproximação 1	0,0800	66,7	0,0000	100	0,00640	66,7
PL – aproximação 2	0,0400	16,7	0,0400	25,0	0,00400	4,2
AG	0,0479	0,2	0,0315	1,6	0,00378	1,6

Cabe salientar que o método de busca heurística apresentado no Capítulo 2 também não seria recomendado para a solução deste exemplo, que trata somente com as variáveis de fluxo de potência, e não com variáveis de decisão do tipo binárias. A aplicação da técnica de busca heurística, neste caso, resultaria numa solução idêntica ao caso de PL na aproximação 1 (ou alimenta a carga pela ligação 1 ou pela ligação 2 e, como o custo da ligação 1 é menor acabaria por escolher esta para ser utilizada).

3.3.3 Exemplo 2 – Minimização de Investimentos no Planejamento

O exemplo do item anterior tratou de um pequeno problema no qual os parâmetros considerados eram basicamente as variáveis de fluxo de potência. Neste segundo problema, analisa-se a parte de custo fixo dos problemas convencionais de configuração de redes, ou seja, aqueles custos que são provenientes de reforços no sistema.

Seja o sistema da figura 3.14, que deve ser instalado em uma área nova, isto é, onde não existe rede elétrica ou subestação. Nesta, devem ser minimizados os investimentos no sistema de distribuição a ser implantado. A única restrição é que as configurações possíveis devem respeitar o balanço de demanda, isto é, devem suprir todos os nós da rede, não resultando nós isolados na configuração final.

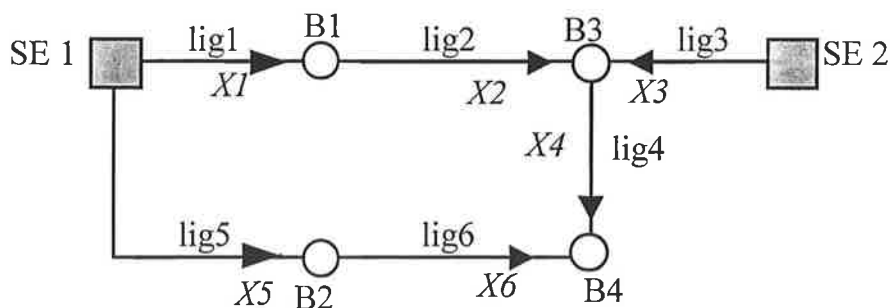


Fig. 3.14 – Sistema para o Exemplo 2

A formulação por programação linear inteira mista pode ser expressa, seguindo a formulação exposta no capítulo 2, como sendo:

$$\begin{aligned} \min C_f &= \min \left(\sum_{i=1}^6 C_i \delta_i + \sum_{j=1}^2 C_{s_j} \delta_{s_j} \right) \\ \text{s.a.} \quad X_1 - X_2 &= D_1 \\ X_5 - X_6 &= D_2 \\ X_2 + X_3 - X_4 &= D_3 \\ X_4 + X_6 &= D_4 \\ X_i - M\delta_i &\leq 0, \quad i = 1, \dots, 6 \\ X_1 + X_5 - M\delta_{s_1} &\leq 0 \\ X_3 - M\delta_{s_2} &\leq 0 \\ \delta_i, \delta_{s_j} &\in \{0, 1\} \end{aligned} \quad (3.15)$$

Assumindo-se os custos fixos (em unidades): $C_1 = 5, C_2 = 5, C_3 = 6, C_4 = 5, C_5 = 8, C_6 = 10, C_{s_1} = 100, C_{s_2} = 200$ e demandas unitárias ($D_i = 1pu$) em todos os nós, a solução do problema PLIM (3.15) resulta nas seguintes variáveis binárias: $\delta_1 = \delta_2 = \delta_4 = \delta_5 = \delta_{s_1} = 1$ e $\delta_3 = \delta_6 = \delta_{s_2} = 0$, com fluxos nas ligações: $X_1 = 3pu, X_2 = 2pu, X_4 = 1pu, X_5 = 1pu, X_3 = X_6 = 0$ e custo fixo total de 123 unidades, conforme ilustrado na figura 3.15.

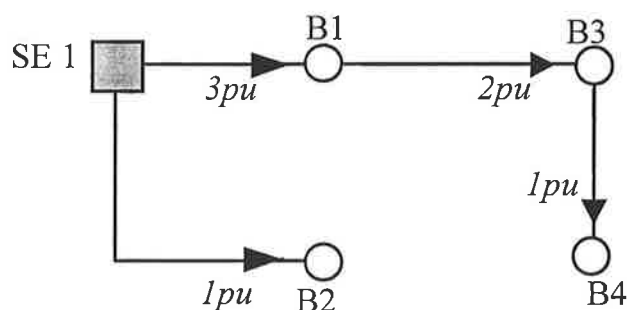


Fig. 3.15 – Solução Ótima para o Problema 2

É interessante notar que a utilização do procedimento de busca heurística com estratégia construtiva, do tipo “subida da encosta” (*hill climbing*) [11, 32], determina a solução ótima, apresentada na figura 3.15. A figura 3.16 ilustra a árvore de busca para o exemplo onde, em cada nó de decisão, opta-se pela alternativa de menor custo fixo (conforme representado pelos valores em itálico nos ramos da figura).

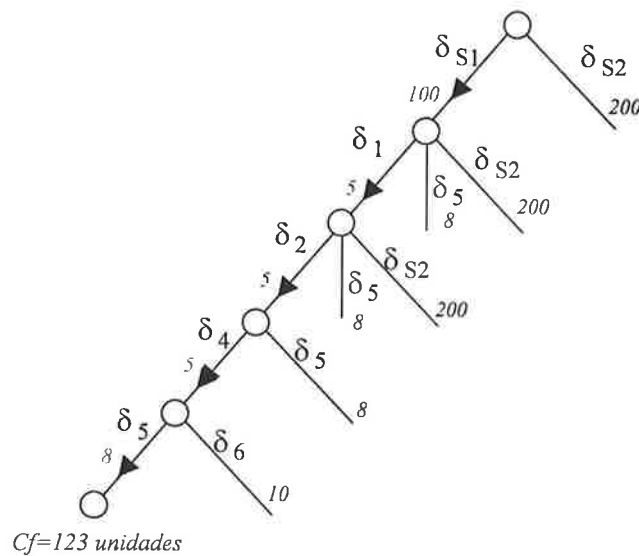


Fig. 3.16 – Resolução por busca heurística (*hill climbing* – estratégia construtiva)

A resolução deste mesmo problema, utilizando AG, deve partir de uma codificação do *string*, ou seja, associar um indivíduo da população a uma dada solução possível. A rede elétrica do exemplo, conforme fig. 3.14, tem exatamente a mesma característica topológica da rede exemplo da fig. 3.2, apresentada no início deste capítulo. Basta substituir as chaves (*Ch*) por trechos candidatos (*lig*) e blocos de carga por barras. A mesma codificação do *string*, com 6 *bits*, da fig. 3.1 se aplica para este problema. A cada posição do *string*, associa-se um trecho candidato; não é necessária a explícita consideração de posições para a instalação ou não das subestações candidatas, pois a correspondente instalação pode ser definida com base nas informações dos respectivos alimentadores: a subestação SE1 deve ser instalada se uma das ligações *lig1* ou *lig5* for selecionada e a subestação SE2 deve ser instalada se a ligação *lig3* for selecionada.

No sistema deste exemplo, dado um indivíduo *i*, para avaliação da restrição de balanço de demanda basta verificar se, na configuração correspondente:

- a – o número de trechos é não menor que o número de nós de carga do sistema, que é dado pela diferença entre o número total de nós e o número de SEs instaladas;
- b – todas as barras de carga da rede encontram-se conectadas por uma ligação;
- c – pelo menos uma subestação seja instalada.

As condições acima, facilmente verificáveis para um dado *string*, garantem que as barras de carga sejam todas atendidas. Caso contrário, aplica-se uma penalização à função objetivo do problema, ou seja:

$$f_{obj,i} = C_{f,i} + r \cdot penal_i \quad (3.16)$$

A penalização $penal_i$, para um dado indivíduo, é dada por:

- $penal = (n_{nos} - n_{ses} - n_{trechos})$, se a condição a acima não for satisfeita, com n_{nos} sendo o número total de nós do sistema, n_{ses} o número de subestações instaladas e $n_{trechos}$ o número de trechos instalados.
- $penal = (n_{btotal} - n_{bcon})$, se a condição b não for satisfeita, com n_{btotal} sendo o número total de barras de carga e n_{bcon} o número de barras de carga conectadas;
- $penal = 1$ se a condição c não for satisfeita.

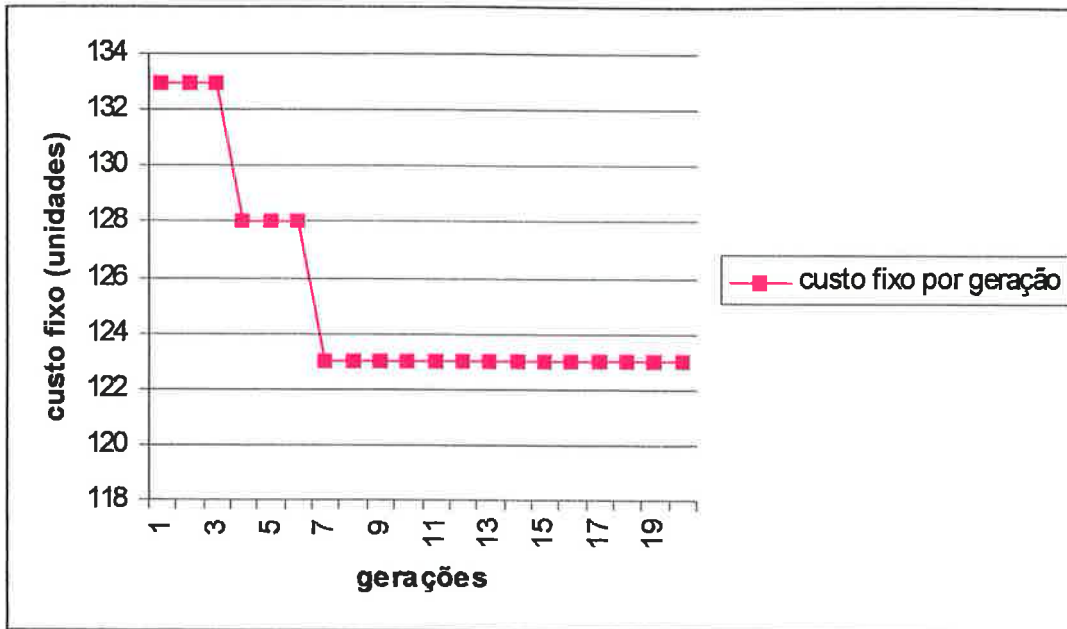
Finalmente, a função de avaliação é determinada da mesma forma que no exemplo 1, isto é,

$$f_{aval,i} = 100 / f_{obj,i} \cdot$$

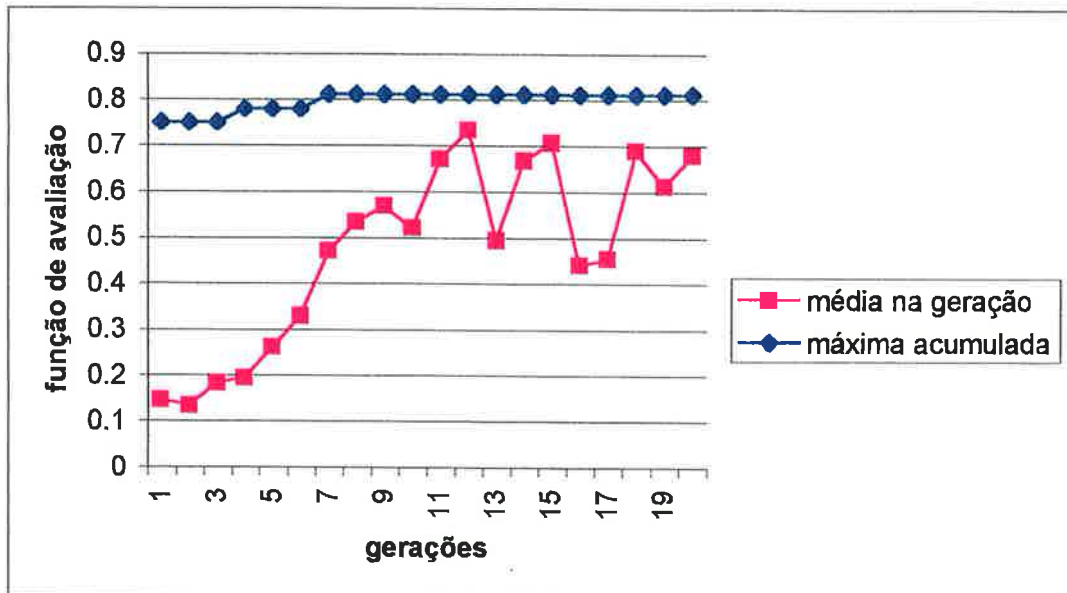
O AG foi simulado com os seguintes parâmetros:

- Taxa de cruzamento: $p_c = 80\%$
- Taxa de mutação: $p_m = 5\%$
- Tamanho da população: 20 indivíduos
- Número de gerações: 20
- Fator de penalização (r): 1000

Na figura 3.17a e 3.17b são apresentadas as evoluções do custo fixo e função de avaliação ao longo das gerações, com a solução ótima (custo fixo total igual a 123 unidades) sendo obtida na 7ª geração. O número de indivíduos por população foi forçosamente feito baixo pois, dada a pequena dimensão do problema, o sorteio da população inicial, com tamanho da população maior, resultaria na determinação do ótimo já na primeira geração.



a. Evolução da função objetivo



b. Evolução da função de avaliação

Figura 3.17 – Resultados para todas as gerações no Exemplo 2

Na tabela 3.4, apresentam-se os indivíduos / *strings*, com as correspondentes funções de avaliação para a primeira, 10ª e 20ª gerações.

Primeira Geração			10ª Geração			20ª Geração		
Indivíduo	String	faval,i	Indivíduo	String	faval,i	Indivíduo	String	faval,i
1	010110	0.089	1	100111	0.781	1	100111	0.781
2	011101	0.442	2	110111	0.752	2	110111	0.752
3	110000	0.024	3	110000	0.024	3	010111	0.781
4	001000	0.016	4	110011	0.781	4	110010	0.047
5	001111	0.075	5	010111	0.781	5	100111	0.781
6	010001	0.033	6	110011	0.781	6	110011	0.781
7	111011	0.299	7	110001	0.089	7	110111	0.752
8	111000	0.030	8	010111	0.781	8	010111	0.781
9	101111	0.299	9	110101	0.800	9	110011	0.781
10	100010	0.024	10	110111	0.752	10	100111	0.781
11	001001	0.031	11	110011	0.781	11	100111	0.781
12	001111	0.075	12	110111	0.752	12	000101	0.025
13	001001	0.031	13	110010	0.047	13	010101	0.050
14	101011	0.304	14	110111	0.752	14	110111	0.752
15	100001	0.032	15	110111	0.752	15	110110	0.813
16	111001	0.307	16	110111	0.752	16	110011	0.781
17	001101	0.045	17	000111	0.047	17	010111	0.781
18	011000	0.024	18	100111	0.781	18	100111	0.781
19	110111	0.752	19	110011	0.781	19	100111	0.781
20	001001	0.031	20	110011	0.781	20	100111	0.781
	Mínimo	0.016		Mínimo	0.024		Mínimo	0.025
	Máximo	0.752		Máximo	0.800		Máximo	0.813
	Médio	0.133		Médio	0.627		Médio	0.667

Tabela 3.4 – Strings e correspondentes funções de avaliação

3.3.4. Comentários Gerais

Apesar dos exemplos ilustrativos serem de pequena dimensão, eles demonstraram que os AGs constituem-se numa interessante técnica para a modelagem de problemas de configuração de redes. Conforme mencionado anteriormente, a geração (aleatória) de um indivíduo, que tem relação direta com uma possível configuração de rede de distribuição, através de uma decodificação previamente estabelecida, oferece enormes vantagens para esta nova ferramenta.

Talvez a maior vantagem a ser apontada é a possibilidade de serem simulados diversos programas de análise de redes para a avaliação de funções objetivo e correta representação de restrições do problema, bastante difíceis de serem modeladas por formulações baseadas em programação matemática.

Podem ser citadas as funções objetivo não lineares, como as perdas elétricas que, para um dado trecho, variam quadraticamente com o correspondente fluxo de potência e as funções objetivo que não podem ser escritas através de uma função explícita das variáveis. Por exemplo, quando a rede é formada por diferentes tipos de dispositivos de proteção e seccionamento, em alguns trechos da

rede, o cálculo da energia não distribuída, por exemplo, não é direto [44, 45]. Porém, pode ser considerado convenientemente em AGs.

Quanto as restrições do problema, podem ser citadas aquelas correspondentes à radialidade da rede e aquelas que envolvem os níveis de tensão ao longo do sistema de distribuição. Na maioria dos modelos baseados em programação matemática, principalmente quando simulando redes de dimensões reais, estas restrições não são consideradas durante o processo de otimização. A consideração destas restrições em AGs, conforme será explorado no próximo capítulo, é relativamente simples.

Capítulo 4

Configuração de Redes por Algoritmos Genéticos

4.1 Considerações Gerais

O problema de configuração de redes, exposto no capítulo 2, pode ser tratado por diversos métodos, alguns baseados em programação matemática e pesquisa operacional – como é o caso dos modelos formulados por PLIM – e outros através de técnicas de busca heurística.

Na primeira abordagem, a formulação PLIM (2.1) permite a modelagem de uma série de características do problema, com a função objetivo econômica aproximada através da linearização das perdas em componentes do sistema e com a consideração das restrições de balanço de demanda, quedas de tensão, limites de carregamento e tensão, sendo que uma condição necessária para a radialidade pode também ser imposta.

Diversos trabalhos mostraram que esta formulação pode ser estendida para o tratamento de problemas com múltiplos objetivos [3] e para o tratamento das incertezas do problema, através de programação matemática *fuzzy* [38, 67] e de programação matemática probabilística [5]. A principal dificuldade, quando são consideradas todas as opções de modelagem, é que as técnicas de solução de problemas PLIM não são suficientemente eficientes para o tratamento de sistemas reais de distribuição, que podem contar com centenas a milhares de nós e ligações, com elevado número de variáveis contínuas e inteiras na formulação.

Dentre os métodos para tratamento deste problema, com a determinação da solução ótima, podem ser citados aqueles baseados no método Simplex que, aliado a métodos como o branch-and-bound,

permitem a solução de problemas de dimensão relativamente pequena. Outro método para solução da formulação (2.1) foi proposto em [4, 10], utilizando a decomposição de Benders. Mostrou-se que tal técnica permite o tratamento do problema dinâmico (múltiplos estágios), subdividindo-se o problema em uma série de subproblemas de programação linear (PL), para cada estágio, e um problema de programação inteira pura (PI), que engloba todas as variáveis inteiras do problema. O processo é iterativo: o problema PI fornece, a cada iteração, um novo conjunto de variáveis de decisão; tais variáveis atualizam as formulações dos subproblemas PL e estes fornecem informação adicional para o problema PI, através de adição de novas restrições. O interessante deste método é que tem-se amplo controle da convergência do processo, ou seja, a informação quanto ao desvio máximo da solução ótima em cada iteração, o que permite a segurança de interromper o processo quando determinada tolerância é assegurada. Apesar de ser uma técnica muito interessante, existe a dificuldade inerente da solução repetitiva dos subproblemas PL e PI que podem levar a tempos de processamento muito altos, portanto limitando a dimensão das redes tratáveis com esta técnica.

Os métodos baseados em algoritmos de transporte podem, conjuntamente com procedimentos para o tratamento de custo fixo (por exemplo, métodos do tipo branch-and-bound), tratar de redes reais; no entanto a desvantagem destes métodos reside na limitação das restrições consideradas na formulação do problema. As soluções encontradas não são necessariamente radiais, o que em geral leva a um procedimento de radialização da rede posterior ao processo de otimização; este procedimento não só pode levar a um afastamento da solução ótima como também, em determinados casos, levar a soluções inviáveis (por exemplo, radialização provocando a violação de carregamento em determinado trecho de rede).

A segunda abordagem apresentada no capítulo 2 considera técnicas de busca heurística para o tratamento de problemas de configuração de redes. O interessante é que tais técnicas permitem a consideração de todos os aspectos de modelagem do problema, além de possibilitar o tratamento de funções objetivo não lineares. Em [11], mostrou-se que técnicas de busca pela melhor escolha podem levar a resultados bastante interessantes, principalmente em termos de esforços computacionais, uma vez que somente uma pequena porcentagem da árvore de decisão é explicitamente explorada durante o procedimento de busca. Uma outra vantagem deste método é que este tipo de enfoque pode ser incorporado a uma ferramenta (*shell*) que permite a fácil modelagem de problemas de decisão com restrições, em particular de todas as categorias de problemas de configuração de redes [28]. No entanto, a aplicação desta técnica resultou adequada para problemas de médio porte, limitando, de certa forma, a sua aplicação em redes com alto

número de variáveis, onde grande quantidade de chaves de manobra (e reforços candidatos, no caso do problema de planejamento) devem ser consideradas.

O capítulo 3 mostrou as bases de Algoritmos Genéticos, e exemplos ilustrativos demonstraram o seu potencial para aplicação ao problema de configuração de redes. A possibilidade de serem tratadas simultaneamente, em cada geração, um número muito grande de soluções possíveis e completas do problema, coloca esta técnica em um patamar único. Uma vez que são geradas soluções completas, estas podem ser testadas por técnicas de análise de redes já consagradas, e que podem ser desenvolvidas e implementadas com grande eficiência, principalmente para o tratamento de redes radiais de distribuição de energia elétrica. Outra característica interessante dos AGs refere-se às suas regras de transição probabilísticas que levam a uma busca no espaço de soluções “aleatoriamente” direcionada à obtenção de populações cada vez mais ajustadas, ou seja, na eficiente busca daquele indivíduo (ou solução do problema) que satisfaz plenamente as características desejadas.

Neste capítulo, apresenta-se como o problema de configuração de redes é resolvido por AGs. A sua implementação para problemas específicos, como o de minimização de perdas ou planejamento de redes, é deixada para o capítulo 5. Inicia-se com um breve levantamento dos principais artigos técnicos de aplicação de AGs no problema. Passa-se então para os aspectos de modelagem do problema, que levam em conta as boas idéias de trabalhos anteriores, porém desenvolvendo alguns aspectos inéditos e que permitem vislumbrar a eficiência da aplicação. Neste sentido, apresenta-se a codificação dos *strings* dos indivíduos de uma população, ou seja, como um dado *string* relaciona-se com uma possível solução do problema de configuração. Em seguida são consideradas algumas propostas para a representação da função de avaliação, que considera a função objetivo e restrições do problema. O capítulo termina por incorporar a teoria de conjuntos *fuzzy* ao problema, mostrando que os modelos simétricos de programação matemática *fuzzy* [33], que consideram a satisfação de objetivos e restrições, podem ser vislumbrados nos AGs, através da analogia existente entre o conjunto de decisão *fuzzy* e da função de avaliação. Também, este capítulo apresenta como outros aspectos considerados em trabalhos anteriores [11, 67], como o fluxo de potência *fuzzy* e análise de atendimento de restrições por comparação de números *fuzzy*, podem ser efetivamente incorporados em AGs.

4.2 Levantamento Bibliográfico

Este item não tem por objetivo fazer uma revisão exaustiva da literatura, o que implicaria na análise da maioria dos trabalhos publicados em AGs aplicados a problemas relacionados com configuração de redes de distribuição. Apesar de serem referenciados uma quantidade bastante significativa dos artigos técnicos, três trabalhos foram considerados representativos da literatura técnica, designados aqui por Trabalho 1, Trabalho 2 e Trabalho 3, correspondendo às referências [46], [48] e [49]. Os dois primeiros tratam do problema de planejamento de redes de distribuição enquanto o último é representativo do problema de reconfiguração de redes. Estes trabalhos são analisados com maior detalhe, permitindo, no final deste item, comentários gerais das demais referências.

4.2.1 Análise do Trabalho 1

Este trabalho, apesar de mais recente que o Trabalho 2, no que diz respeito à data de sua publicação, será inicialmente considerado aqui, pois utiliza uma codificação do *string* muito parecida àquela apontada no capítulo 3, no segundo exemplo ilustrativo (vide item 3.3.3 desta tese).

A referência [46] trata do planejamento de redes de distribuição, com abordagem pseudo-dinâmica, isto é, somente um estágio é considerado em cada simulação. Na formulação básica, considera-se como função objetivo do problema os custos fixos e variáveis do problema de expansão do sistema, sendo os primeiros referentes aos custos de investimentos em subestações e trechos de rede e os segundos aos custos operacionais, representados pelos custos das perdas, com função quadrática dos respectivos fluxos de potência.

Além da consideração dos custos variáveis, uma outra diferença do exemplo ilustrativo do capítulo anterior reside no fato que são considerados (i) mais de um tipo de cabo a ser instalado em um dado trecho, isto é, o modelo determina o cabo mais adequado para um dado trecho além de (ii) mais de um valor de capacidade possível a ser instalado em local com subestação candidata. Para tanto, os autores utilizaram uma codificação não binária, que é ilustrada na figura 4.1.

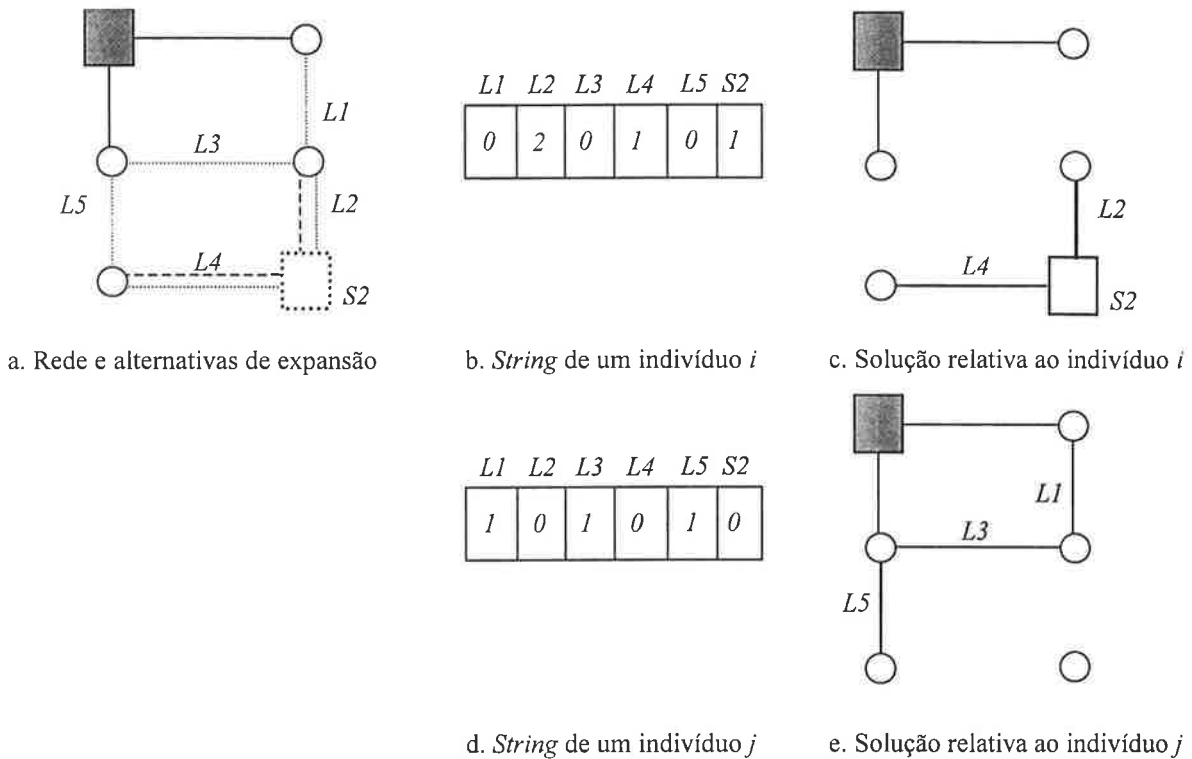


Fig. 4.1 – Codificação utilizada em [46]

Neste exemplo, cfr. Fig. 4.1a, as ligações *L2* e *L4* podem ser instaladas (ou não) com um dos dois cabos previamente escolhidos. As posições correspondentes no *string* podem ser iguais a 0, 1 ou 2 indicando, respectivamente, nenhuma instalação, a instalação do cabo tipo 1 ou instalação do cabo tipo 2 na ligação. Na codificação específica do *string* do indivíduo *i*, fig. 4.1b, a ligação *L2* é instalada com o cabo tipo 2, a ligação *L4* com o cabo tipo 1 e a subestação candidata *S2* é instalada com a capacidade 1. Esta codificação não garante a inexistência de malhas ou barras resultando desconexas, como é o caso do *string* do indivíduo *j*, apresentado na fig. 4.1d e correspondente configuração na fig. 4.1e: a instalação as ligações *L1* e *L3* leva ao fechamento de uma malha e a não instalação de um dos reforços *L2*, *L4* ou *S2* leva a uma barra desconexa do resto da rede, o que é grave no caso de haver carga nesta barra.

Com esta codificação não binária (isto é, posições do *string* podem ter valores inteiros, maiores que a unidade), aparentemente, pelo exposto no trabalho, as operações de reprodução e de cruzamento são similares às apresentadas no algoritmo básico apresentado no capítulo 3. A operação de mutação, correspondente a uma alteração aleatória em uma posição do *string* não é detalhada no artigo. Os autores utilizam uma técnica elitista, na qual garante-se que cópia(s) da(s) melhor(es) solução(ões) obtida(s) até aquela geração é(são) copiada(s) diretamente na geração seguinte. Para

evitar a determinação de ótimos locais, os autores sugerem uma outra regra de mutação, na qual impõe-se um determinado número de mutações nos *strings*, em função do número de genes e de um fator de mutação definido.

Os autores também utilizaram um operador genético adicional, denominado “epidemia”, que também visa eliminar a determinação de ótimos locais. Quando da aplicação deste operador, todos os indivíduos são eliminados, exceto aqueles que apresentam altos valores de função de avaliação, e trocados por indivíduos novos gerados, o que, segundo os autores, “refresca” a população e desvia a busca de ótimos locais.

No artigo, não é descrito como a função de avaliação relaciona-se com a função objetivo ou com as restrições do problema. No entanto, um algoritmo de transporte é utilizado para avaliação de cada indivíduo, pois são aceitas soluções em malha. Não fica claro como um algoritmo para o tratamento de um problema particular de programação linear é utilizado para otimizar uma função objetivo quadrática, ou seja, relacionada diretamente às perdas no sistema.

Um dos casos simulados, com rede contendo 201 nós, 43 ligações existentes e 184 ligações novas, alcança a solução ótima depois de 2000 gerações, o que mostra que este tipo de codificação (cada *bit* associado a uma nova obra ou recurso) pode levar a ineficiência do processo de busca realizado pelo AG, principalmente no que diz respeito a tempos de processamento.

4.2.2 Análise do Trabalho 2

Uma outra referência [48], bastante importante na literatura, corresponde à primeira aplicação de AGs ao problema de planejamento de sistemas de distribuição apresentada na literatura científica. Neste trabalho, utiliza-se a forma canônica, isto é o algoritmo básico descrito no capítulo anterior.

Os autores descrevem um modelo para a consideração do problema dinâmico, ou seja, a variável tempo de instalação é explicitamente representada. Assim, as três perguntas básicas do problema de planejamento, relativas a quando, onde e com qual capacidade um dado recurso deve ser instalado são respondidas pelo modelo.

São consideradas as restrições de balanço de demanda, de quedas de tensão e de carregamento. A função custo considera os custos de investimento de novas subestações, ampliações de subestações existentes e novos trechos de rede, enquanto os custos operacionais englobam basicamente o custo das perdas na rede. São considerados também, na função objetivo, ponderações de minimização da energia não distribuída e de otimização do perfil de tensão.

A maior contribuição deste trabalho é a idéia utilizada para codificação do *string*, ou seja, sua relação com uma dada solução possível que, conforme será apresentado mais adiante neste capítulo, serviu como inspiração para a proposição desta tese. A codificação proposta neste artigo tem como objetivo a geração de um número mínimo de soluções inviáveis (sob o aspecto topológico), com rápido processo de decodificação. Para tanto, parte do princípio básico que, num sistema radial com uma única fonte, o número de ligações, n_{lig} , deve ser uma unidade menor que o número total de nós, $n_{nós}$, isto é $n_{lig} = n_{nós} - 1$. Para tanto, consideram-se as subestações como um tipo específico de ligação. Em particular, os nós com carga positiva (demanda maior que zero) devem estar conectados a pelo menos uma ligação. Nós com carga nula podem ter nenhuma ligação incidente, ou uma ou mais ligações incidentes para possibilitar distribuição de fluxos de potência para outros nós da rede.

Assim, a codificação não é mais baseada nos reforços candidatos, mas sim nos nós do sistema e, em função dos valores de bit(s) correspondente(s), seleciona(m)-se o(s) reforço(s) que incide(m) naquele nó. O exemplo de codificação da figura 4.2 ilustra o procedimento de codificação adotado.

As barras que apresentam carga nula (barras B5 e B6) têm a possibilidade de não serem atendidas, o que na figura 4.2b é representado pelo símbolo *nil*. O número de *bits* necessário para cada barra é determinado em função do número de ligações incidentes (mais a ligação *nil* nas barras com carga nula). Por exemplo, a barra B6 pode ser atendida pela: 1) ligação *nil*, 2) “ligação” *S2*, 3) ligação *L2* e 4) ligação *L4*, correspondendo às duas últimas posições do *string*, com os seguintes valores associados a estas ligações: $00 \rightarrow nil$, $01 \rightarrow S2$, $10 \rightarrow L2$ e $11 \rightarrow L4$.

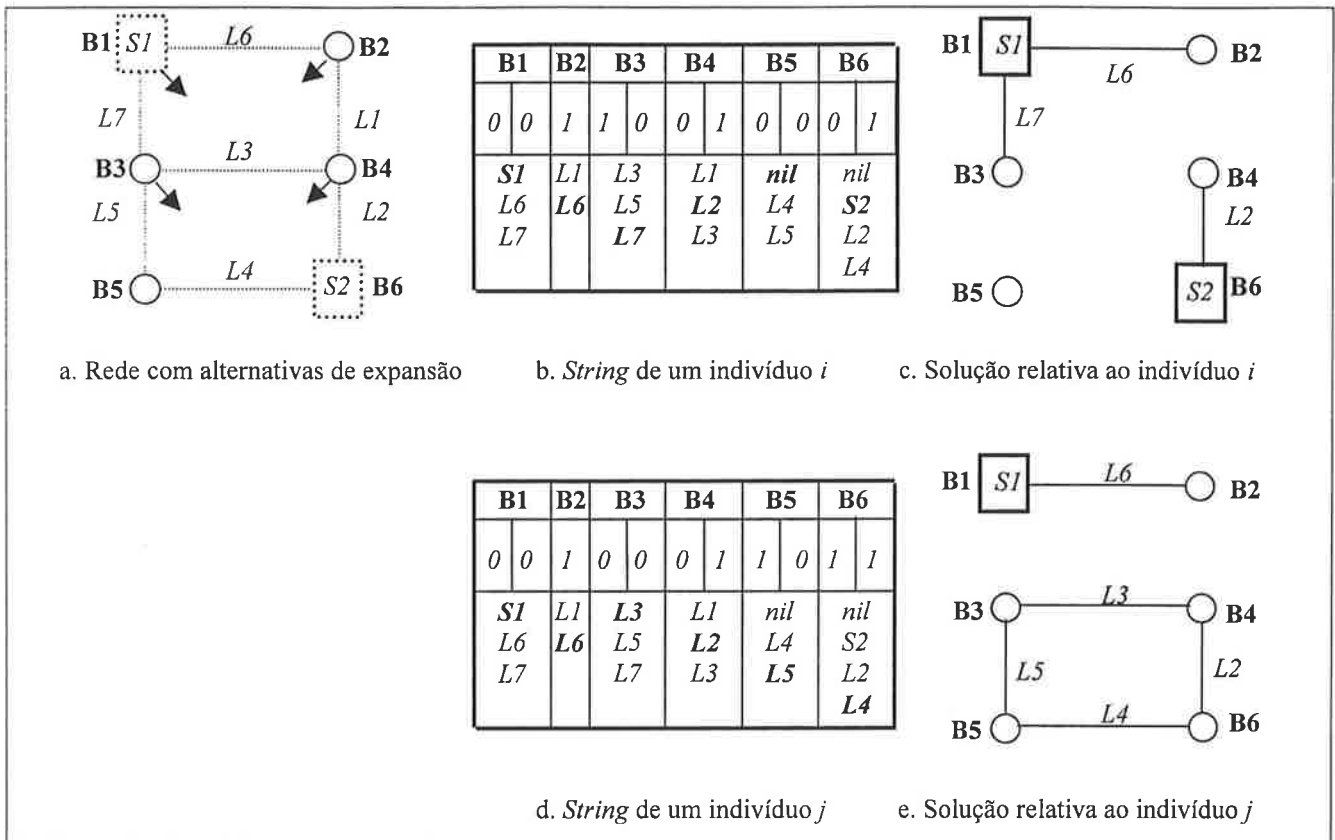


Fig. 4.2 – Codificação utilizada em [48]

O indivíduo *i*, apresentado na fig. 4.2b, corresponde a uma solução radial e conexa, apresentada na fig. 4.2c, ou seja uma solução viável sob o aspecto topológico. Apesar da decodificação do *string* tender a levar a soluções viáveis, esta codificação não garante a inexistência de malhas, como é demonstrado no indivíduo *j* da figura 4.2d e correspondente configuração apresentada na figura 4.2e. No entanto, os autores afirmam que esta codificação fornece resultados melhores que as que relacionam cada novo reforço com um *bit* no *string*, como é o caso da codificação do Trabalho 1, ilustrada na figura 4.1.

Imagina-se que, nesta codificação, o aspecto temporal é simplesmente simulado com a multiplicação do número de *bits* do *string*. Utiliza-se a mesma idéia ilustrada na figura 4.2 em todos os estágios de planejamento; por exemplo, com 3 estágios o número de *bits* passaria de 11 para 33.

A função de avaliação estabelecida pelos autores é relacionada aos custos fixos e variáveis, com o perfil de tensão e com o custo da confiabilidade - determinado através de uma função aproximada da energia não distribuída no sistema e com penalizações, em ordem decrescente de gravidade, relativas ao não atendimento da restrição de radialidade, das restrições de carregamento e das

restrições de queda de tensão. Assim, a função de avaliação, sem considerar as penalizações apontadas acima, é dada por:

$$f_{aval,i} = M - c_1(C_{fixo,i} + C_{var,i}) - c_2C_{dv,i} - c_3END_i \quad (4.1)$$

onde:

- M é um número positivo suficientemente alto (de modo a $f_{aval,i}$ ser sempre positivo);
- c_1, c_2, c_3 constantes fixadas externamente (ou simplesmente, pesos de ponderação);
- $C_{fixo,i}, C_{var,i}$ custos fixos e custos variáveis da configuração;
- $C_{dv,i}$ valor que aumenta a partir de uma faixa satisfatória de tensão (proporcional a soma de desvios quadrados de um limite mínimo até alcançar saturação num limite máximo).
- END_i Valor da energia não distribuída de uma determinada solução possível, avaliada entre um limite inferior, que assume chaves em todos os trechos de rede (cfr. Eq. 2.3 do capítulo 2), e um limite superior que assume somente disjuntor na subestação, sem dispositivos na rede, o que leva a altos cortes de carga em cada contingência.

O trabalho apresenta caso teste contendo 50 nós, 64 trechos existentes e 48 trechos propostos, 2 subestações existentes e 2 subestações propostas, com horizonte de planejamento dividido em 3 estágios. Os resultados são obtidos em tempos de processamento bastante aceitáveis (cerca de 5 minutos em uma estação NeXTStation-33MHz), com população de 40 indivíduos e 300 gerações.

Os autores fazem comentários relativos a análise de outras soluções geradas durante o processo, principalmente aquelas que possibilitam análises dos múltiplos objetivos a posteriori, por exemplo, dos objetivos conflitantes de minimização do custo de expansão e minimização da energia não distribuída, o que possibilita a análise de outras soluções não dominadas que podem dar suporte ao processo de decisão.

4.2.3 Análise do Trabalho 3

A referência [49], em contraste aos dois outros trabalhos detalhados nos itens anteriores que tratam de planejamento, aborda o problema de reconfiguração de redes de distribuição. O objetivo principal é a minimização das perdas na rede elétrica, através de duas medidas efetivas para diminuição das perdas: alteração do estado das chaves da rede e locação de bancos de capacitores.

O interessante nesta referência é que, na solução de dois problemas relativamente distintos que influenciam a função objetivo diretamente, os autores mostraram como o AG pode ser uma técnica eficaz para a solução do problema. Sendo assim, os autores acabaram por propor uma codificação bastante particular, na qual o aspecto de reconfiguração da rede é codificado numa partição do *string*, através da forma decimal, e o aspecto de localização de capacitores é codificado numa segunda partição do *string*, e de forma binária. A figura 4.3 ilustra a codificação proposta.

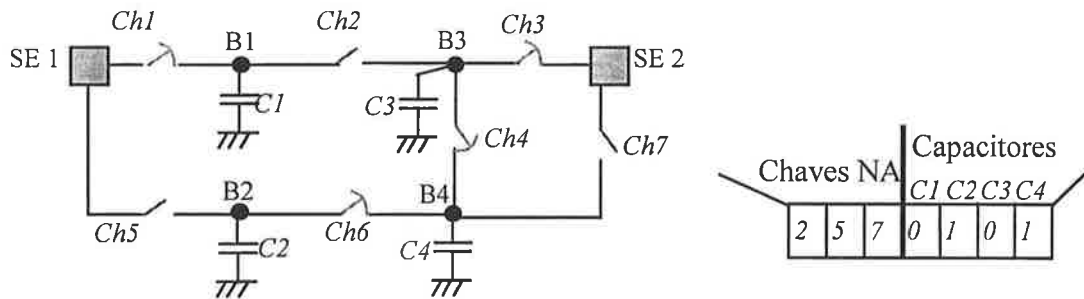


Fig. 4.3 – Codificação utilizada no Trabalho 3

No aspecto de reconfiguração da rede, a grande diferença em relação às demais codificações anteriormente apresentadas, está no fato que utiliza-se codificação em forma decimal, isto é, as chaves NA são diretamente representadas pelos seus números (ou índices) no *string*. Para este problema, uma vez que o número de chaves NA da rede deve ser sempre igual, para que as configurações propostas continuem radiais (no caso da figura, qualquer configuração radial deve apresentar 3 chaves NA), esta partição do *string* mantém-se fixa. Obviamente, em problemas de planejamento, quando o número de chaves NA pode ser alterado em função dos reforços instalados, este tipo de codificação resultaria em *strings* com número diferente de *bits*, ou a necessidade de serem instalados alguns *bits* sem função (*dummy*) em determinados indivíduos.

Com a codificação em forma decimal, os autores propuseram variantes dos operadores de cruzamento e mutação, sem no entanto alterar a idéia básica de trocas e transformações genéticas, respectivamente, destes operadores. É necessário lembrar que tais operações são executadas diferentemente nas duas partições do *string*, pois aquela correspondente ao capacitores pode sofrer os operadores genéticos básicos de cruzamento e mutação, cfr. descrito no capítulo 3.

O operador de cruzamento, na primeira partição do *string*, funciona da seguinte forma no par de cromossomos “pai”, selecionado aleatoriamente: os índices de chaves NA comuns nos dois

cromossomos “pai” continuam nos cromossomos “filho”; as demais chaves NA, não comuns, são dispostas aleatoriamente nos cromossomos “filho”.

O operador de mutação, na primeira partição, foi concebido de forma a serem mantidas configurações radiais: com a devida probabilidade de mutação, seleciona-se uma determinada posição do *string*, isto é, uma chave NA a ser fechada. Quando esta chave é fechada, uma malha aparece na rede e esta pode ser eliminada a partir da abertura de uma das chaves presentes na malha. Esta chave a ser transformada em NA é selecionada aleatoriamente (com distribuição uniforme entre as chaves da malha, excetuando-se aquela que foi fechada pelo operador).

Pela análise dos operadores propostos, nota-se que a população inicial, neste método proposto, é bastante importante. Por exemplo, se algumas chaves não aparecem em indivíduos da população inicial (como chaves NA), o operador de cruzamento nunca fará com que estas venham a aparecer em gerações futuras, o que provocaria convergência prematura do AG. Tal fato coloca grande responsabilidade no operador de mutação. Os autores propõem um método para a seleção da população inicial baseado no operador de mutação proposto.

Os casos simulados com o método proposto apresentam resultados bastante interessantes, mostrando a vantagem de serem tratados, conjuntamente, os problemas de reconfiguração de redes e locação de capacitores, quando o objetivo é o de minimização de perdas. Também, o tempo de processamento mostrou-se bastante pequeno nos métodos propostos.

4.2.4 Outras Referências

Outros artigos publicados na literatura apresentam proposições relativamente semelhantes às descritas nos itens anteriores, nos Trabalhos 1, 2 e 3, ou sem grande impacto no trabalho da tese aqui sendo explorada, como é comentado a seguir.

As referências [50], [52] e [53] não apresentam aspectos inovadores com relação à abordagem por algoritmos genéticos, que já havia sido proposta no Trabalho 2 pelos mesmos autores, conforme descrito no item 4.2.2. Apenas são abordados alguns outros aspectos de modelagem, por exemplo, quanto ao tratamento de diferentes cenários de crescimento, representados através de árvore de possibilidades de futuros cenários de cargas, quando a estratégia básica consiste na minimização do

arrependimento e risco da alternativa selecionada. Outros detalhes de modelagem são fornecidos quanto aos modelos *fuzzy* e de múltiplos objetivos. Na referência [53], em particular, apresenta-se caso ilustrativo com produção dispersa de energia na rede de distribuição.

As referências [51] e [54] tratam da instalação de chaves na rede de distribuição, tendo por objetivo a melhoria de índices de confiabilidade na rede, particularmente da energia não distribuída. Em [51] a estratégia de codificação é a de serem fixadas posições do *string* para cada trecho de rede possível de instalação de uma chave. Em [54], a estratégia é semelhante, porém com a diferença que, para cada trecho candidato a ter instalado um dispositivo, são reservados 4 *bits*: o primeiro para identificar se deve ser instalado elo fusível no trecho, e os demais 3 *bits* com informação da chave, isto é (i) se deve ser instalada, (ii) se deve ser NA ou NF e (iii) se é automática ou manual.

A referência [47] considera o problema de minimização de investimentos em luminárias de iluminação pública, utilizando uma ferramenta de GA, denominada Genitor. O tipo de codificação é por local de instalação, com o *bit* correspondente do *string* apontando a instalação ou não da luminária. Um algoritmo especialmente desenvolvido permite, a partir das luminárias e correspondentes locais de instalação dados pela decodificação do *string* de um dado indivíduo, determinar a melhor alternativa de fornecimento, isto é, da configuração da rede elétrica de iluminação pública, o que permite o cálculo da função de avaliação. Alguns resultados alcançados mostram a necessidade de 5000 gerações, 350 indivíduos/população e uma taxa de mutação 0.3, todos parâmetros que podem ser considerados altos em AGs.

As referências [56], [57] e [58] tratam do problema de reconfiguração de redes de distribuição, com diferenças básicas quanto ao tipo de codificação adotada e quanto a função objetivo:

Em [56], descreve-se um AG para o planejamento da restauração de um sistema, após a ocorrência de uma falta no sistema. A codificação utilizada baseia-se no fato que cada nó de uma rede radial (nó “filho”) recebe fluxo de um único nó (nó “pai”). Reservando uma posição do *string* para cada nó “filho”, os valores não-binários de cada posição fornecem o nó “pai”. O autor tenta combinar o AG com o método de busca por troca de ramos (*branch exchange*), porém sem alcançar grandes benefícios na eficiência do método.

Em [57], descreve-se um AG para minimização das perdas por alteração do estado das chaves do sistema. A codificação é semelhante a apontada no Trabalho 3, cfr. item 4.2.3, porém com codificação binária; sem os operadores genéticos apontados em [49], são geradas muitas configurações em malha ou com ilhas, o que leva a certa ineficiência do método. Porém, trata-se de referência importante, por ser um dos primeiros trabalhos em reconfiguração de redes utilizando AGs.

Em [58], o objetivo é o de minimização do desequilíbrio de carregamento entre os alimentadores de cada subestação. Analisa-se também um objetivo adicional, que é composto com o anterior através de uma função objetivo aditiva e ponderada, correspondente à minimização do número de chaves manobradas. Pela codificação utilizada, a convergência do algoritmo é relativamente lenta; o método também não permite uma análise das configurações formadas (níveis de tensão, perdas, carregamento de trechos da rede, etc.), apenas o índice global de carregamento de cada alimentador.

4.3 Modelagem Proposta ao Problema de Configuração de Redes

4.3.1 Considerações Iniciais

Os artigos referentes a aplicação de algoritmos genéticos a problemas de configuração de redes, analisados no item 4.2, mostram que nenhuma das codificações propostas garante que somente configurações radiais e conexas sejam geradas durante o procedimento, dificultando a busca pelos “melhores” indivíduos ao longo das gerações, que é característica dos AGs.

Uma das contribuições mais importantes desta tese, que será descrita neste item, consiste na proposição de uma codificação / decodificação, que utiliza a forma binária de representação das posições do *string*, mas que garante somente a geração de configurações viáveis sob o ponto de vista topológico. Obviamente, esta característica leva a uma vantagem de partida no AG proposto, pois todos os indivíduos gerados, seja na população inicial, seja durante as gerações futuras através dos operadores genéticos, levarão a candidatos potencialmente capazes a serem bem avaliados, ou seja, que estejam bem ajustados às características desejadas, o que é medido através da função de avaliação.

Outro fator muito importante, contemplado de certa forma em algumas das referências apresentadas no item anterior, refere-se à escolha da função objetivo e como esta é penalizada quando de violação de restrições. Estes pontos serão considerados neste item; porém somente no capítulo posterior serão identificadas as funções objetivo para cada um dos problemas específicos de configuração de redes. Os objetivos para os problemas de restauração da rede após uma falta na rede, para a reconfiguração da rede visando a minimização de perdas em condições normais e para o planejamento do sistema são necessariamente bastante distintos, com características que poderão ser melhor discutidas mais adiante.

4.3.2 Codificação e Decodificação dos *Strings*

A codificação a ser aqui apresentada baseia-se na codificação descrita no item 4.2.2, relativa à referência [48], que tinha por objetivo aumentar a quantidade de soluções radiais geradas, quer fossem na população inicial ou nas demais gerações, que são resultantes da aplicação dos operadores genéticos. No entanto, antes de considerar a codificação propriamente dita, dois conceitos importantes para o melhor entendimento do processo são descritos em detalhes: o conceito de blocos de carga e o conceito de famílias de blocos. Definido o bloco de carga, passa-se à proposição da codificação dos *strings*. A operação inversa da codificação descrita em [48], que é a decodificação do *string*, não garante que sejam resultantes apenas configurações viáveis sob o aspecto topológico. Assim, o processo de decodificação proposto nesta tese, como será visto adiante, é um pouco mais elaborado, e parte do conceito de famílias de blocos de carga.

4.3.2.1 Blocos de Carga

Existem algumas diferenças básicas na codificação aqui apresentada em relação à descrita em [48]. Em particular, utiliza-se neste trabalho o conceito de bloco de carga que, conforme mencionado anteriormente, corresponde a um conjunto de barras do sistema que estão delimitadas por chaves (dispositivos de seccionamento ou de proteção) ou por barras de fim de linha.

Uma observação bastante importante é que, em uma rede radial, o número de blocos do sistema será necessariamente igual ao número de chaves NF (normalmente fechadas). A figura 4.4 ilustra o conceito de bloco de carga. As 6 chaves NF: *Ch1*, *Ch2*, *Ch3*, *Ch4*, *Ch5* e *Ch6* geram os 6 blocos de carga: *BL1*, *BL6*, *BL2*, *BL5*, *BL3* e *BL4*, respectivamente. Outra observação relevante é que os blocos de carga e as chaves do sistema contêm todas as informações necessárias para a definição de

uma dada topologia de rede, além de permitirem uma representação extremamente mais compacta. A rede da figura 4.4., que conta com 42 barras de carga, pode ser representada por apenas 6 blocos de carga.

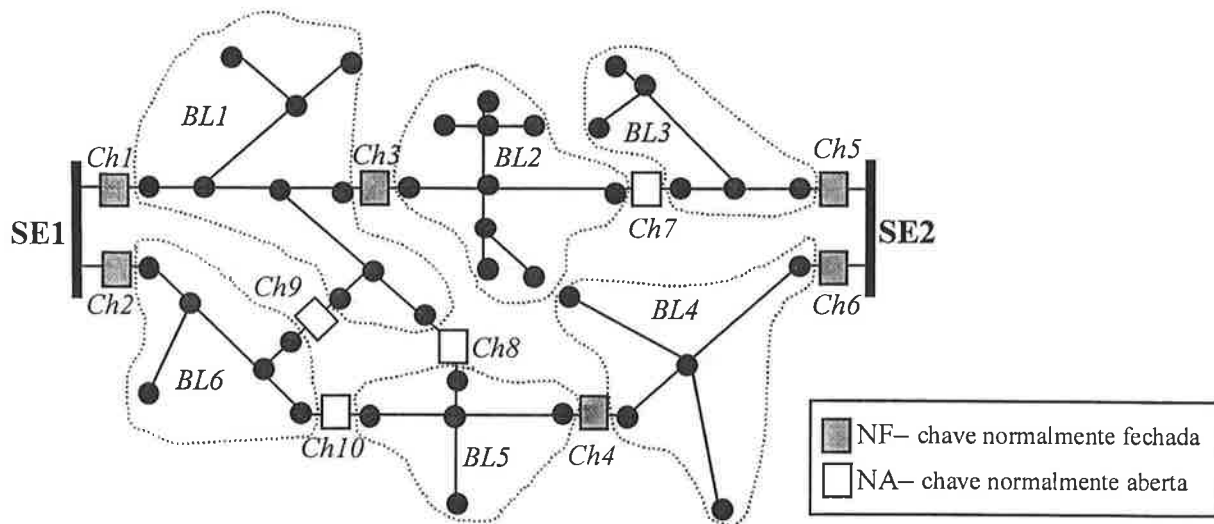


Fig. 4.4 – Blocos de Carga de uma Rede de Distribuição

4.3.2.2 Codificação dos *Strings*

Para a análise da codificação dos *strings* do AG, proposta nesta tese, considera-se inicialmente somente o problema de reconfiguração de redes, onde deseja-se determinar o estado das chaves do sistema de modo a que algum objetivo, sujeito a determinadas restrições, seja otimizado. No capítulo 5, ficará claro como esta codificação pode ser estendida para o problema de planejamento.

É importante notar que, no problema proposto, para garantir que qualquer configuração seja radial e conexa, é necessário que todos os blocos de carga da rede sejam atendidos (no sentido do fluxo) por uma única chave, o que é análogo a dizer que, num sistema radial, o número de nós do sistema (exceto os nós fonte) é igual ao número de ligações.

Ao invés de serem tratados nós do sistema, conforme [48], na codificação aqui proposta trabalha-se com blocos de carga; ao invés de ligações da rede, trabalha-se com chaves do sistema.

A proposição do *string* representante de uma dada configuração de rede é então análoga a de [48], com os conceitos de nó e ligação sendo estendidos para os de bloco e chave, respectivamente. A figura 4.5 apresenta o *string* que deve corresponder à configuração da figura 4.4.

<i>BL1</i>		<i>BL2</i>	<i>BL3</i>	<i>BL4</i>	<i>BL5</i>		<i>BL6</i>	
0	0	0	0	1	0	0	0	0
<i>Ch1</i>		<i>Ch3</i>	<i>Ch5</i>	<i>Ch4</i>	<i>Ch4</i>		<i>Ch2</i>	
<i>Ch3</i>		<i>Ch7</i>	<i>Ch7</i>	<i>Ch6</i>	<i>Ch8</i>		<i>Ch9</i>	
<i>Ch8</i>					<i>Ch10</i>			
<i>Ch9</i>								

Fig. 4.5 – Proposição de codificação dos *strings*

Antes de passar à etapa de decodificação é importante salientar alguns detalhes da codificação aqui proposta:

- Genericamente, um número n de *bits* por bloco de carga permite representar um máximo de 2^n chaves incidentes; por exemplo, 1 *bit*, como é caso dos blocos *BL2*, *BL3* e *BL4*, permite a representação de até duas chaves incidentes, com o valor 0 representando a primeira chave fechada e 1 representando a segunda chave fechada; 2 *bits*, como é caso dos blocos *BL1*, *BL5* e *BL6*, permitem a representação de até quatro chaves incidentes com a combinação 00 representando a primeira chave fechada, 01 a segunda chave, 10 a terceira chave e 11 a quarta chave;
- Caso o número de chaves incidentes seja menor que o número máximo (2^n), como é o caso dos blocos *BL5* e *BL6* (3 chaves incidentes num máximo de $2^2=4$ chaves), podem existir combinações de *bits* que não levem a uma chave existente; é o caso da combinação 11 que, no caso do *string* da figura 4.5, levaria ao fechamento de uma quarta chave, que não existe na lista; neste caso opta-se, arbitrariamente, por tomar-se a última chave da lista, fechando-se, no caso, a terceira chave¹;

¹ Nota-se que diferentes *strings* poderão levar à mesma configuração de rede (no exemplo, as combinações 10 e 11 para os blocos *BL5* e *BL6*). O importante a ser destacado é que este procedimento não inibe a determinação de qualquer solução viável: todas as combinações de chaves que resultem em configurações radiais e conexas podem, a princípio, ser geradas, o que possibilita a obtenção da solução ótima do problema.

- Diferentemente da proposição de [48], na codificação proposta não é considerada a possibilidade de um bloco de carga ser atendido por uma chave de tipo *nil*. Assume-se, intrinsecamente, que todos os blocos de carga devam ser atendidos, o que é uma suposição com justificativa prática bastante forte.

4.3.2.3 Famílias de Blocos de Carga

O processo de decodificação baseia-se no conceito de famílias de blocos de carga. Cada família representa um conjunto de blocos conectados através de chaves fechadas. Na figura 4.6 ilustra-se este conceito.

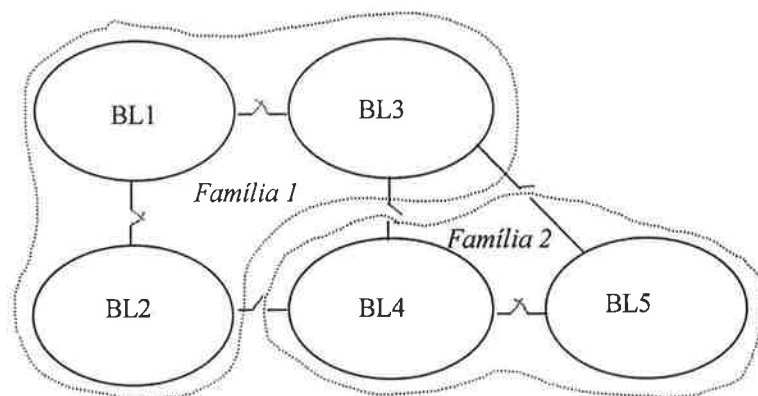


Fig. 4.6 – Exemplo de duas famílias de blocos de carga

Deve-se salientar que o conceito de famílias não precisa ser necessariamente aplicado a soluções completas, ou seja, pode ser aplicado a soluções parciais, amplamente utilizadas em processos de busca heurística (cfr. cap. 2). No caso particular de solução completa da figura 4.4, podem ser visualizadas 4 famílias, correspondentes aos blocos (i) *BL1* e *BL2*, (ii) *BL3*, (iii) *BL4* e *BL5*, e (iv) *BL6*. Duas observações importantes devem ser destacadas aqui:

- As subestações não pertencem às famílias, apesar de serem conectadas à cada família por chaves NF (no exemplo, pelas chaves *Ch1*, *Ch2*, *Ch5* e *Ch6*). Pode-se imaginar todas as subestações formando um bloco fonte, denominado de Bloco 0 ou *BL0*.
- Famílias conectadas ao bloco *BL0* através de uma chave NF, numa solução completa que corresponda a uma configuração radial, formam um alimentador primário (no exemplo, as quatro famílias de bloco correspondem aos quatro alimentadores da rede). Famílias não

conectadas ao bloco *BLO* compõem blocos desconexos, ou seja, ilhas no sistema; obviamente, numa solução completa, denotariam uma solução inviável.

4.3.2.4 Decodificação de um *String*

Conforme destacado anteriormente no item 4.2.2 desta tese, quando a escolha das chaves fechadas é determinada diretamente pelos valores dos *bits* em um dado *string*, a decodificação de *strings* gerados aleatoriamente pode levar a configurações em malha e/ou desconexas, conforme ilustrado no exemplo da figura 4.2.

Nesta tese, propõe-se um procedimento alternativo de decodificação, que pode ser encarado como um filtro de topologia, levando todos os *strings* (mesmo que gerados aleatoriamente ou através dos operadores genéticos), correspondentes a indivíduos de uma dada população do AG, a resultarem em configurações viáveis sob o aspecto topológico. Este procedimento parte dos conceitos de blocos de carga e famílias, descritos nos subitens anteriores.

Seja um *string* de um dado indivíduo da população, gerado aleatoriamente na população inicial ou em gerações mais avançadas, através dos resultados dos operadores genéticos, com codificação conforme ilustrada na figura 4.5. Cada um dos blocos de carga será percorrido seqüencialmente; no caso do exemplo desta mesma figura, desde o bloco *BL1* até o bloco *BL6*. Ao percorrer os blocos de maneira seqüencial, soluções parciais vão se formando e sendo analisadas pelo procedimento até o surgimento de uma solução completa quando da análise do último bloco.

Uma vez fixado um dado bloco de carga, que corresponde a posições bem definidas do *string*, tem-se, em função da combinação dos *bits*, uma chave selecionada para ser fechada. A inovação neste processo de decodificação está no fato que esta chave não necessariamente será a selecionada. Na verdade a seleção desta chave passa por testes que serão detalhados a seguir. Em caso de não “passar” por determinado teste, então o procedimento de filtragem tenta selecionar uma das outras chaves incidentes no bloco. Se nenhuma chave atender aos critérios definidos pelos testes, então simplesmente não seleciona-se chave alguma para aquele bloco e o procedimento continua pela análise do próximo bloco na seqüência.

Quando do início do processo de decodificação de um *string*, todas as chaves do sistema (quer sejam NA ou NF na rede original) são inicializadas com estado aberto. Da mesma forma, assume-se

que todos os blocos de carga, que estão obviamente isolados (pois todas as chaves estão abertas), não pertencem à família alguma. Dois parâmetros são utilizados para fornecer informações sobre cada família sendo gerada durante o procedimento de decodificação:

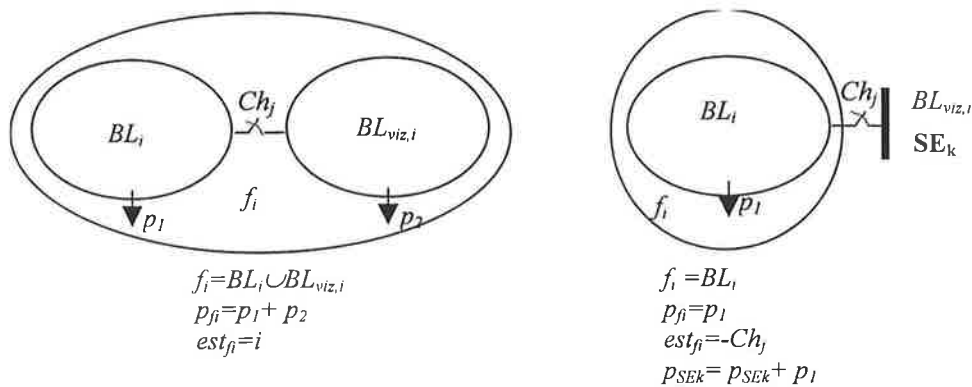
- *Estado da Família:* este parâmetro, que é um número inteiro, indica que todos os blocos que compõem uma (ou mais famílias) estão conectados. No exemplo da figura 4.6, a família 1 estaria no estado 1 e a família 2 no estado 2. Entretanto, durante o procedimento de decodificação, pode ocorrer de uma chave ser fechada entre duas famílias (já formadas pelo fechamento de outras chaves), com estados diferentes. Esta operação só será realizada se uma das famílias (ou ambas) ainda não estiver(em) conectada(s) a uma subestação, evitando, desta forma, a formação de malha. Quando esta situação ocorrer, o estado das duas famílias passa a ser o mesmo. No caso do exemplo da figura 4.6, isto pode ocorrer pelo fechamento de qualquer uma das chaves NA entre as famílias 1 e 2; neste caso a família 2, por exemplo, teria seu estado alterado para estado 1. Este parâmetro é o responsável pelo controle de não fechamento de malhas durante o processo de decodificação.
- *Potência da Família:* este parâmetro indica a potência acumulada dos blocos pertencentes a uma ou mais famílias conectadas entre si. Na descrição do procedimento, parte-se da hipótese que todas as cargas do sistema apresentam mesmo fator de potência; quando esta hipótese não é válida, basta acumular, separadamente, as potências ativa e reativa, de cada bloco.

Um outro parâmetro que pode também ser monitorado durante o processo de decodificação corresponde à potência acumulada de cada subestação. Algumas observações sobre a utilização da potência da família e da potência da subestação serão apresentadas mais adiante; por ora, é somente mostrado como esses parâmetros são monitorados durante o processo.

No procedimento seqüencial de análise dos blocos, quando uma chave incidente Ch_j , pertencente ao bloco de carga BL_i em análise, é selecionada, as seguintes condições podem ocorrer:

Condição A:

O Bloco BL_i e o bloco na outra extremidade da chave Ch_j , denominado bloco vizinho $BL_{viz,i}$, ainda são isolados, ou seja, ainda não foram atribuídos a nenhuma família. Nesta condição, podem ocorrer duas situações, denominadas A1 e A2, descritas a seguir e ilustradas na figura 4.7.



A1. dois blocos isolados

A2. bloco ligado a SE

Fig. 4.7 – Condição A – Blocos de carga isolados (sem atribuição de família)

A1 O Bloco $BL_{viz,i}$ não é uma subestação: nesta situação, uma nova família, f_i , é criada e o estado da família, est_{f_i} , é inicializado igual ao índice da família (ou seja, para a nova família f_i é atribuído o estado i). A potência da família é feita igual à soma da potência dos dois blocos conectados, isto é BL_i e $BL_{viz,i}$.

A2 O Bloco $BL_{viz,i}$ é uma subestação: nesta situação uma nova família, f_i , também é criada, porém o estado da família é feito igual ao número da chave Ch_j com sinal negativo, isto é, $est_{f_i} = -Ch_j$. Ou seja, todas as famílias que já estejam conectadas à uma subestação terão estado negativo e ainda, o módulo do valor do estado da família corresponderá ao índice da chave NF de início do alimentador. Portanto, ao final do procedimento, tem-se todas as famílias e correspondentes blocos de carga que pertencem a cada um dos alimentadores formados. Além da criação de uma nova família e definição do seu estado, a potência da família é feita igual à potência do bloco BL_i e à potência da subestação é acumulado este mesmo valor.

Condição B:

Ao bloco BL_i não foi atribuído nenhuma família ainda, porém ao bloco $BL_{viz,i}$ já foi atribuído a família $f_{viz,i}$ com estado $est_{f_{viz,i}}$, conforme ilustrado na figura 4.8. Nesta condição, o bloco BL_i passa a pertencer à família $f_{viz,i}$ e à potência da família é acumulada a potência do bloco BL_i . Deve-se destacar que outras famílias, f_k , podem estar conectadas à família $f_{viz,i}$ através de outras chaves fechadas previamente no processo; neste caso, estas famílias, que apresentam mesmo estado que $f_{viz,i}$, devem ter sua potência acumulada também alterada.

Nesta condição B deve-se também, no caso da família $f_{viz,i}$ apresentar estado negativo, isto é, já estar conectada a uma subestação de distribuição (através da chave $-est_{f_{viz,i}}$), acumular a potência do bloco BL_i à potência da subestação correspondente.

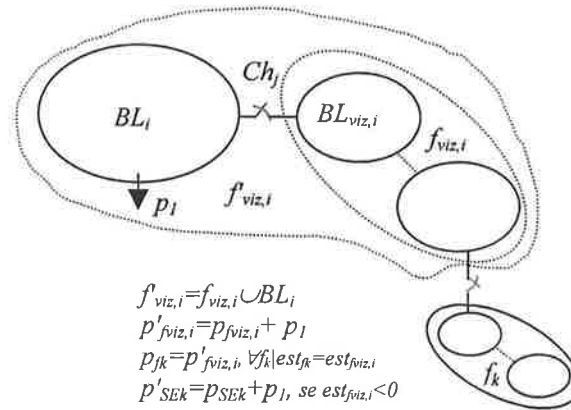
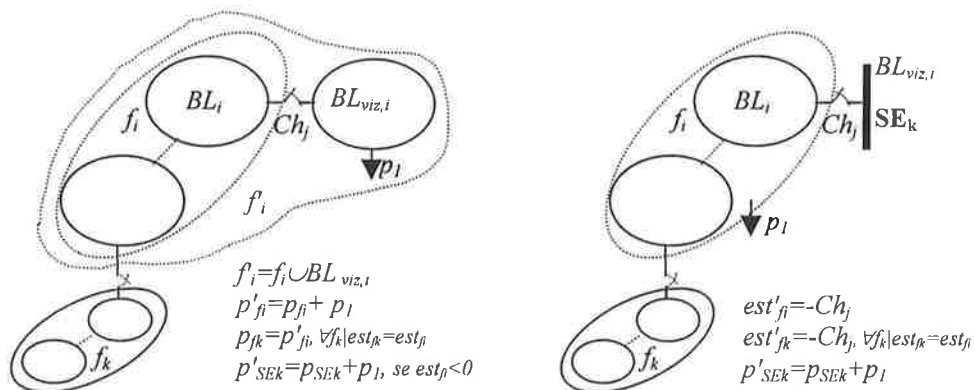


Fig. 4.8 – Condição B: bloco BL_i isolado, sendo conectado à família $f_{viz,i}$

Condição C:

O bloco vizinho $BL_{viz,i}$ ao bloco BL_i é isolado, isto é, não foi atribuído à nenhuma família ainda, porém o bloco BL_i já foi atribuído à família f_i . Nesta condição, podem ocorrer duas situações, designadas C1 e C2, ilustradas na figura 4.9.



C1 - $BL_{viz,i}$ não é a SE

C2 - $BL_{viz,i}$ é a SE

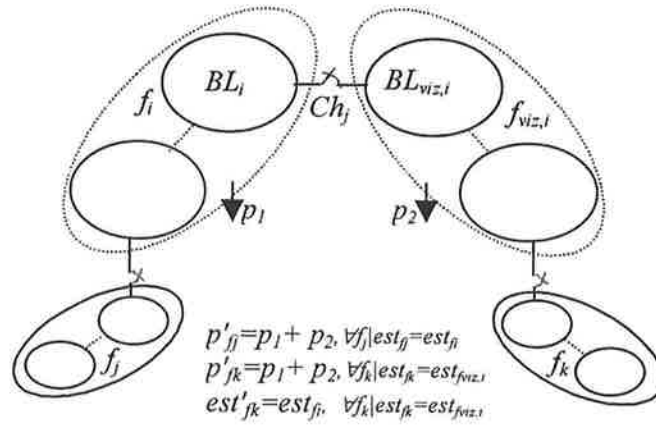
Fig. 4.9 – Condição C: bloco $BL_{viz,i}$ isolado

- C1. O Bloco $BL_{viz,i}$ não é uma subestação: nesta situação, o bloco $BL_{viz,i}$ passa a pertencer à família f_i e à potência desta família é acumulada a potência do bloco $BL_{viz,i}$. Da mesma forma que na condição B, outras famílias, f_k , podem estar conectadas à família f_i ; neste caso, estas famílias, que apresentam mesmo estado que f_i , devem ter sua potência acumulada também alterada. No caso da família f_i apresentar estado negativo, isto é, estar conectada a uma subestação, deve-se acumular a potência do bloco $BL_{viz,i}$ à potência da subestação correspondente.
- C2. O Bloco $BL_{viz,i}$ é uma subestação: nesta situação, a família f_i não sofre alteração, porém seu estado é alterado para o valor da chave Ch_j , com valor negativo, isto é $est_{f_i} = -Ch_j$. Outras famílias, f_k , conectadas à família f_i , isto é, que apresentam mesmo estado que f_i , devem ter seu estado também alterado para o novo estado negativo. À subestação k correspondente também deve ser acumulada a potência da família f_i .

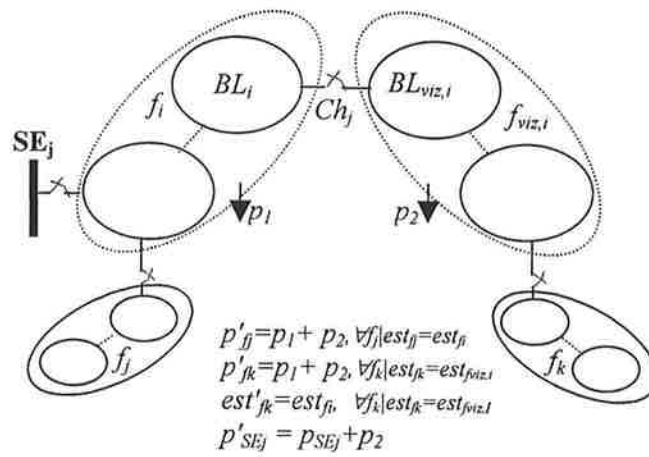
Condição D:

Os blocos BL_i e $BL_{viz,i}$ pertencem, respectivamente, às famílias f_i e $f_{viz,i}$, cujos estados apresentam valores distintos e não ambos negativos. Esta condição pode ser subdividida em três situações diferentes, designadas por D1, D2 e D3 e ilustradas na figura 4.10, quais sejam:

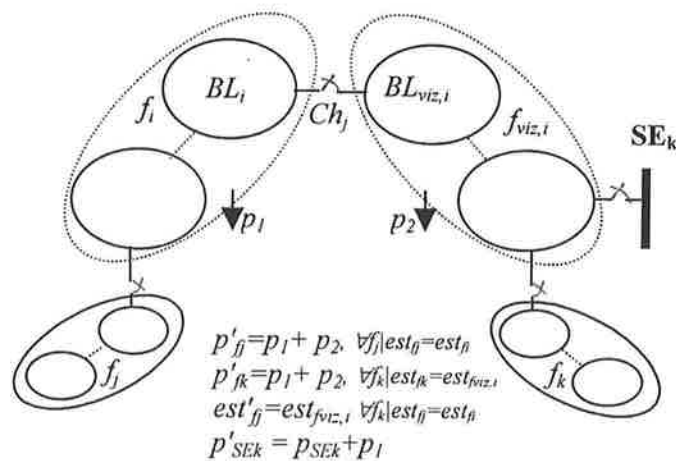
- D1. Os estados das famílias f_i e $f_{viz,i}$ são ambos positivos, o que significa que ambas as famílias ainda não encontram-se conectadas a alguma subestação do sistema. Neste caso, as duas famílias continuam inalteradas, porém os seus estados são feitos iguais: o estado de $f_{viz,i}$ é feito igual ao estado de f_i . Todas as famílias f_k que apresentavam estado igual ao de $f_{viz,i}$ têm também seus estados alterados para o estado de f_i . As novas potências das famílias f_k , f_i , $f_{viz,i}$ e f_j (famílias f_j correspondem às famílias com mesmo estado que a família f_i) são todas feitas iguais à soma das potências das famílias f_i e $f_{viz,i}$.
- D2. O estado de f_i é negativo e o estado de $f_{viz,i}$ é positivo, ou seja, f_i já encontra-se conectada a uma subestação. Neste caso, as duas famílias continuam inalteradas, porém o estado de $f_{viz,i}$ é feito negativo, igual ao estado de f_i . Todas as famílias f_k que apresentavam estado igual ao de $f_{viz,i}$ têm seus estados alterados para o estado de f_i . As novas potências das famílias f_k , f_i , $f_{viz,i}$ e f_j (famílias f_j correspondem às famílias com mesmo estado que a família f_i) são todas feitas iguais à soma das potências das famílias f_i e $f_{viz,i}$. Além disso, à potência da subestação que supre f_i é acumulada a potência da família $f_{viz,i}$.



D1 – Famílias f_i e $f_{viz,i}$ não conectadas à SEs



D2 – Somente família f_i conectada à SE



D3 – Somente família $f_{viz,i}$ conectada à SE

Fig.4.10 – Condição D: Estados das famílias de BL_i e de $BL_{viz,i}$ distintos e não ambos negativos

D3. O estado de f_i é positivo e o estado de $f_{viz,i}$ é negativo, ou seja, $f_{viz,i}$ já encontra-se conectada a uma subestação. Neste caso, analogamente ao caso D2, as duas famílias continuam inalteradas, porém o estado de f_i é feito negativo, igual ao estado de $f_{viz,i}$. Todas as famílias f_j que apresentavam estado igual ao de f_i têm seus estados alterados para o estado de $f_{viz,i}$. As novas potências das famílias f_j , f_i , $f_{viz,i}$ e f_k (famílias f_k correspondem às famílias com mesmo estado que a família $f_{viz,i}$) são todas feitas iguais à soma das potências das famílias f_i e $f_{viz,i}$. Além disso, à potência da subestação que supre $f_{viz,i}$ é acumulada a potência da família f_i .

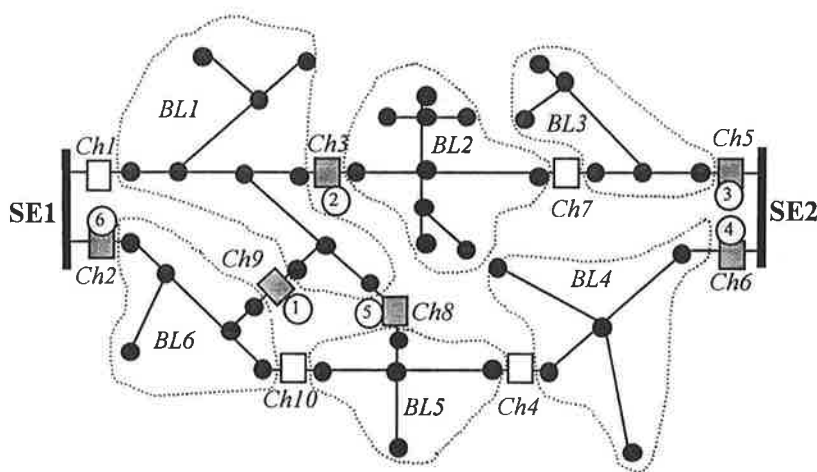
O não atendimento das condições A, B, C ou D, descritas neste item, corresponde ao fato dos estados das famílias f_i e $f_{viz,i}$ serem iguais ou ambos negativos; nestas duas situações, o fechamento da chave Ch_j , que interligaria os blocos de carga BL_i e $BL_{viz,i}$, resultaria no estabelecimento de uma malha na rede. Deste modo, quando nenhuma das quatro condições (A, B, C e D) é atendida, o procedimento é direcionado a procurar uma chave incidente no bloco que atenda uma estas condições². A figura 4.11 ilustra esta situação, em que o procedimento busca por chave incidente alternativa.

Neste exemplo, utilizando o procedimento de decodificação exposto, de forma seqüencial, do bloco $BL1$ ao bloco $BL5$, pelo menos uma das quatro condições é atendida em cada bloco, conforme ilustrado na figura 4.11a (última linha da tabela). Porém, quando atinge-se o bloco $BL6$, o fechamento da chave $Ch10$ não atende nenhuma das condições (identificada na última linha da tabela pelo símbolo “nil”) dado que, neste instante, os blocos $BL5$ e $BL6$ pertencem à mesma família e, portanto, apresentam o mesmo estado. O processo de decodificação identifica tal situação e procura alguma chave alternativa incidente no bloco $BL6$. No caso, a única que atende uma das condições é a chave $Ch2$, que interliga o bloco $BL6$ com a subestação SE1, o que corresponde ao atendimento da condição C2.

² A procura pela chave incidente no bloco pode seguir duas estratégias. A primeira corresponde à determinar a chave alternativa no instante em que o Bloco BL_i está sendo analisado. A segunda armazena aqueles blocos que não atendem a nenhuma das condições A, B, C ou D e coloca-os numa lista de blocos pendentes. Ao final da análise de todos os blocos, passa à procura das chaves incidentes daqueles blocos pendentes que satisfaçam uma das condições.

Seqüência	①	②	③	④	⑤	⑥
Blocos	BL1	BL2	BL3	BL4	BL5	BL6
Bits	1	1	0	0	1	0
Chaves incidentes	Ch1 Ch3 Ch8 Ch9	Ch3 Ch7	Ch5 Ch7	Ch4 Ch6	Ch4 Ch8 Ch10	Ch2 Ch9 Ch10
Condição satisfeita	A1	B	A2	A2	B	C2 - Ch2 nil - Ch10

a – String para um dado indivíduo k



b – Configuração resultante para o indivíduo k

Fig. 4.11 – Blocos de Carga de uma Rede de Distribuição

Através do controle do estado das famílias, nota-se que a configuração resultante para o indivíduo k , apresentada na figura 4.11b, é radial e conexa. A não utilização do conceito de famílias com o controle do parâmetro de estado levaria a uma solução com ilhas e em malha (fechamento da chave $Ch10$ resultaria na malha $BL1$ - $BL5$ - $BL6$ e na formação da ilha com os blocos $BL1$, $BL2$, $BL5$ e $BL6$).

O procedimento descrito até aqui garante que não ocorram configurações em malha. No entanto, podem acontecer casos em que a solução completa (depois de percorrer todos os blocos) não apresente malhas, mas sejam formadas ilhas, ou seja, famílias que apresentam estado positivo, não estando conectadas a subestação. Um exemplo de uma ocorrência deste tipo seria se, no exemplo da figura 4.11, a chave $Ch2$ não existisse. Desta forma, quando o procedimento atingisse o bloco $BL6$, as duas chaves incidentes neste bloco ($Ch10$ e $Ch9$) não poderiam ser fechadas, por não

satisfazerem nenhuma das quatro condições; ou seja, nenhuma chave seria selecionada em correspondência ao bloco *BL6*. Apesar da configuração não apresentar fechamento de malhas, resultaria a ilha formada pelos blocos *BL1*, *BL2*, *BL5* e *BL6*.

Para evitar esta situação, ao final do procedimento seqüencial, em que são percorridos todos os blocos, pesquisa-se, na lista de chaves, se alguma das chaves ainda aberta resultou com um dos extremos com um bloco pertencente a uma família com estado positivo. Quando isto ocorre, esta chave é fechada. Obviamente, as atualizações nos estados e potências das famílias, para cada chave que atenda tal condição, são realizadas de forma análoga às situações encontradas nas condições A, B, C e D.

No exemplo hipotético da figura 4.11 sem a consideração da chave *Ch2*, o procedimento nesta última etapa encontraria qualquer uma das chaves *Ch1*, *Ch7* ou *Ch4* satisfazendo a condição de um dos extremos em família com estado positivo; em particular, as três chaves já têm um dos extremos conectado à subestação e o outro extremo em barra de família isolada. Qualquer uma destas chaves levaria também à eliminação da ilha e, depois da atualização dos estados das famílias, inibiria a utilização das demais chaves.

Conforme o procedimento descrito, os parâmetros potência por família e potência por subestação são atualizados a cada chave fechada ao longo do processo de decodificação. Na realidade, estas informações poderiam servir para direcionar o processo de decodificação para soluções viáveis também sob o ponto de vista de carregamento de alimentadores e carregamento de subestações. Isto pode ser explicado pois, conforme mencionado, a família em uma solução completa corresponde ao próprio alimentador. Assim, ao longo do processo seqüencial que percorre os blocos, poderiam também ser evitados os fechamentos de chaves incidentes que produzissem uma potência da família maior que o máximo permitido em alimentadores ou que levassem a potência da subestação ser maior que o carregamento máximo correspondente. No entanto, testes realizados em problemas de reconfiguração de redes mostraram que este processo pode restringir por demais a “montagem” de uma dada configuração, ou seja, a solução completa resulta sem violação dos critérios de carregamento de subestações e alimentadores, porém pode resultar em uma configuração radial mas com barras desconexas, isto é, com ilhas. O que pode ser realizado, eventualmente, é uma relaxação nos critérios de carregamento nesta etapa (por exemplo, aceitar carregamento de alimentadores e subestações até 20% acima do máximo), dado que estes critérios serão verificados após o cálculo elétrico da configuração, que permite a determinação da função de avaliação do indivíduo

correspondente. Por outro lado, em AGs é salutar que alguns indivíduos que, mesmo apresentando características ruins (como é o caso da violação de critérios de carregamento), tragam com si outras características boas, que estão presentes em seu material genético (presentes em seus sub-blocos de informação, também chamados de *schemata* [41]), e que podem ser repassados para gerações futuras, ajudando portanto a produzir indivíduos que acabam por satisfazer todas as características desejadas. E, ainda, para favorecer a não utilização do controle rígido desses parâmetros durante o processo de decodificação, vale lembrar que as violações de critérios de carregamentos podem ser consideradas mais amenas do que a violação da restrição de balanço de demanda, em virtude da geração de configurações apresentando ilhas.

O procedimento de decodificação aqui exposto funciona como um filtro topológico da codificação do *string*. O que é interessante neste tipo de decodificação é que são geradas somente configurações radiais para posterior análise, o que assegura a eficiência do algoritmo genético, mesmo em sua forma canônica, utilizando os operadores genéticos básicos. Destaca-se, mais uma vez que, pelo processo de decodificação utilizado, diferentes *strings* podem levar a mesma configuração de redes, sem no entanto restringir a escolha de qualquer solução viável. O importante é que existe uma correspondência direta entre um dado *string* e uma dada configuração, visto que as regras de decodificação são bem definidas e determinísticas, o que permite ao AG avaliar as características de cada indivíduo levando o seu funcionamento a contento, e de forma eficiente.

4.3.3 Função de Avaliação e Restrições

4.3.3.1 Função Objetivo

Neste capítulo, por simplicidade, o foco é dirigido para o problema de reconfiguração de redes. Desta forma, deseja-se determinar os estados das chaves de manobra do sistema que levem à otimização de um dado objetivo, por exemplo, ao mínimo valor de perdas na rede. Obviamente, poder-se-ia pensar em outros objetivos que são função da configuração da rede, como por exemplo, a minimização da energia não distribuída, a otimização do perfil de tensões ou a otimização do perfil de carregamento de alimentadores e subestações de distribuição. No entanto, para efeito de análise, considera-se tão somente a minimização das perdas, deixando outros objetivos para uma discussão posterior.

Conforme apresentado no capítulo 3, a função de avaliação está intimamente relacionada com a função objetivo do problema. No caso da função objetivo de minimização de perdas, deve-se buscar uma função de avaliação que seja tanto maior quanto menores forem as perdas elétricas totais na rede elétrica.

Ou seja, ao procurar aquele indivíduo que se ajuste o máximo possível às características desejadas, ao longo das gerações, indiretamente estará sendo maximizada a função de avaliação, que deverá corresponder à solução de configuração de rede apresentando mínimas perdas elétricas.

As equações (3.1) e (3.2), apresentadas no item 3.2.2 do capítulo 3, fornecem duas alternativas interessantes para serem utilizadas como função de avaliação. Na opção (3.2) tem-se que definir um valor mínimo das perdas, a priori. Obviamente, este é um valor de referência e não há problema se houver um certo erro na definição deste valor. O que ocorre é que se este valor for maior (menor) que as perdas mínimas da rede, a função de avaliação para a solução ótima torna-se maior (menor) que 1. De qualquer forma, podem ser citadas duas formas para o cálculo desse valor mínimo de referência:

- (i) Adota-se o valor da perda mínima como sendo correspondente a uma rede elétrica hipotética, na qual todas as barras seriam supridas diretamente da subestação mais próxima, através do cabo de maior seção transversal;
- (ii) Adota-se o valor da perda mínima como sendo uma porcentagem fixa da demanda total, por exemplo, 5% da carga do sistema.

A condição (i) geralmente fornece um valor ideal para as perdas elétricas do sistema, ou seja, que é sempre menor que as perdas mínimas correspondentes à solução ótima. Este fato torna esta alternativa não muito atrativa, pois faz com que os indivíduos sejam avaliados em valores muito baixos.

A condição (ii) é mais prática e corresponde a uma certa meta fixada para as perdas elétricas na rede primária. Os engenheiros que trabalham com gerenciamento de perdas técnicas (ou não técnicas, isto é, comerciais) da rede estão bastante familiarizados com os percentuais a serem colocados como metas a serem atingidas. Dependendo da solução encontrada pelo AG e correspondente valor

da função de avaliação, o engenheiro tem noção clara do quanto o valor das perdas obtido está afastado (nos dois sentidos) da meta pré-estabelecida.

4.3.3.2 Restrições

Em AGs, conforme descrito no capítulo 3, as restrições do problema devem ser refletidas na função de avaliação a ser aplicada a cada indivíduo; mostrou-se que o método das penalidades, que permite a transformação de um problema de otimização com restrições para um sem restrições, é bastante interessante, modificando o valor da função objetivo conforme equação (3.4) e, indiretamente, o valor da função de avaliação. Assim, substituindo (3.4) em (3.2), tem-se:

$$f_{aval,i} = \frac{perda_{\min}}{perdas_i + \sum_{j=1}^{n_{restr}} r_j P_{i,j}} \quad (4.1)$$

onde $P_{i,j}$ representa a violação da j -ésima restrição na configuração relativa ao indivíduo i , cfr. eq. (3.5), r_j é o peso correspondente dado a esta violação e n_{restr} representa o número de restrições do problema.

Alternativamente, pode-se aplicar uma penalização diretamente na função de avaliação, conforme a seguir:

$$f_{aval,i} = \frac{perda_{\min}}{perdas_i} \cdot \phi_{pen,i} \quad (4.2)$$

onde $\phi_{pen,i}$ é uma função global de penalização a ser aplicada sobre a função de avaliação original do indivíduo i , que engloba a violação em todas as restrições do problema. Esta função assume valores menores ou iguais a 1; quando todas as restrições são atendidas esta função vale 1 e, quanto mais sérias as violações, tanto mais próximo de 0 (zero) será o valor da função.

Dado que o processo de decodificação apresentado no item anterior fornece soluções viáveis sob o ponto de vista de topologia, a função de penalização representa tão somente possíveis violações nos

critérios de tensão e de carregamento dos componentes da rede. Assim, serão analisadas três alternativas para a consideração de penalizações na função objetivo, ou seja, para a função $\phi_{pen,i}$, que engloba violação em todas as restrições do problema.

Alternativa 1:

Uma primeira idéia para incorporar as restrições do problema como penalização na função de avaliação parte da determinação dos valores máximos de queda de tensão, de carregamento de trechos de rede e do carregamento de subestações para uma dada configuração de rede, correspondente a um *string* representante de um indivíduo *i*.

A função de penalização pode ser composta por fatores multiplicativos, que são tão menores quanto maior a violação dos correspondentes valores máximos de queda de tensão e carregamento. Assim, tem-se que $\phi_{pen,i} = f_{mult,dv,i} \cdot f_{mult,carTre,i} \cdot f_{mult,carSE,i}$, onde $f_{mult,dv,i}$, $f_{mult,carTre,i}$ e $f_{mult,carSE,i}$ correspondem, respectivamente, aos fatores multiplicativos de violação em tensão, em carregamento de trechos e em carregamento de subestações. Um exemplo de determinação dos fatores multiplicativos, com variação linear em relação aos valores máximos dos parâmetros, é ilustrado na figura 4.12. Destaca-se que os valores ‘iniciais’ das funções f_{dvo} , f_{co} e f_{cso} são valores definidos a priori, obviamente menores ou iguais a 1. Os valores de ΔV_o , Car_o e Car_{so} , também definidos a priori, correspondem a uma espécie de relaxação e, juntamente com os valores iniciais, ajudam a definir a importância de cada critério.

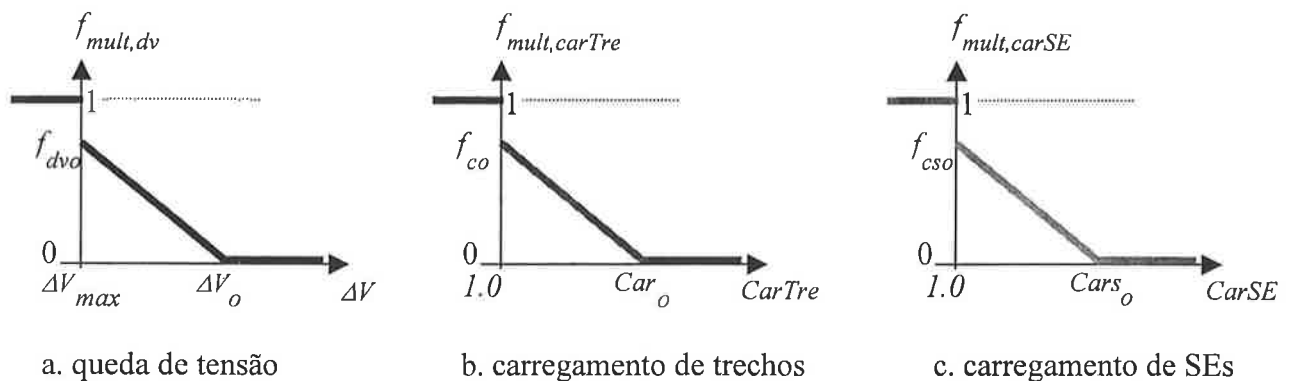


Fig. 4.12 – Fatores multiplicativos para penalização da função de avaliação

Desta forma, as funções que fornecem os fatores multiplicativos dos parâmetros de violação de

queda de tensão e carregamento podem ser simplesmente dadas por:

$$f_{mult,dv} = \begin{cases} = 1 & \text{p/ } \Delta V \leq \Delta V_{\max} \\ = f_{dvo} \left(\frac{\Delta V_o - \Delta V}{\Delta V_o - \Delta V_{\max}} \right) & \text{p/ } \Delta V_{\max} \leq \Delta V \leq \Delta V_o \\ = 0 & \text{p/ } \Delta V \geq \Delta V_o \end{cases} \quad (4.3)$$

$$f_{mult,car} = \begin{cases} = 1 & \text{p/ } Car \leq 1 \\ = f_{co} \left(\frac{Car_o - Car}{Car_o - 1} \right) & \text{p/ } 1 \leq Car \leq Car_o \\ = 0 & \text{p/ } Car \geq Car_o \end{cases} \quad (4.4)$$

Alternativa 2:

A alternativa 1 de consideração das restrições no AG para o problema de configuração de redes permite que sejam penalizados aqueles indivíduos (e configurações correspondentes) nos quais pelo menos uma ligação da rede ou uma subestação tenha seu carregamento excedido ou pelo menos uma barra apresente queda de tensão acima do valor máximo admissível.

É interessante analisar um caso hipotético, no qual somente um trecho de rede curto (em comprimento) ou somente uma barra da rede com pequena carga estejam com critério violado. Um segundo caso hipotético seria aquele no qual, para a mesma rede, porém com configuração distinta, grande quantidade de trechos (ou grande comprimento de rede) e grande quantidade de barras apresentam violações de critérios. Esses dois casos, ilustrados na figura 4.13, apresentam os mesmos valores de queda de tensão máxima na rede e de carregamento máximo em trechos.

Nos dois casos da figura 4.13, os fatores multiplicativos para penalização da função de avaliação resultam os mesmos, embora seja notório que a configuração correspondente ao caso hipotético 2 apresenta muito mais problemas de violação dos critérios de tensão e carregamento. A alternativa 1 apresenta, desta forma, a desvantagem de analisar apenas o valor máximo de violação dos critérios, ao invés de analisar os perfis de carregamento e tensão, como seria o mais conveniente. Com certeza, no âmbito dos AGs, a configuração 1 apresenta características mais próximas das desejadas, mas a sua função de avaliação penalizada resulta igual a da configuração 2.

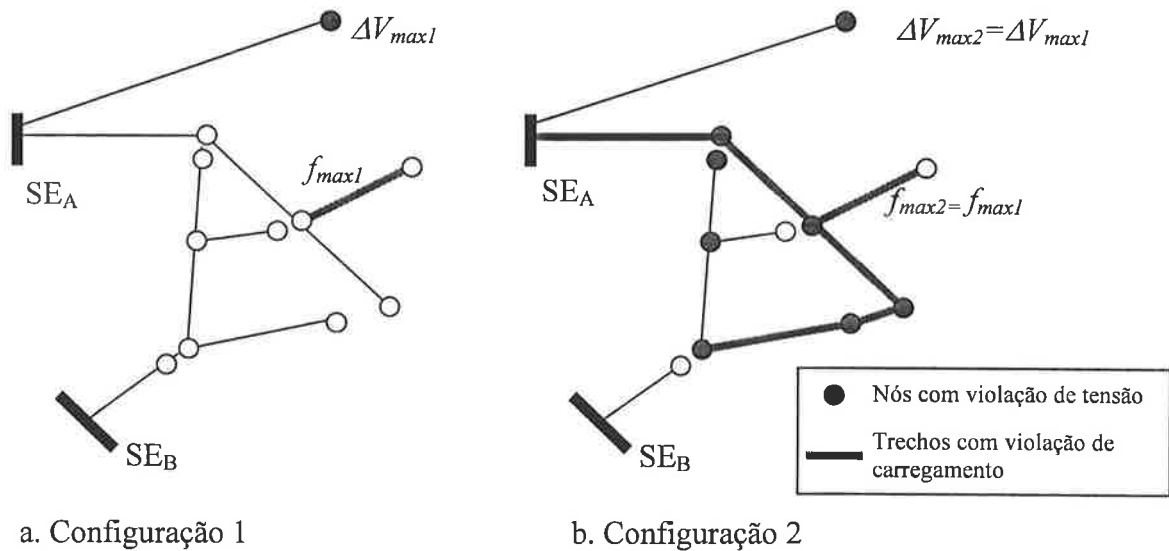


Fig. 4.13 – Casos ilustrativos de acompanhamento apenas dos valores máximos de violação

A alternativa 2 permite considerar uma análise dos perfis de tensão e carregamento e, a partir destes, proceder a uma melhor penalização da função de avaliação, eliminando desta forma o problema da alternativa anterior.

A consideração das restrições de queda de tensão e de carregamento parte do conceito de notas (ou índices de mérito) associadas ao perfil de tensão e aos perfis de carregamento (de trechos de rede e de subestações), definindo-se, respectivamente as notas N_{dv} , $N_{car,tre}$ e $N_{car,SE}$. Tais notas podem ser definidas conforme equações a seguir:

$$N_{dv} = \frac{\sum_i P_{i,1} \cdot N_1 + \sum_i P_{i,2} \cdot N_2 + \sum_i P_{i,3} \cdot N_3}{\sum_{i,k} P_{i,k}} \quad (4.5)$$

$$N_{car,tre} = \frac{\sum_{ij} l_{ij,1} \cdot N'_1 + \sum_{ij} l_{ij,2} \cdot N'_2 + \sum_{ij} l_{ij,3} \cdot N'_3}{\sum_{ij,k} l_{ij,k}} \quad (4.6)$$

$$N_{car,SE} = \frac{\sum_j P_{SEj,1} \cdot N''_1 + \sum_j P_{SEj,2} \cdot N''_2 + \sum_j P_{SEj,3} \cdot N''_3}{\sum_{j,k} P_{SEj,k}} \quad (4.7)$$

onde:

$P_{i,k}$ - carga da barra i na faixa de tensão k (por exemplo, faixa 1 entre 1,0 e 0,97pu, faixa 2 entre 0,97 e 0,93pu e faixa 3 abaixo de 0,93pu);

$l_{ij,k}$ - comprimento do trecho ij na faixa de carregamento k (por exemplo, faixa 1 entre 0 e 0,67pu, faixa 2 entre 0,67 e 1pu e faixa 3 acima de 1pu da capacidade admissível do trecho);

$P_{SEj,k}$ - potência fornecida pela SE j na faixa de carregamento k (por exemplo, faixa 1 entre 0 e 0,80pu, faixa 2 entre 0,80 e 1,0 pu e faixa 3 acima de 1,0pu da capacidade firme da SE);

N_1, N_2, N_3 - notas associadas às faixas de tensão 1, 2 e 3 (por exemplo, Notas 10, 5 e 0, respectivamente);

N'_1, N'_2, N'_3 - notas associadas às faixas de carregamento de trechos 1, 2 e 3 (por exemplo, Notas 10, 5 e 0, respectivamente);

N''_1, N''_2, N''_3 - notas associadas às faixas de carregamento de SEs 1, 2 e 3 (por exemplo, Notas 10, 5 e 0, respectivamente);

Com as definições (4.5), (4.6) e (4.7), pode-se dizer que o perfil de tensão (ou carregamento) de toda a rede estará melhor (ou mais ajustado) quanto mais próximo estiver da nota 10 e tanto pior quanto mais próximo estiver da nota 0. Obviamente, o número de faixas poderia ser variado conforme o problema em estudo.

Os fatores multiplicativos de tensão ($f_{mult,dv}$) e carregamento ($f_{mult,car}$), que penalizam a função de avaliação, ou seja que definem a função de penalização $\phi_{pen,i}$, podem ser estabelecidos como função de tais notas, conforme ilustrado na figura 4.14. Notar que as funções utilizadas são lineares, definindo-se uma nota mínima na qual o fator multiplicativo passa a ser positivo; esta é apenas uma proposição, sendo alvo de ulteriores estudos a pesquisa de outros tipos de funções, lineares ou não-lineares, que melhor representem a função de penalização.

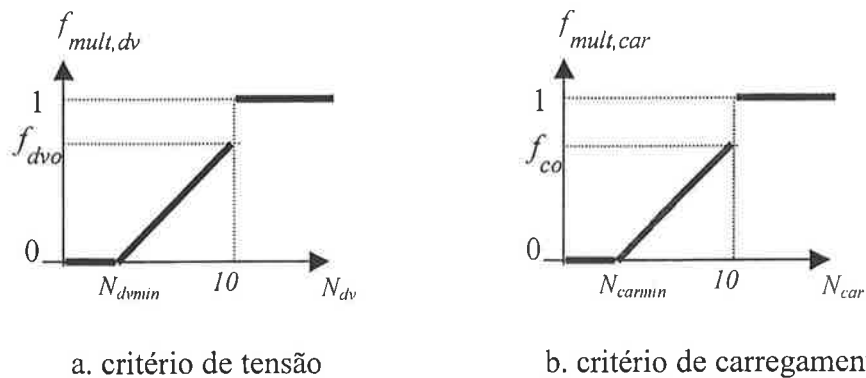


Fig. 4.14 – Fatores multiplicativos de tensão e carregamento em função das respectivas notas

Aquelas configurações que não apresentam nenhuma violação de restrições e, ainda apresentam níveis de tensão e carregamento na faixa mais desejável possível, obviamente não serão penalizadas e os correspondentes fatores multiplicativos serão unitários. Isto mostra uma característica multiobjetivo do método proposto, no qual não só tem-se uma minimização de perdas na rede elétrica, mas também uma consideração dos aspectos de carregamento e tensão da rede, otimizando-se, de certa forma, os atributos correspondentes.

Obviamente, o engenheiro pode variar os diversos parâmetros de acordo com a sua vontade, para simular diferentes características. Por exemplo, variando-se as notas das três faixas de tensão (e carregamento) para 10; 0 e 0, a penalização só passa a existir quando realmente o critério em qualquer barra do sistema (tensão abaixo de 0,93 pu ou carregamento acima de 1pu) é violado.

Alternativa 3:

A alternativa 3 é um pouco mais elaborada que as anteriores. Nesta, avalia-se o mínimo corte de carga que deveria ser necessário para a eliminação das violações nos critérios de carregamento e tensão.

Desta forma, quanto menor for o corte de carga, tanto mais próximo os perfis de tensão e carregamento estarão da situação desejada, ou seja, de uma solução viável sob o ponto de vista dos critérios técnicos de tensão e carregamento.

A vantagem de uma abordagem deste tipo é que os critérios de tensão e carregamento são tratados, indiretamente, através de uma única grandeza, o que permite incorporar a penalização dos critérios em um único fator multiplicativo. A figura 4.15 ilustra a obtenção deste fator multiplicativo.

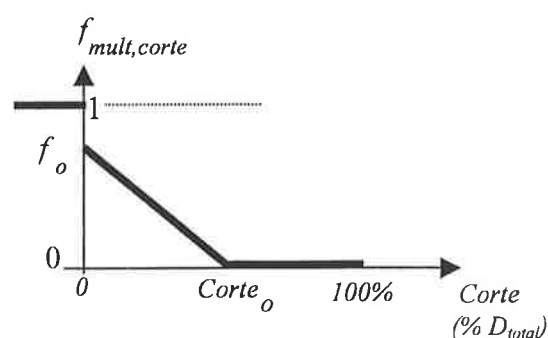


Fig. 4.15 – Fator Multiplicativo (função de penalização) para Alternativa 3

Outra vantagem desta alternativa é o conhecimento, com considerável grau de precisão, do custo de um corte de carga que corresponde ao custo de não se atender certa demanda no sistema.

A determinação dos cortes de carga para condução dos perfis de carregamento e de tensão para faixas aceitáveis pode ser realizada de maneira seqüencial, isto é, inicialmente avalia-se o corte de carga por critério de carregamento e, em seguida, o corte de carga por critério de tensão.

A avaliação do corte de carga por critério de carregamento é ilustrada na figura 4.16. Obviamente, quando um determinado trecho de rede tem seu carregamento excedido, parte da carga a sua jusante deve ser cortada; no caso particular da figura 4.16a, o corte de carga deve ocorrer na barra 8 ou na barra 9, ou ainda, dependendo do valor da violação de carregamento na ligação 7-8, em ambas as barras.

Quando da preocupação pelo custo do corte de carga, os centros de carga do sistema podem apresentar custos unitários (R\$/kW) diferenciados e, desta forma, as barras nas quais ocorreria corte de carga deveriam ser ordenadas segundo sua importância. Assim se, no exemplo da fig. 4.16a, a barra 9 apresentar custo menor que o da barra 8, deverá ser dada preferência ao corte de carga nesta barra.

Em geral, deve-se sempre procurar minimizar o corte de carga ou, caso haja diferenciação em pontos do sistema, o custo correspondente. Na fig. 4.16b, por exemplo, o corte de carga nas barras 8 ou 9 tem influência direta no fluxo das ligações 4-5 e 7-8, com violação de carregamento e, portanto, devem ser priorizadas para serem aplicados cortes de carga.

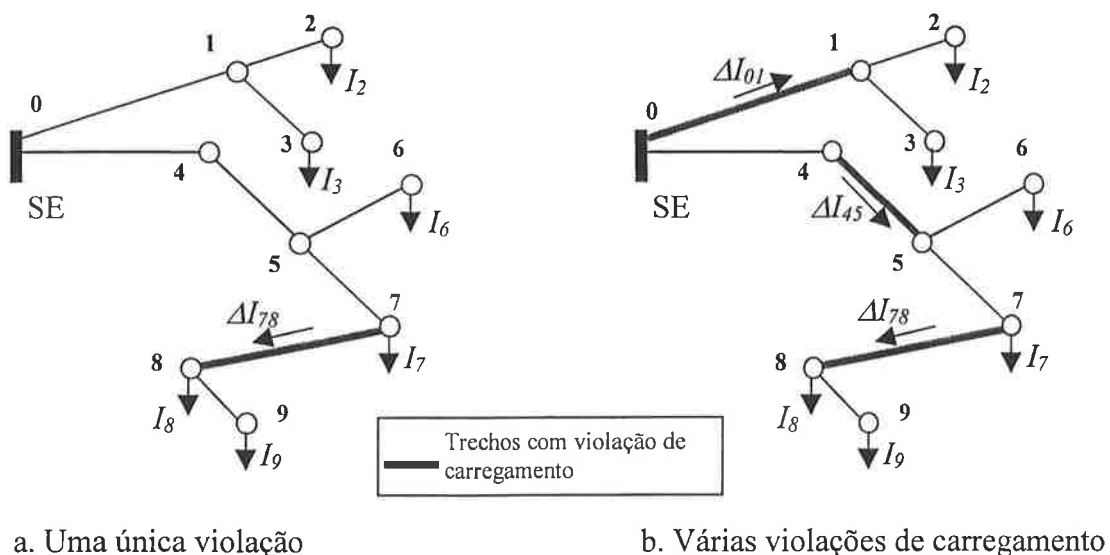


Figura 4.16 – Corte de carga para violação de carregamento

A estratégia, assumindo-se todas as cargas com mesma importância, seria percorrer a lista ordenada de barras (vide cap. 2, item 2.4.4), das barras de fim de linha em direção à subestação. Para cada barra, seria verificado se existe algum trecho a montante (até alcançar a SE) que tenha violação de carregamento e, nesta, seria cortada carga correspondente à máxima violação encontrada ou, se a máxima violação fosse maior que a própria carga, toda a carga da barra seria cortada; atualizam-se então os fluxos em todos os trechos a montante. Continua-se o procedimento até ser alcançada a barra da SE. A tabela 4.1 (a e b) ilustra o procedimento, onde foram considerados, arbitrariamente, os valores de cargas e de violações. Para mostrar a seqüência de passos até ser alcançada a eliminação de violação de carregamentos, as setas entre as partes a) e b) da tabela indicam os passos realizados de forma seqüencial (do passo 1 ao 9), identificados por diferentes cores; a operação de corte que cada passo provoca é identificada nas atualizações das colunas de correntes de carga e violação de carregamento, utilizando as cores correspondentes.

Deve-se salientar que esta estratégia permite também a eliminação de violação de carregamento em subestações do sistema, bastando considerá-las como ligações especiais do sistema. Uma extensão deste procedimento possibilita a consideração de caso de custos diferenciados de cortes de carga em barras do sistema. Porém não é descrita aqui, por fugir ao escopo principal do trabalho aqui proposto.

Tabela 4.1 Estratégia de cortes de carga mínimos para eliminação de violações de carregamento
 a. Rede ordenada
 b. Cortes de carga

Nó	Nó Ant.	Corrente Carga (pu)	Violação (pu)
0			
1	0		$\Delta I_{01}=1.1$
4	0		
2	1	$I_2=1.1$	
3	1	$I_3=1.0$	
5	4		$\Delta I_{45}=2.1$
6	5	$I_6=0.2$	
7	5	$I_7=1.9$	
8	7	$I_8=1.0$	$\Delta I_{78}=1.0$
9	8	$I_9=1.0$	

Nó	Nó Ant.	Corrente Carga (pu)	Violação (pu)
0			
1	0		$\Delta I_{01}=1.1-1.0-0.1=0.0$
4	0		
2	1	$I_2=1.1-0.1=1.0$	
3	1	$I_3=1.0-1.0=0.0$	
5	4		$\Delta I_{45}=2.1-1.0-1.0-0.1=0.0$
6	5	$I_6=0.2$	
7	5	$I_7=1.9-0.1=1.8$	
8	7	$I_8=1.0-1.0=0.0$	$\Delta I_{78}=1.0-1.0=0.0$
9	8	$I_9=1.0-1.0=0.0$	
Corte total = 3.2pu			

↑9
 ↑8
 ↑7
 ↑6
 ↑5
 ↑4
 ↑3
 ↑2
 ↑1

Uma vez eliminadas as transgressões nos critérios de carregamento, deve ser analisado o impacto dos correspondentes cortes de carga nos níveis de tensão. Caso existissem violações de tensão a princípio, estas poderiam ter sido eliminadas com estes cortes de carga. Se, no entanto, ainda

existirem transgressões nos limites mínimos de tensão na rede, deve-se realizar cortes adicionais de carga.

Duas metodologias são, a seguir, sucintamente apresentadas para eliminação de transgressões em critérios de níveis de tensão.

Metodologia 1: O problema é abordado através de formulação por programação linear. A formulação (4.8) a seguir possibilita a determinação dos valores de corte de carga (ΔI) para condução dos níveis de tensão baixos à faixa aceitável.

$$\begin{aligned} & \min \sum_{i=1}^n C_i \Delta I_i \\ & \text{s.a.} \\ & \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ - \\ \Delta V_j \\ - \\ \Delta V_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & - & - & Z_{1i} & - & - & Z_{1n} \\ - & - & - & - & - & - & - \\ Z_{j1} & - & - & Z_{ji} & - & - & Z_{jn} \\ - & - & - & - & - & - & - \\ Z_{m1} & - & - & Z_{mj} & - & - & Z_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_1 \\ - \\ \Delta I_i \\ - \\ - \\ - \\ \Delta I_n \end{bmatrix} \\ & \Delta V_{\min,j} \leq \Delta V_j \leq \Delta V_{\max,j}, \quad j = 1, \dots, m \\ & 0 \leq \Delta I_i \leq I_i \end{aligned} \tag{4.8}$$

onde:

- ΔV_j aumento na tensão na barra j , que apresenta tensão abaixo do mínimo, devido a cortes de carga;
- $\Delta V_{\min,j}$ aumento de tensão mínimo na barra j para esta alcançar o limite mínimo;
- $\Delta V_{\max,j}$ aumento de tensão máximo na barra j , correspondente ao limite máximo;
- Z_{ji} elemento ji da matriz de impedâncias nodais¹, que é determinada assumindo-se como referência a barra da subestação [60, 61];

¹ O problema de programação linear deve ser formulado com números reais, porém Z_{ji} é uma impedância e, portanto, representada por número complexo. Aqui são utilizadas impedâncias equivalentes (próprias, jj , e de transferência, ji), dadas por $Z_{ji} = R_{ji} \cdot \cos\phi + X_{ji} \cdot \text{sen}\phi$, assumindo-se, obviamente, um fator de potência igual para todas as cargas.

- $\Delta I_i, I_i$ corte de carga e valor da carga (dados em corrente), respectivamente, na barra i ;
- C_i custo unitário de corte de carga na barra i ;
- n número de barras nas quais podem ser realizados cortes de carga;
- m número de barras com tensão abaixo do limite mínimo.

A formulação (4.8) fornece o valor de corte de carga mínimo para levar os níveis de tensão do sistema, em uma dada configuração, para a faixa aceitável. Para ilustrar a metodologia proposta, suponha que a rede da fig. 4.16b, após ser cortada carga por critério de carregamento, ainda apresenta transgressões nos níveis de tensão. A tabela 4.2 apresenta os dados complementares desta rede, onde assume-se tensões mínima e máxima iguais a 0.95 e 1.05 pu, respectivamente.

Tabela 4.2 Dados para corte de carga por critério de tensão

Nó	Nó Ant.	Corrente Carga (pu)	Impedância equiv. (pu)	Tensão (pu)	Corrente no trecho (pu)	Violação tensão (pu)	$\Delta V_{\min,j}$	$\Delta V_{\max,j}$
0	-	-	-	1.000	3.0	0.0	-	-
1	0		0.05	0.950	1.0	0.0	-	-
4	0		0.02	0.960	2.0	0.0	-	-
2	1	1.0	0.06	0.890	1.0	0.010	0.010	0.160
3	1	0.0	0.03	0.890	0.0	0.0	-	-
5	4		0.03	0.900	2.0	0.0	-	-
6	5	0.2	0.10	0.880	0.2	0.020	0.020	0.170
7	5	1.8	0.01	0.882	1.8	0.018	0.018	0.168
8	7	0.0	0.01	0.882	0.0	0.018	0.018	0.168
9	8	0.0	0.01	0.882	0.0	0.018	0.018	0.168

As restrições do problema, referentes à partição necessária da matriz de impedâncias nodais, são dadas por:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_2 \\ \Delta V_6 \\ \Delta V_7 \\ \Delta V_8 \\ \Delta V_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.11 & 0 & 0 \\ 0 & 0.15 & 0.05 \\ 0 & 0.05 & 0.06 \\ 0 & 0.05 & 0.06 \\ 0 & 0.05 & 0.06 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_2 \\ \Delta I_6 \\ \Delta I_7 \end{bmatrix}$$

Assumindo-se custos unitários de corte de carga iguais para todas as barras (1 unidade/pu), a solução da formulação (4.8) resulta:

- Custo total do corte de carga: 0.3986 unidades;
- Cortes de carga: $\Delta I_2=0.9091\text{pu}$, $\Delta I_6=0.0462\text{pu}$, $\Delta I_7=0.2615\text{pu}$;

o que leva as tensões nas barras 2, 6, 7, 8 e 9 para o limite mínimo (0.9 pu).

Metodologia 2: Corresponde a um procedimento passo-a-passo, que leva a eliminar, gradualmente, todas as violações de tensão. Parte do conceito de ganho de tensão, já bastante utilizado em problemas de compensação reativa em sistemas de distribuição [62, 63].

Define-se como ganho de tensão de uma barra i , onde deseja-se efetuar corte de carga, $Ganho_i$, como sendo a seguinte expressão:

$$Ganho_i = \frac{\sum_{j=1}^m \Delta V_{j,i}}{C_i} \quad (4.9)$$

onde C_i é o custo unitário de corte de carga na barra i ; $\Delta V_{j,i}$ representa o aumento de tensão na barra j devido a 1 pu de corte de carga na barra i , o que corresponde à própria definição do elemento Z_{ji} da matriz de impedâncias nodais, isto é, $\Delta V_{j,i} = Z_{ji}$. Neste método procede-se segundo os passos a seguir:

- (i) verifica-se aquela barra i que apresenta o maior ganho de tensão, cfr. eq. 4.9;
- (ii) corta-se a carga necessária da barra i , limitada à potência da carga, que procura levar as tensões nas barras afetadas para a faixa aceitável;
- (iii) corrigem-se as tensões em todas as barras com tensão baixa, utilizando a matriz de impedâncias nodais ($V'_j = V_j + Z_{ji} \cdot \Delta I_i$);
- (iv) caso ainda restem barras com tensão abaixo do valor mínimo, continua-se o processo, retornando ao passo (i); caso contrário, o procedimento é terminado.

Aplicando-se o método para o problema anterior, tem-se:

1ª Iteração:

Ganhos de tensão: $Ganho_2 = 0.11$; $Ganho_6 = 0.30$; $Ganho_7 = 0.23 pu / unidade \Rightarrow i=6$

Corte de carga: $\Delta I_6 = 0.2 pu$

Novas tensões: $V_2 = 0.89$; $V_6 = 0.92$; $V_7 = V_8 = V_9 = 0,892 pu$

2ª Iteração:

Ganhos de tensão: $Ganho_2 = 0.11$; $Ganho_7 = 0.18 pu / unidade \Rightarrow i=7$

Corte de carga: $\Delta I_7 = (0.9 - 0.892) / 0.06 = 0.1333 pu$

Novas tensões: $V_2 = 0.89$; $V_6 = 0.92$; $V_7 = V_8 = V_9 = 0,90 pu$

3ª Iteração:

Ganhos de tensão: $Ganho_2 = 0.11$; $Ganho_7 = 0 pu / unidade \Rightarrow i=2$

Corte de carga: $\Delta I_2 = (0.9 - 0.89) / 0.11 = 0.0909 pu$

Novas tensões: $V_2 = 0.90$; $V_6 = 0.92$; $V_7 = V_8 = V_9 = 0,90 pu$

Nota-se que, pela aplicação desta metodologia, o corte de carga total resulta em 0.4242 pu, aproximadamente 6% acima do valor obtido pela metodologia 1, que utiliza programação linear.

A inclusão da Alternativa 3 para a determinação da função de penalização a ser imputada à função de avaliação, em cada indivíduo do AG, pode, por um lado, levar a resultados bastante interessantes, resultando em maior eficiência do método, principalmente no que se refere ao número de gerações para convergência do processo. No entanto, por outro lado, existe uma necessidade de implementação computacional da rotina de corte de carga, para cada indivíduo, que pode levar a um aumento substancial dos tempos de processamento. Sem dúvida alguma, a utilização da metodologia 1 para corte de carga por critério de tensão, que baseia-se em programação linear, levará a um maior aumento dos esforços computacionais quando comparada com a metodologia 2. Assim, a implementação da rotina de cortes de carga, de modo a ser eficiente em termos de tempo de processamento, deveria seguir a estratégia seqüencial de corte de carga, primeiro para eliminação de violações de carregamento e depois para violações de níveis de tensão, pela metodologia 2.

4.4 Conjuntos *Fuzzy*

4.4.1 Considerações Iniciais

O método exposto para a modelagem de problemas de configuração de redes por AG é bastante eficiente, o que será melhor explorado nos casos-teste a serem apresentados no capítulo seguinte, mostrando que dificuldades que existiam na consideração de várias opções de modelagem nos métodos baseados em algoritmos de otimização desaparecem com o modelo tratado aqui neste trabalho.

Porém, até aqui, a modelagem apresentada é determinística, no sentido que não são consideradas incertezas e aspectos subjetivos do problema. Conforme apresentado no capítulo 2, estes aspectos foram incorporados aos métodos baseados em programação matemática e aos métodos baseados em busca heurística.

Nesse item, são apresentadas algumas possibilidades de aplicação dos conjuntos difusos na modelagem do problema de configuração de redes por AGs. Assim, são tecidos comentários quanto aos seguintes aspectos:

- Relações entre métodos de agregação *fuzzy* (expostos no item 2.4.2) e a função de avaliação, o que permite uma estrutura bastante interessante para estender o AG aqui proposto em problemas de múltiplos objetivos, que necessitam a incorporação dos aspectos subjetivos relacionados à tomada de decisão.
- Consideração de incertezas, principalmente nos valores das demandas em cada centro de carga, que podem ser representadas por números *fuzzy*, que resultam em incertezas nos principais parâmetros do problema, como por exemplo, nos valores das perdas elétricas, nas quedas de tensão e nos carregamentos de componentes do sistema; todos esses parâmetros são representados por números *fuzzy*, avaliados pelo fluxo de potência *fuzzy*, descrito no item 2.4.4 desta tese.
- Relaxação de critérios e manipulação de valores globais de riscos de não atendimento das restrições do problema.

4.4.2 Agregação *fuzzy* no AG para configuração de redes

O problema de configuração de redes pode ser considerado em ambiente *fuzzy*, conforme mostrado no item 2.4.2, que segue basicamente os conceitos do trabalho de Bellman e Zadeh [33]. Conforme descrito naquele item, as restrições e objetivos *fuzzy* podem ser incorporados em um modelo de decisão de forma simétrica. Isto quer dizer que objetivos e restrições são tratados com o mesmo nível de importância; na verdade, objetivos e restrições se confundem dentro do modelo, sendo ambos manipulados através de suas funções de pertinência.

Apenas para posicionamento, é conveniente destacar que as funções de pertinência de objetivos e restrições baseiam-se nos seguintes aspectos:

- Funções de pertinência de objetivos: o tomador de decisão procura por soluções tão próximas da solução ideal (na qual todos os objetivos seriam otimizados simultaneamente) quanto possível. A função de pertinência de um dado objetivo é a maneira do tomador de decisão expressar o grau de satisfação de um dado objetivo em relação ao seu valor ideal. Para uma dada solução do problema em questão, quanto mais próximo de 1 esta função de pertinência estiver, tão mais próximo do valor ideal estará o objetivo.
- Funções de pertinência de restrições: restrições também podem ser consideradas de maneira *fuzzy*; no caso da queda de tensão, por exemplo, quanto mais próximo o perfil de tensão estiver da condição satisfatória (todos os nós com tensão dentro da faixa satisfatória de tensão), maior e mais próximo de 1 será o grau de pertinência; quanto mais violações forem encontradas, mais próximo de 0.

A figura 2.6 (no capítulo 2) ilustra muito bem a idéia de tomada de decisão em ambiente *fuzzy*, quando um único objetivo e uma única restrição são consideradas. As funções de pertinência μ_{obj} e μ_{restr} caracterizam, respectivamente, os graus de satisfação do objetivo e da restrição. Conforme mencionado anteriormente, deve-se procurar uma solução do problema que satisfaça, simultaneamente, o objetivo e a restrição. Assim, o conectivo $\underline{\text{e}}$ representa, sob certas condições, a intersecção dos dois conjuntos difusos, representados pelas suas funções de pertinência. O conjunto de decisão *fuzzy* é caracterizado por uma função de pertinência μ_D que pode ser determinada por um operador (\otimes) que agrega as funções de pertinência do objetivo e de restrição, isto é: $\mu_D = \mu_{obj} \otimes \mu_{restr}$. No caso de ser desejada uma solução única, procura-se aquela em que a função de

pertinência, associada ao conjunto de decisão *fuzzy*, apresente valor máximo, o que pode ser dado por:

$$\mu_D(\mathbf{x}_{\max}) = \max_{\mathbf{x} \in X} [\mu_{obj}(\mathbf{x}) \otimes \mu_{restr}(\mathbf{x})] \quad (4.10)$$

A equação (4.10) pode ser estendida para o caso de múltiplos objetivos e restrições, conforme equação (2.9) – capítulo 2. Vários operadores de agregação foram analisados na literatura [3, 35], e considerados nos modelos baseados em programação matemática. Suas expressões são representadas conjuntamente na tabela 4.3, onde os objetivos são genericamente representados por índices *i* e restrições por índices *j*, denotando que podem existir múltiplos objetivos e restrições no problema.

Tabela 4.3 – Operadores de agregação

Operador (*)	Expressão
Mínimo	$\min(\mu_{obj,i}, \mu_{restr,j})$
Produto	$\mu_{obj,i} * \mu_{restr,j}$
e-compensatório	$\gamma \min(\mu_{obj,i}, \mu_{restr,j}) + (1 - \gamma) \max(\mu_{obj,i}, \mu_{restr,j})$
e-fuzzy	$\gamma \min(\mu_{obj,i}, \mu_{restr,j}) + (1 - \gamma) \frac{1}{n + m} (\sum_1^n \mu_{obj,i} + \sum_1^m \mu_{restr,j})$

Por outro lado, a função de avaliação, cfr. equação (4.2), realiza o produto da função objetivo (inversamente proporcional às perdas totais em dada configuração) pela função de penalização. Na realidade, estas duas funções podem ser entendidas como funções de pertinência:

- quanto mais próxima a perda, correspondente a uma configuração decodificada do *string* indivíduo *i*, estiver do valor mínimo de referência, tão mais próximo de 1.0 estará esta função;
- quanto menos transgressões de critérios forem verificadas, tanto maior e mais próxima de 1.0 será a função de penalização; quanto mais violações, mais próximo de 0 é a função. As alternativas mostradas para determinação desta função são típicas funções de pertinência (vide figuras 4.12, 4.14 e 4.15).

Nota-se, portanto, uma correspondência direta entre a função de pertinência do conjunto de decisão *fuzzy*, dada pela expressão (4.9), e a função de avaliação de um problema de configuração de redes dada, por exemplo, pela equação (4.2). Em particular, nesta expressão, utilizou-se o operador “produto” para agregar o objetivo (inverso das perdas) e a restrição (penalização), conforme mostrado na segunda linha da tabela 4.3.

A determinação da solução que maximiza a função de pertinência do conjunto de decisão *fuzzy* corresponde, para o problema de configuração de redes por AG, à determinação do indivíduo que melhor se ajusta às características desejadas, isto é, aquele que maximiza a função de avaliação.

A partir destas considerações, é plenamente aceitável considerar o AG, anteriormente descrito neste capítulo, na estrutura de tomada de decisão *fuzzy*, levando consigo todas as propriedades e características já estudadas por outros autores [33, 35].

Desta forma, diferentes funções de pertinência podem ser consideradas para objetivo e restrições dos problemas de configuração de redes. Neste capítulo, foram consideradas algumas possíveis funções de pertinência para as restrições do problema, mas inúmeras outras soluções, inclusive com funções não lineares, podem ser estudadas. Também, para a função de pertinência relativa ao objetivo, além da equação 4.2 e das expressas nas equações (3.1) e (3.2), do capítulo 3, podem ser vislumbradas muitas outras funções.

Assim como na utilização de funções de pertinência alternativas, outros operadores de agregação, além do “produto”, podem ser considerados para representar a função de avaliação, isto é, a função de pertinência do conjunto de decisão *fuzzy* do problema de configuração de redes por AG. Toda a lista de operadores da tabela 4.3 pode ser considerada, o que será realizado posteriormente no capítulo 5, na análise de casos teste.

Um fator muito interessante na aplicação da agregação *fuzzy* em AGs é que não existe a necessidade de determinação de formulações equivalentes, como era o caso dos modelos baseados em programação matemática *fuzzy*. Também, não existe nenhum impedimento maior na utilização de quaisquer dos operadores de agregação apresentados em conjunto com as funções de pertinência utilizadas ou outras que venham a ser propostas.

A grande, e talvez a maior vantagem de lançar os AGs para configuração de redes dentro da estrutura de tomada de decisão *fuzzy*, corresponde à extensão natural do problema para a consideração de múltiplos objetivos. No modelo proposto, era considerado tão somente um único objetivo. Na agregação *fuzzy*, são considerados múltiplos objetivos com correspondentes funções de pertinência. Assim, por exemplo, todas as funções objetivo propostas no caso de planejamento de sistemas de distribuição (cfr. capítulo 2) podem ser facilmente incorporadas no modelo por AG.

Na realidade, no caso do problema de reconfiguração de redes, múltiplos objetivos já tinham sido implicitamente considerados, tais como a minimização de perdas e a otimização dos perfis de tensão e carregamento. A diferença agora é que, num modelo de agregação *fuzzy*, que é um modelo simétrico, as funções de pertinência de objetivos e de restrições são tratadas da mesma forma e, portanto, os perfis de tensão e de carregamento são naturalmente incorporados dentro da estrutura.

4.4.3 Incertezas representadas por números *fuzzy*

Conforme visto no capítulo 3 e neste capítulo, os indivíduos gerados nas populações do AG para configuração de redes representam soluções completas. E, utilizando a decodificação de *strings* descrita no item 4.3.2, tais soluções são viáveis sob o aspecto topológico.

Desta forma, os AGs permitem que programas de análise de redes convencionais possam ser utilizados para avaliação das configurações possíveis, correspondentes a cada um dos indivíduos de cada população. Em particular, para redes de distribuição radiais, os programas de fluxo de carga são bastante eficientes, desde que a rede seja convenientemente ordenada. No capítulo 2, item 2.4.4, foi apresentado um procedimento de fluxo de potência *fuzzy* que, no caso de modelos de configuração de redes baseados em busca heurística, tem como objetivo a avaliação de soluções parciais e completas do problema.

Obviamente, tal procedimento pode ser também utilizado para análise da função de avaliação do AG aqui considerado, possibilitando que as incertezas provenientes de carga e de coeficientes da(s) função(ões) objetivo possam ser incorporadas no modelo e avaliadas suas conseqüências nos resultados básicos do problema. Ou seja, os parâmetros de queda de tensão, perdas elétricas e carregamentos podem ser considerados como grandezas *fuzzy*, representados, assim como os dados de demanda, através de números *fuzzy*.

As funções objetivo, que se baseiam em resultados do fluxo de potência e nos correspondentes coeficientes que também podem ser representados por números *fuzzy*, podem também ser avaliadas, resultando em grandezas *fuzzy*.

Na consideração de múltiplos objetivos, pode-se determinar um índice de agregação conforme equação (2.27), que compõe todos os objetivos em um único índice, representado por um número *fuzzy*. O interessante deste índice é que podem ser representados os pesos através de variáveis lingüísticas, o que possibilita uma maior flexibilidade na definição da estrutura de preferências. Uma vez definido o índice de agregação *fuzzy*, deve-se determinar sua relação, no ambiente de AGs, com a função de avaliação. Pode-se, por exemplo, avaliar tal função a partir do valor mais possível do índice de agregação. As restrições do problema podem então ser incorporadas utilizando os operadores de agregação mencionados no item anterior.

Em utilizando-se o conceito de corte de carga para o tratamento das restrições do problema, pode-se então compor um índice de agregação *fuzzy* que incorpora os múltiplos objetivos e restrições do problema, que pode ser dado pela seguinte expressão:

$$\tilde{I}_{Ag} = \frac{\sum_{k=1}^p [\tilde{\lambda}_k \cdot \tilde{z}_k(\tilde{\mathbf{x}}, \mathbf{y})] + \tilde{r} \Delta \tilde{I}(\tilde{\mathbf{x}}, \mathbf{y})}{\sum_{k=1}^p \tilde{\lambda}_k + \tilde{r}} \quad (4.11)$$

onde \tilde{r} representa, indiretamente, o pesos dado às restrições de limites de carregamento e tensão, determinados através do corte de carga total ($\Delta \tilde{I}$). A metodologia para avaliação do corte de carga, descrita no item 4.3.3, deve ser estendida para determinação da grandeza *fuzzy* correspondente, o que é realizado diretamente pelas operações aritméticas *fuzzy*. Na realidade, o índice proposto em (4.11) é uma versão *fuzzy* do método das penalidades, cfr. equação (3.4).

A função de avaliação, neste caso, pode ser avaliada a partir do índice de agregação da eq. (4.11), através de várias maneiras. Uma maneira seria trabalhar com o valor mais possível de \tilde{I}_{Ag} ; uma vez que a função de avaliação deve ser tanto maior quanto menor for este índice, pode-se utilizar alternativas análogas às apresentadas nas equações (3.1) e (3.2) – capítulo 3 para formulação desta função. Porém, esta maneira de tratamento não utiliza todas as informações fornecidas pelo número

fuzzy \tilde{I}_{Ag} , que apresenta valores mínimo e máximo e função de pertinência associada. Na verdade, existem inúmeros métodos para ordenação dos índices de agregação *fuzzy* (*ranking*), associados a cada configuração, que podem ser aplicados [35, 40], conforme ilustrado na figura 4.17. Métodos baseados em comparações sucessivas de números *fuzzy*, como o descrito no item 2.4.4, poderiam ser aplicados. Obviamente, métodos alternativos para *ranking* levariam a diferentes conseqüências sobre a função de avaliação de cada indivíduo. Esta linha de pesquisa, apesar de não ser explorada em detalhe neste trabalho, é muito promissora e deverá trazer resultados bastante positivos.

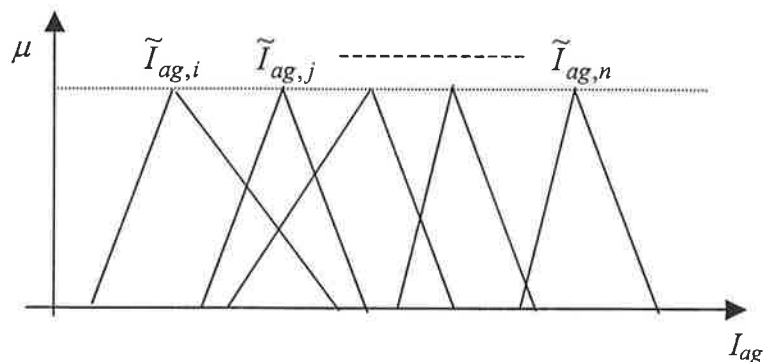


Fig. 4.17 – *Ranking* das diferentes configurações associadas a indivíduos da população

O mais importante a ser destacado é que a utilização de AGs é bastante adequada para a incorporação das incertezas nos problemas de configuração de redes. Somente soluções completas são geradas em cada população, as quais podem ser analisadas por ferramentas de análise de redes que consideram parâmetros representados por números *fuzzy*, tais como a demanda de cada centro de carga e os coeficientes das funções objetivo. A construção de um índice de mérito *fuzzy*, como por exemplo o definido em (4.11) para a avaliação de cada configuração associada a determinado indivíduo de uma população do AG, provê um grande potencial para a especificação de funções de avaliação.

4.4.4 Verificação de Restrições

A determinação dos valores de níveis de tensão e carregamento a partir do fluxo de potência *fuzzy*, representados por números *fuzzy*, possibilita vantagens, algumas delas apontadas no item anterior. No entanto, quando da determinação de grandezas *fuzzy* para as variáveis de carregamento nos componentes do sistema e níveis de tensão em barras da rede, podem ser realizados:

- Relaxação de critérios: uma vez que carregamento de componentes e quedas de tensão são representados por grandezas *fuzzy*, a determinação se uma restrição é transgredida não é tão simples; no capítulo 2, item 2.4.4, é descrito como a verificação de restrições é realizada em ambiente *fuzzy*, por comparação de números *fuzzy*. A utilização do índice otimista, σ , ilustrado na fig. 2.10 para carregamento de trechos de rede e subestações e do nível de tensão, possibilita um controle do parâmetro cujo limite é controlado. Na aplicação utilizando busca heurística foi fixado um valor mínimo, τ , deste índice otimista, para cada um dos parâmetros. Assim, pode-se facilmente verificar a violação de restrições em ambiente *fuzzy*. É interessante notar que, quanto menor o valor mínimo do índice, maior relaxação de critérios será imposta ao problema de configuração de redes. Existem duas repercussões diretas no AG aqui proposto:
 - a verificação de restrições realizada de maneira *fuzzy* resulta em diferentes valores das notas associadas aos perfis de tensão e carregamento, visto que diferentes valores do parâmetro de controle τ resultaram em diferentes classificações das barras do sistema nas faixas de tensão ou carregamento previamente definidas.
 - no problema de planejamento, como será visto no capítulo 5, a definição de determinadas obras, como por exemplo a ampliação de subestações existentes e recondução de trechos de rede, é realizada sempre que o fluxo no elemento correspondente excede o valor máximo; no entanto, com relaxação dos critérios, podem ocorrer casos em que sejam evitadas ou postergadas obras deste tipo.
- Gerenciamento do risco de violação de restrições: soluções que estejam com maior folga em relação aos limites máximos de critérios técnicos podem ser preferidas em determinadas condições. Para tanto, podem ser definidos índices de risco associados à possibilidade de determinadas restrições serem transgredidas. No caso do planejamento, por exemplo, o controle do risco possibilita a seleção de soluções mais robustas, nas quais mesmo nos cenários futuros mais pessimistas, os planos de obras não necessitariam alterações. Vários índices de risco podem ser propostos, associados às grandezas *fuzzy*. Um índice geral do plano poderia estar relacionado simplesmente ao índice otimista, σ , mencionado anteriormente. Uma vez que esse índice é determinado para todas as restrições, seria bastante simples a contabilização de um valor global do sistema dado, por exemplo, pela somatória destes para cada uma das restrições do problema. Obviamente, pequenos valores deste índice global estariam associados a um alto

risco e vice-versa. Uma forma de contemplar a determinação de soluções robustas seria associando este índice de risco a um novo objetivo, que poderia ser tratado pelas diferentes maneiras para o tratamento de problemas de múltiplos objetivos já comentadas neste capítulo.

4.5 Considerações Finais

Neste capítulo foi proposta uma modelagem alternativa do problema de configuração de redes, utilizando AGs.

Uma análise das principais referências encontradas na literatura científica sobre esse assunto mostrou que os métodos desenvolvidos até o presente momento, apesar de apresentarem resultados satisfatórios, podem ser aprimorados, principalmente no processo de codificação e decodificação dos *strings*, utilizados para estabelecimento da relação entre indivíduos nos AGs e correspondentes alternativas de configuração de redes.

O método apresentado em [48] serviu de base para o estabelecimento da modelagem proposta neste trabalho. No entanto, as suas principais desvantagens, quais sejam o tratamento de nós e ligações (ao invés de blocos de carga e chaves) e a geração de configurações em malha ou com ilhas, foram eliminadas através da modelagem apresentada neste capítulo. Nesta, a partir do conceito de famílias de blocos de carga, que são formadas dinamicamente durante o processo de decodificação dos *strings* associados a cada indivíduo, garante-se a geração de soluções viáveis sob o aspecto topológico, o que revela grande eficiência ao AG para estudos de configuração de redes.

AGs não incorporam explicitamente as restrições do problema, mas sim indiretamente através de penalizações impostas à função objetivo ou à função de avaliação. Penalização de soluções não viáveis sob o aspecto topológico são desnecessárias, em função do processo de decodificação apresentado no item 4.3.2. Foram propostas duas maneiras de considerar as principais restrições do problema, relativas ao carregamento dos componentes da rede e aos níveis de tensão. A primeira maneira trabalha com notas associadas aos perfis de tensão e carregamento. Tais notas estão diretamente relacionadas a fatores multiplicativos que penalizam a função de avaliação, de modo a forçar com que a configuração associada ao “melhor” indivíduo não apresente transgressões de critérios técnicos. A segunda maneira, também inédita, trata da determinação de penalizações através de cortes de carga para eliminar as possíveis violações de carregamento e tensão. O

interessante deste método é que os dois tipos de violações são dispostos sob uma mesma base, impondo-se desta forma uma penalização única à função de avaliação.

O último item deste capítulo mostra como incertezas e aspectos subjetivos podem ser incorporados em AGs para configuração de redes. Ao considerar métodos de agregação *fuzzy* para aplicação ao modelo, obtém-se uma estrutura que permite o tratamento de múltiplos objetivos e restrições suaves (*soft constraints*). O modelo proposto mostra-se também adequado ao tratamento de incertezas, modeladas através de números *fuzzy*, principalmente nas demandas de centros de carga do sistema. A utilização de técnicas de análise de redes que consideram operações aritméticas *fuzzy* permite a determinação de grandezas *fuzzy*, relativas aos parâmetros elétricos da rede, às funções objetivo e às restrições do problema. Desta forma, pode-se tratar dos indivíduos da população através de um índice de mérito *fuzzy* que considera todos as incertezas e aspectos subjetivos de tomada de decisão; extensões do presente trabalho, considerando a relação da função de avaliação do AG com este índice de mérito *fuzzy*, mostram-se bastante promissoras. Além disso, a determinação de grandezas *fuzzy* associadas aos parâmetros elétricos de cada configuração permite a relaxação de critérios e o gerenciamento do risco de violação de restrições

O próximo capítulo mostra como a modelagem aqui descrita pode ser eficientemente aplicada a problemas reais, seja para reconfiguração de redes em condições normais ou de emergência, seja para o planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica.

Capítulo 5

Aplicações da Modelagem de Configuração de Redes por AGs

5.1 Considerações Gerais

Neste capítulo são realizadas as aplicações da modelagem proposta no capítulo anterior, que trata do problema de configuração de redes por AGs.

São duas as aplicações a serem exploradas, de modo a ser possível avaliar a potencialidade da modelagem proposta, quais sejam os problemas de reconfiguração de redes e o de planejamento de sistemas de distribuição.

O problema de reconfiguração de redes visa determinar o estado das chaves para otimizar certo objetivo previamente estabelecido. A aplicação descrita aqui vislumbra principalmente a minimização de perdas através da alteração de chaves na rede, avaliando-se também como outros objetivos poderiam ser incorporados. Esta aplicação decorre diretamente da modelagem exposta no capítulo 4, sem necessidade de praticamente nenhuma consideração adicional. Assim, passa-se diretamente ao estudo de caso em uma rede de distribuição, que pode ser caracterizada como de tamanho médio. A idéia de utilização de rede deste porte é pelo fato que permite comparação com um resultado já avaliado por outro método [11].

Em seguida, analisa-se a extensão da modelagem proposta para o problema de planejamento de sistemas de distribuição, considerado através de abordagem pseudo-dinâmica. São considerados diversos reforços candidatos na rede: reconduzimento ou instalação de novos trechos de rede, instalação de chaves de manobra, novos alimentadores em subestações existentes, novas

subestações, e ampliação de subestações existentes pela instalação de novas unidades transformadoras. Determina-se então, para cada ano do período do planejamento, a alternativa de rede que “melhor” satisfaz um ou mais objetivos simultaneamente, com os respectivos reforços instalados e a configuração de rede correspondente, determinada em função do estado das chaves da rede. Em relação aos modelos baseados em programação matemática, tem-se principalmente as seguintes vantagens: otimização de funções objetivo mais complexas, sem necessidade de aproximações e linearizações ou de se ter uma fórmula explícita das variáveis do problema; consideração de todas as restrições do problema apontadas no capítulo 2, principalmente as relativas à tensão e radialidade da rede. Alguns casos teste envolvendo o problema de planejamento ilustram o método proposto.

5.2 Reconfiguração de Redes

5.2.1 Considerações Iniciais

No capítulo 4 foi mostrado como o problema de reconfiguração de redes pode ser modelado através de AGs, de maneira que a solução desejada seja encontrada eficientemente durante o processo. Conforme detalhado no capítulo 2, o problema de reconfiguração de redes aplica-se a duas categorias:

- situações de manutenção corretiva ou preventiva, por exemplo quando uma falha ocorre no sistema ou quando determinado bloco de carga é desenergizado para serviços quaisquer. Nestes casos, aqueles blocos a jusante do bloco em falta ou sob reparos podem ser atendidos por alimentadores vizinhos, através de chaves de interligação. O objetivo principal, em geral, é o atendimento o mais rápido possível àqueles consumidores desenergizados, o que pode ser contemplado pela operação de um número mínimo de chaves.
- condições normais de operação, quando deseja-se determinar o estado das chaves da rede para otimizar determinado objetivo, por exemplo minimizar as perdas na rede ou minimizar o valor mais provável da energia não distribuída.

Em ambos os casos, apesar dos objetivos serem bastante distintos, o problema restringe-se a determinar o estado das chaves do sistema. Além disso, nos dois casos, as restrições básicas do problema são praticamente as mesmas: balanço de demanda, limites de carregamento, limites de tensão e radialidade da rede¹.

Deve-se destacar que o estado das chaves do sistema, tal que a rede opere de forma radial, impõe o valor das variáveis de fluxo no sistema. Desta forma, não há a necessidade da inclusão de variáveis contínuas no problema; elas são decorrência de uma dada configuração de rede. Assim, o primeiro exemplo ilustrativo do capítulo 3, item 3.3.2, e necessidade da codificação dos *strings* para representar números reais não se aplica às categorias de problemas analisadas neste trabalho. E esta mesma propriedade, relativa à configuração da rede radial levar à determinação direta de todos os parâmetros elétricos e funções objetivo, permite a eficiência do processo de decodificação exposto no capítulo 4.

Em ambas as categorias de problemas, múltiplos objetivos e incertezas podem ser incorporados ao problema. A consideração de objetivos secundários, tais como a otimização dos perfis de tensão e carregamento, tanto em situações de emergência como em condições normais, pode ser incorporada de modo bastante simples na modelagem por AGs. Conjuntos *fuzzy* permitem não só a agregação de múltiplos objetivos e restrições do problema, como também a incorporação de incertezas, principalmente relativas à demanda dos centros de carga e coeficientes das funções objetivo, que podem ser representados por números *fuzzy*. Além disso, a relaxação de critérios, obtida por comparação dos números *fuzzy*, quando da verificação de restrições, permite um potencial ainda maior para o modelo apontado, levando a um gerenciamento dos riscos associados ao não atendimento de critérios técnicos.

No item subsequente analisa-se um caso determinístico, isto é, sem incertezas nas demandas dos centros de carga, relativo à determinação do estado das chaves do sistema para a minimização de perdas. Espera-se que esta aplicação sirva como base para as duas categorias de reconfiguração de redes apontadas neste item.

¹ Em algumas empresas, permite-se o fechamento de malhas quando da manobra de alteração do estado das chaves na rede; porém, em geral, depois desta manobra realizada, o sistema volta a operar em condição radial.

5.2.2 Reconfiguração para Minimização de Perdas

A rede da figura 5.1 é tomada para ilustração da metodologia de reconfiguração de redes por AGs. Esta rede é composta por 86 barras, 96 ligações (sendo 68 trechos de rede sem chaves, 15 chaves NF e 13 chaves NA) e 3 subestações de distribuição.

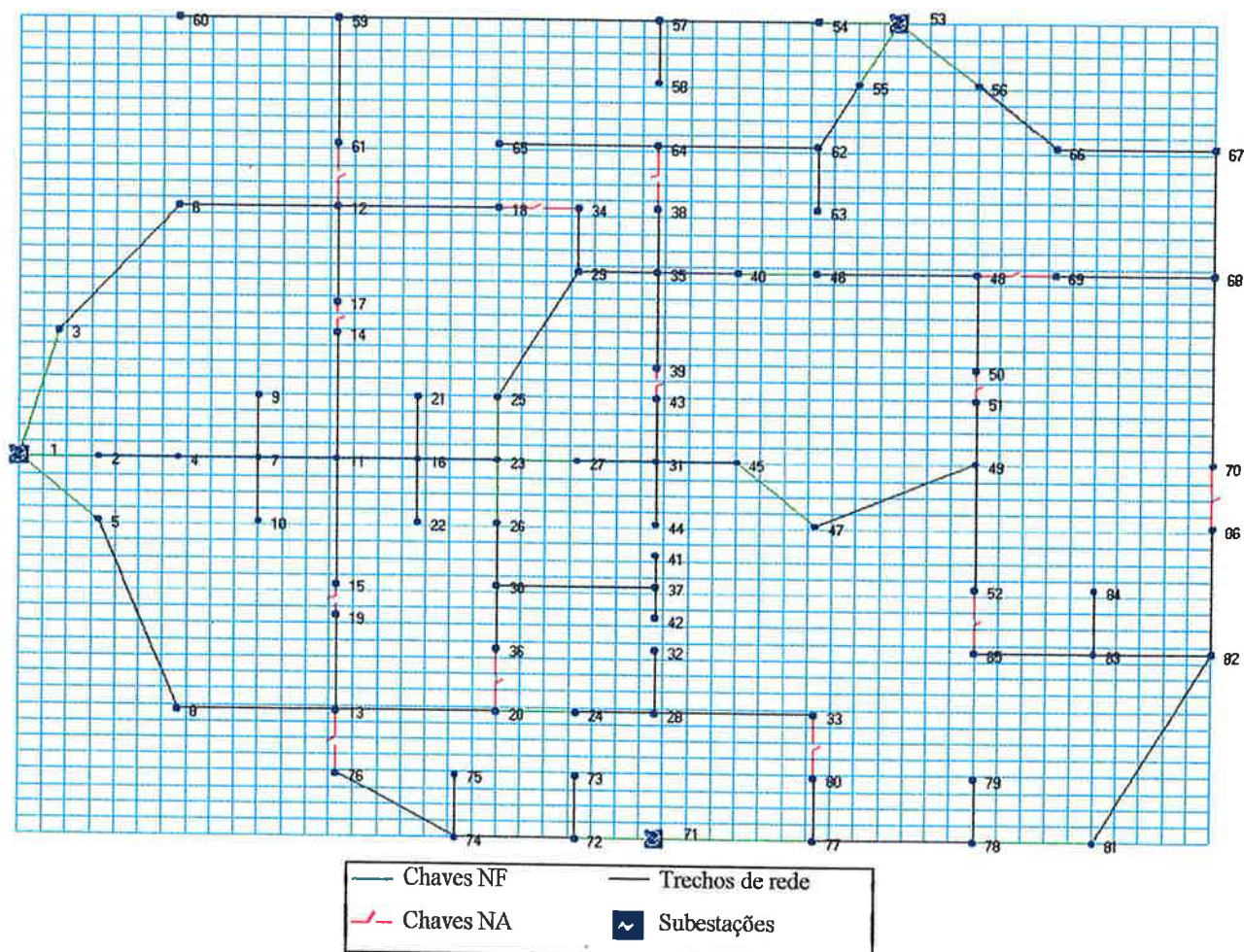


Fig. 5.1 – Caso teste para minimização de perdas

Os dados de cabos utilizados, dados de barras e dados de ligações para o caso teste são apresentados no Anexo A, nas tabelas A1, A2 e A3, respectivamente.

O sistema da figura 5.1 representa uma rede de porte médio, principalmente pelo número de chaves de manobra (NA e NF) presentes no sistema, que levam a um número da ordem de 268 milhões de possíveis configurações.

É interessante notar a situação da rede da figura 5.1 antes de serem minimizadas as perdas totais no sistema, o que é resumido na tabela 5.1.

A partir da análise do diagnóstico inicial, pode-se verificar que não existem problemas de carregamento na configuração inicial do sistema; porém, o perfil de tensão não encontra-se em estado tão adequado, com um alto número de barras com queda de tensão acima dos 7%, com queda de tensão máxima atingindo o valor de 9,4%. Quanto ao nível de perdas, é relativamente difícil dizer sobre o seu estado mas, na rede original, corresponde a 3,4% da demanda total. Este baixo valor pode, em parte, ser explicado pela rede em questão apresentar tão somente condutores de tronco, isto é, com seção nominal alta.

A aplicação de AGs parte do estabelecimento de uma série de parâmetros que são necessários para a simulação. Basicamente, estes podem ser divididos em duas classes, sendo a primeira relativa aos parâmetros do AG propriamente dito (tamanho da população, taxas de cruzamento e mutação) e os demais relativos à modelagem adotada. Obviamente, uma análise de sensibilidade de valores e combinações de todos esses parâmetros foi realizada, mas aqui serão apresentados apenas os resultados finais, depois dos devidos ajustes nos parâmetros.

A tabela 5.2 apresenta os parâmetros básicos utilizados para o AG. A tabela 5.3 apresenta os parâmetros para as notas de tensão e carregamento de trechos e SEs. Desta tabela, nota-se uma preocupação com a otimização do perfil de tensão, em função dos valores das faixas e notas associadas. Quanto ao carregamento, existe preocupação apenas para o atendimento das restrições.

Tabela 5.2 – Parâmetros do Algoritmo Genético

Parâmetro	Valor
Probabilidade de Cruzamento	80%
Probabilidade de Mutação	0,5%
Nº de Indivíduos por população	150
Nº de Gerações	100

Tabela 5.3 – Notas para perfil de tensão e carregamento

Parâmetro	Faixa 1	Nota N_1	Faixa 2	Nota N_2	Faixa 3	Nota N_3
Níveis de tensão	0,97-1,02	10,0	0,93-0,97	5,0	$V < 0,93$	0,0
Carregamento trechos	0,00-1,00	10,0	1,00-1,50	0,0	$Car_{tre} > 1,5$	0,0
Carregamento SEs	0,00-1,00	10,0	1,00-1,50	0,0	$Car_{SE} > 1,5$	0,0

As funções de pertinência associadas às restrições de níveis de tensão, carregamento de trechos e de SEs são lineares e dadas, respectivamente, pelas equações (5.1), (5.2) e (5.3) a seguir.

$$\mu_{dv} = \begin{cases} = 1 & p/ N_{dv} \geq 10 \\ = f_o \left(\frac{N_{dv} - N_{dvo}}{10 - N_{dvo}} \right) & p/ N_{dvo} \leq N_{dv} \leq 10 \\ = 0 & p/ N_{dv} \leq N_{dvo} \end{cases} \quad (5.1)$$

$$\mu_{car,tre} = \begin{cases} = 1 & p/ N_{car,tre} \geq 10 \\ = f_{co} \left(\frac{N_{car,tre} - N_{co}}{10 - N_{co}} \right) & p/ N_{co} \leq N_{car,tre} \leq 10 \\ = 0 & p/ N_{car,tre} \leq N_{co} \end{cases} \quad (5.2)$$

$$\mu_{car,SE} = \begin{cases} = 1 & p/ N_{car,SE} \geq 10 \\ = f_{cso} \left(\frac{N_{car,SE} - N_{cso}}{10 - N_{cso}} \right) & p/ N_{cso} \leq N_{car,SE} \leq 10 \\ = 0 & p/ N_{car,SE} \leq N_{cso} \end{cases} \quad (5.3)$$

A função de pertinência relacionada ao objetivo de minimização de perdas na rede é dada pela equação 5.4.

$$\mu_{obj,i} = \frac{0,05 * D_{total}}{perdas_i} \quad (5.4)$$

onde D_{total} representa a demanda total do sistema e $perdas_i$ corresponde às perdas totais para uma dada configuração do sistema (associada a um dado indivíduo i). Destaca-se que o valor de perdas, considerado como meta, foi adotado arbitrariamente em 5%, apesar das perdas na configuração original corresponderem a valor inferior. Isto não impede que o modelo determine a solução de mínimas perdas, que terá, necessariamente, função de pertinência associada maior que 1.

Os parâmetros das funções de pertinência dadas pelas equações (5.1), (5.2) e (5.3) são apresentados na tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Parâmetros das funções de pertinência

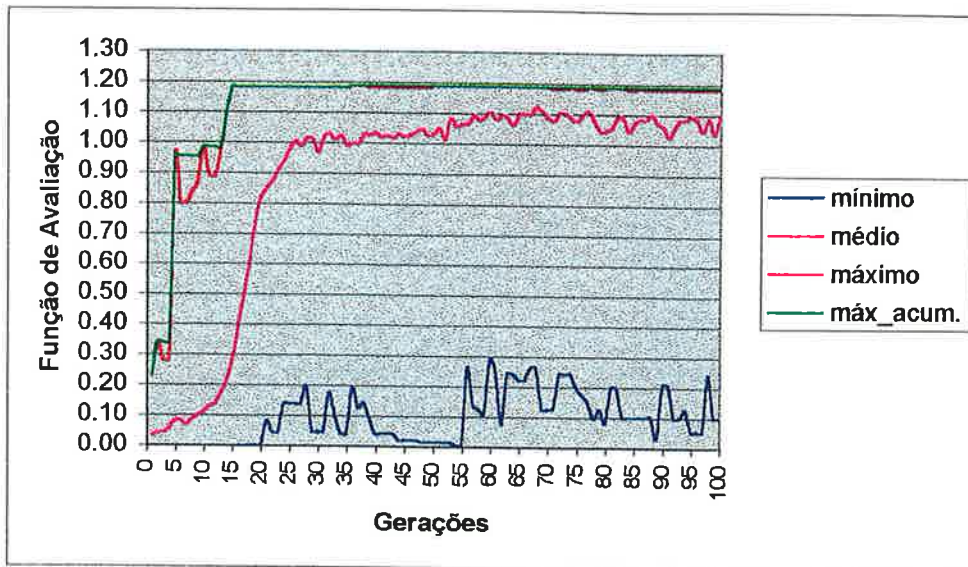
Parâmetro	Nota mínima	Valor Inicial
Nível de Tensão	$N_{dvo}=0$	$f_{dvo}=0,9$
Carregamento de Trechos	$N_{co}=0$	$f_{co}=0,9$
Carregamento de SEs	$N_{cso}=0$	$f_{cso}=0,9$

Duas estratégias de decodificação, mencionadas no capítulo 4, podem ser utilizadas. Estas são destacadas a seguir:

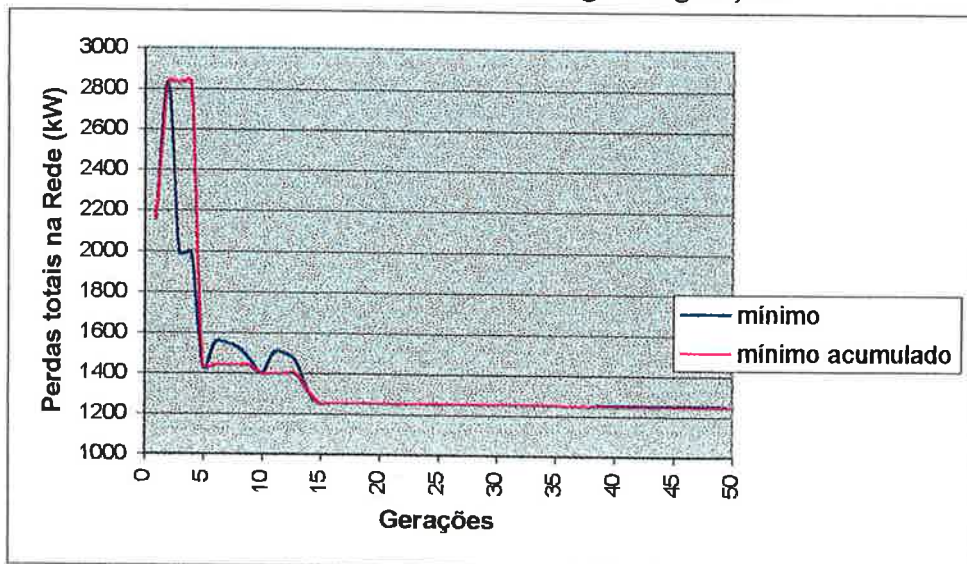
- estratégia 1: quando, no processo de decodificação, um bloco BL_i aponta (através dos *bits* correspondentes) para uma chave incidente que não pode ser fechada (não atende condições A, B, C ou D, cfr. item 4.3.2), passa-se a procura de uma outra chave incidente em BL_i que atenda as condições e possa ser fechada.
- estratégia 2: todos os blocos BL_i , apontando para chaves incidentes que não podem ser fechadas, são armazenados numa lista de blocos pendentes. Ao final da análise de todos os blocos, passa-se à determinação das chaves incidentes alternativas nos blocos pendentes.

O algoritmo genético é executado inicialmente utilizando a estratégia 1 e o operador “produto” para agregação dos objetivos e restrições *fuzzy*. As figuras 5.3a e 5.3b apresentam os resultados da função de avaliação e das perdas mínimas ao longo das gerações.

As figuras 5.3a e 5.3b mostram que o procedimento apresenta convergência muito rápida. A solução ótima é obtida na geração 36, com valor das perdas igual a 1251 kW. Este valor é garantido ser o ótimo, pois tal solução foi obtida pelo método de busca heurística apresentado em [11], que permite garantir otimalidade da solução. Na geração 15, no entanto, tem-se uma solução já muito próxima da ótima, que apresenta valor de perdas apenas 0,6% superior. É interessante notar, da figura 5.3b, que as perdas mínimas nas primeiras gerações são menores que as perdas mínimas acumuladas; isto ocorre pois as configurações correspondentes apresentam um valor alto de função de penalização (ou valores baixos das funções de pertinência associadas às restrições), o que leva uma função de avaliação menor que a função de avaliação máxima acumulada, conforme pode ser notado na figura 5.3a.



a. Função de avaliação ao longo das gerações

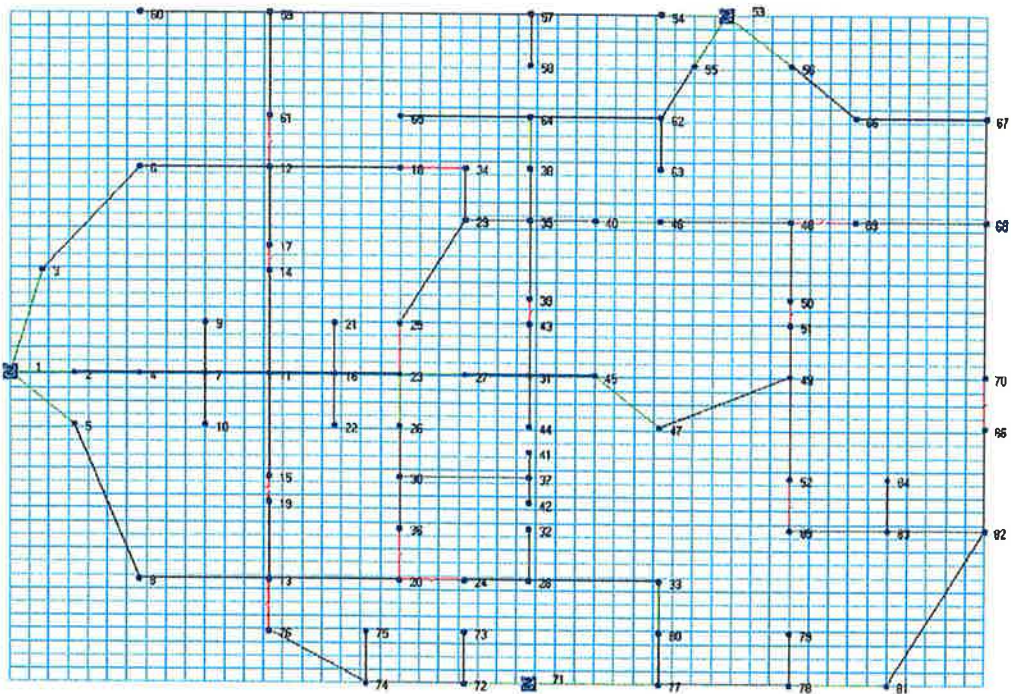


b. Perdas mínimas nas primeiras 50 gerações

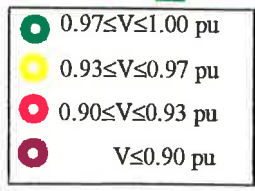
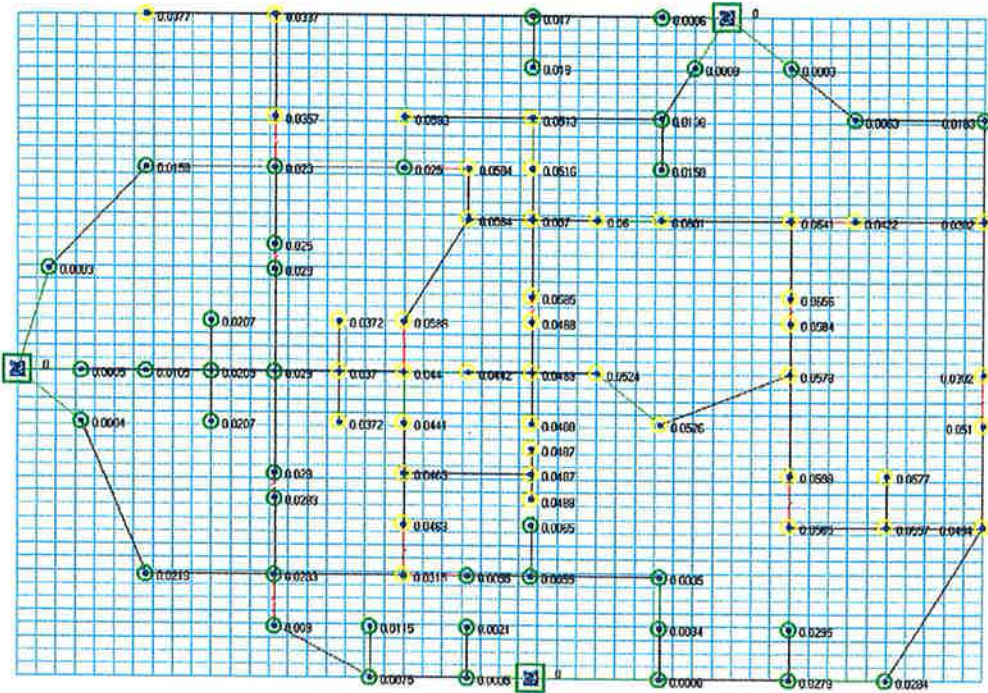
Figura 5.3 – Acompanhamento do AG para minimização de perdas

O tempo de processamento para as 100 gerações é de 30 segundos, em um computador PentiumII-450MHz, o que demonstra a eficiência do processo: ao todo, são $150 \cdot 100 = 15.000$ avaliações de indivíduos, que consistem em decodificação de *strings* (cada *string* apresenta 28 *bits*, relativos a 15 blocos de carga) e processamentos de fluxo de potência realizados para uma rede com cerca de 100 barras.

As figuras 5.4a e 5.4b apresentam a configuração da rede e correspondente perfil de tensão para a solução ótima obtida. Para complementação dos resultados para a configuração ótima, na tabela 5.5 apresenta-se os demais resultados gerais.



a. Configuração



b. Perfil de tensão

Fig. 5.4 – Resultados para a solução ótima

Tabela 5.5 – Resultados gerais para a configuração ótima

Parâmetro	Valor
Queda de Tensão Máxima	6,6 %
Carregamento Máximo Rede	67%
Carregamento Máximo SEs	89%
Perdas Totais na Rede	1251 kW
Função de pertinência - objetivo	1,687
Nota de tensão	7,86
Função de pertinência - tensão	0,707
Nota de carregamento rede	10,0
Função de pertinência - car. rede	1,00
Nota de carregamento de SEs	10,0
Função de pertinência - car. SEs	1,00
Função de pertinência – decisão (operador produto)	1,192

Observa-se, portanto, que a solução ótima resulta em redução de 16,1% nas perdas globais. A função de pertinência do objetivo, relativa a esta solução, apresenta valor superior a unidade, o que mostra que a meta de valor de perdas no sistema igual a 5% da demanda total (42,2MW) é por demais pessimista e que o valor das perdas mínimas obtido melhora em 68,7% esta meta inicial.

Além do valor de queda de tensão máxima na rede ser reduzido em 42,4%, também o perfil de tensão é sensivelmente melhorado, o que é ilustrado pela figura 5.3b e pela nota de tensão 7,86 (que é superior à nota para a rede original, igual a 6,79). Os carregamentos máximos dos trechos de rede e de SEs sofreram pequeno aumento; mas, segundo a formulação do problema, as restrições continuam plenamente satisfeitas.

Alguns outros processamentos foram realizados, tendo por objetivo avaliar, para este problema, a influência da utilização da estratégia 2 (com o operador “produto”) e da utilização de outros operadores de agregação *fuzzy* (com a estratégia 1).

A tabela 5.6 apresenta os resultados alcançados, onde nota-se que praticamente todas as variantes do caso base resultaram na determinação da solução ótima, porém em número de gerações distintos. Especial destaque deve ser dado para a variante com utilização do operador “mínimo”, que determina a solução ótima em apenas 13 gerações.

É importante destacar que os resultados alcançados não são conclusivos e não podem ser estendidos para qualquer problema de configuração de redes ou mesmo de minimização das perdas. Diferentes problemas podem necessitar diferentes combinações de operador de agregação e estratégia, além dos ajustes necessários a serem realizados sobre os parâmetros do AG.

Sem dúvida alguma, é importante que o engenheiro disponha de todos esses controles a sua disposição, para maior garantia que os resultados alcançados, após uma série de simulações, representem, se não a solução ótima, uma boa solução sub-ótima.

Tabela 5.6 – Resultados alcançados: estratégia 2 e operadores de agregação *fuzzy*

Caso Simulado		Solução obtida	Geração p/ Solução Ótima
Estratégia 1 (*)		Ótima	36
Estratégia 2 (*)		Ótima	86
Operador mínimo		Ótima	13
Operador e-compensatório	$\lambda=0,8$	Ótima	53
	$\lambda=0,6$	Ótima	31
	$\lambda=0,4$	Sub-ótima (**)	156
	$\lambda=0,2$	Ótima	124
Operador e- <i>fuzzy</i>	$\lambda=0,8$	Ótima	24
	$\lambda=0,6$	Ótima	25
	$\lambda=0,4$	Ótima	15
	$\lambda=0,2$	Ótima	61

(*) - simulação com o operador “produto” para agregação

(**) - solução com perdas 0,13% superiores às perdas mínimas

5.3 Modelagem Aplicada ao Planejamento de Sistemas de Distribuição

5.3.1 Considerações Iniciais

O problema de planejamento de sistemas de distribuição foi descrito no capítulo 2, quando foram considerados alguns métodos de solução, como os baseados em programação matemática e os baseados em busca heurística.

Nos capítulos 3 e 4 foram descritas as bases e a modelagem para a aplicação de AGs em problemas de configuração de redes. Neste item, em particular, demonstra-se que esta modelagem permite a consideração do problema de planejamento de maneira bastante simples. Por exemplo, o procedimento de codificação/decodificação de *strings*, extremamente importante para impor que as configurações geradas sejam radiais e conexas, ou seja viáveis sob o aspecto topológico, pode ser utilizado sem necessidade de qualquer alteração.

A diferença básica da aplicação para o planejamento, quando comparada com o problema de reconfiguração de redes, reside no cômputo da função de avaliação que, neste caso, deve considerar os custos fixos de instalação de reforços na rede de distribuição. Neste capítulo, mostra-se que a inclusão destes custos é muito simples e relaciona-se diretamente com os resultados de fluxos de potência naqueles elementos candidatos a serem instalados no sistema.

Conforme mencionado anteriormente, considera-se abordagem pseudo-dinâmica do problema de planejamento. O tratamento dinâmico do problema consiste em extensão natural da modelagem proposta nesta tese, que será mais um tópico a ser abordado em trabalhos, conforme destacado no capítulo 6.

Todo o desenvolvimento efetuado no capítulo 4, relativo a conjuntos difusos em AGs para configuração de redes, pode também ser aplicado diretamente no problema de planejamento. Algumas destas idéias são explicitamente consideradas na discussão da modelagem.

Na extensão para o problema de planejamento, são considerados como reforços na rede, aqueles correspondentes a: instalação de trechos de rede, chaves de manobra, alimentadores em SEs existentes, SEs novas com seus alimentadores (instalação de bays de saída e trecho(s) de conexão com o sistema existente), ampliação de SEs existentes (substituição ou instalação de novas unidades transformadoras) e reconduzimento de trechos de rede.

As restrições consideradas referem-se a todas aquelas citadas no capítulo 2: 1^a e 2^a Leis de Kirchhoff, limites de tensão e carregamento e radialidade da rede.

Para ilustração da modelagem, um único objetivo é considerado, relativo aos custos fixos (investimentos em novos reforços) e custos variáveis (perdas elétricas). A extensão do problema para o tratamento de múltiplos objetivos é imediata, principalmente quando incorpora-se na modelagem os conjuntos *fuzzy*, cfr. item 4.4 do capítulo anterior, que permitem o tratamento dos

aspectos subjetivos relacionados à tomada de decisão. Obviamente a consideração de incertezas, tão importantes no planejamento de sistemas de distribuição, segue o mesmo raciocínio: conjuntos *fuzzy* permitem o tratamento de incertezas nos dados de demanda (futura) e nos coeficientes das funções objetivo.

Ao final deste item, procura-se ilustrar a extensão da modelagem para o planejamento a partir de alguns casos teste, que diferem basicamente no porte da rede em estudo. Como será visto, o último caso teste aplicado a uma rede de dimensões reais considera, além das chaves de manobra, todos os tipos de reforços na rede.

5.3.2 Consideração de novos trechos de rede e chaves de manobra

Neste sub-item, analisa-se dois tipos distintos de proposição de reforços a serem instalados na rede, quais sejam os trechos de rede e as chaves de manobra. A idéia da análise de ambos os casos conjuntamente justifica-se pelo fato destes reforços serem modelados de maneira similar.

Chaves de manobra existentes na rede já foram consideradas na modelagem proposta no capítulo 4. A diferença básica da modelagem de uma chave de manobra candidata é que, como reforço a ser instalado na rede, esta deve incorporar no custo total de expansão da rede um custo fixo, igual aos custos de investimento e de instalação (mão de obra) deste equipamento.

Um trecho de rede candidato pode, para efeito de modelagem, também ser representado por uma chave, cujo custo fixo é o próprio custo de investimento e de instalação daquele novo trecho.

As figuras 5.5a e 5.5b ilustram, respectivamente, a consideração de chaves e trechos de rede candidatos no modelo de planejamento, a serem instalados entre dois blocos quaisquer BL_i e BL_j . Obviamente, a proposição de um reforço entre duas barras de um mesmo bloco não é permitida no modelo, pois a sua possível instalação implicaria em configuração com fechamento de malha.

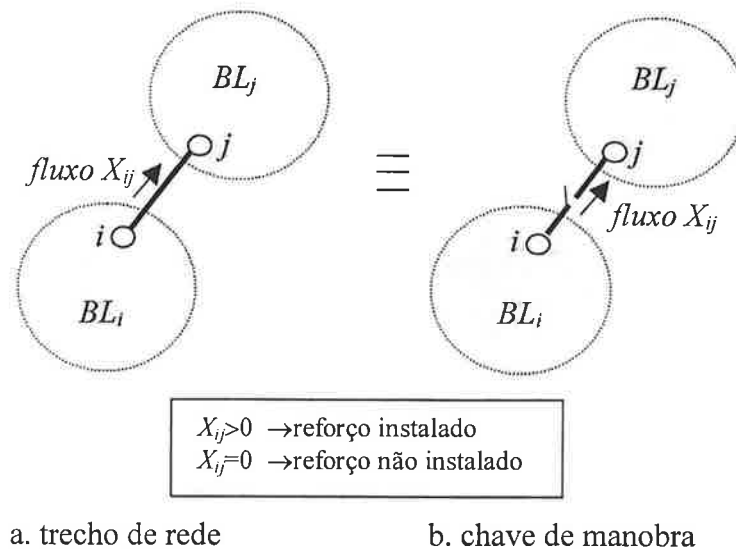


Fig. 5.5 – Representação de trechos de rede e chaves de manobra candidatos

O ponto mais relevante na modelagem destes reforços consiste em reconhecer quando os correspondentes custos fixos devem ser incorporados à função objetivo do problema. Para tanto, basta avaliar se, após a simulação de fluxo de carga na configuração em evidência, existe fluxo de potência não nulo em algum destes reforços. Em caso positivo, o custo fixo é incorporado diretamente na função objetivo; caso contrário, o reforço não é incorporado ao sistema (custo fixo e variável são nulos). Na realidade, quando ocorre fluxo não nulo no novo trecho ou chave de manobra, a correspondente chave, representada no processo de decodificação, já teria sido levada ao estado fechado e, portanto, deve ser incorporada à lista de reforços comissionados.

5.3.3 Consideração de novos alimentadores em subestações existentes

Uma obra bastante comum em sistemas de distribuição consiste na ampliação do número de alimentadores em subestações existentes. Obviamente, este reforço pode ser instalado no sistema, desde que exista possibilidade de instalação de um *bay* adicional de saída¹ e exista acesso físico (aéreo ou subterrâneo) para saída do alimentador do terreno da subestação.

A instalação de um novo alimentador tem por objetivo aliviar o carregamento dos demais alimentadores da subestação e, dependendo da configuração da rede, permite também reduzir o carregamento de alimentadores de outras subestações e, por conseqüência, reduzir o carregamento destas outras subestações.

¹ Em alguns casos, os *bays* de saída para ampliação do número de alimentadores em uma subestação já estão disponíveis.

Em geral, no modelo de planejamento, o reforço de um novo alimentador pode ser simplesmente representado como sendo um trecho de ligação entre a subestação e uma barra de conexão à rede existente. Não há necessidade de especificar o traçado do novo alimentador já em ambiente de planejamento.

Desta forma, a modelagem deste tipo de reforço é bastante similar ao caso de um trecho de rede, descrito no item 5.3.2. A diferença básica, não importante sob o aspecto de modelagem, consiste no fornecimento de custos fixos adicionais, incluindo, quando necessário, o custo do *bay* de saída e demais custos relativos à saída do alimentador da subestação. Assim como em novos trechos de rede, o custo fixo relativo a este reforço só será incluído ao custo total quando o fluxo neste elemento for não nulo (ou quando a chave correspondente for fechada no processo de decodificação). A figura 5.6 ilustra a instalação de um novo alimentador.

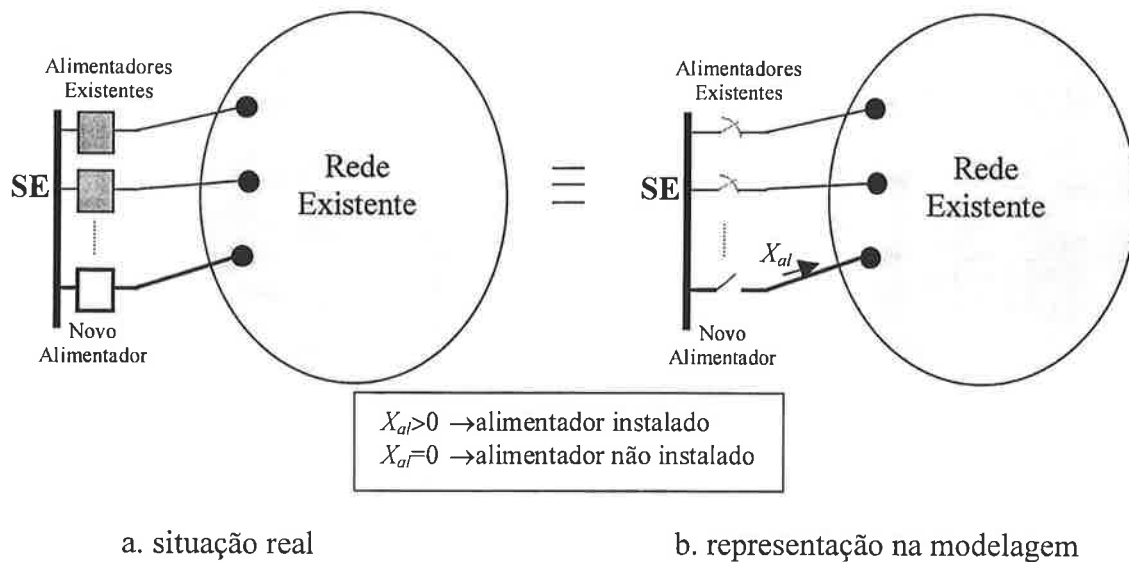


Fig. 5.6 – Modelagem de alimentadores

Na figura 5.6, também são representados os alimentadores existentes que, no modelo de planejamento por AG, podem ser representados em suas saídas (da SE à primeira barra de conexão na rede) através de chaves NF. Estas chaves de manobra são então representadas com custo fixo nulo, exatamente como no problema de reconfiguração de redes, mas permitem uma flexibilidade maior na determinação de configurações do problema. Ou seja, no limite, um alimentador existente pode ser completamente desativado de operação, o que pode ocorrer quando o diagnóstico do sistema mostra que a subestação correspondente apresenta carregamento maior que sua capacidade firme.

5.3.4 Consideração de Novas Subestações

A incorporação de subestações candidatas no modelo de planejamento por AGs não requer grandes alterações na modelagem exposta no capítulo anterior. Quando da proposição de uma nova subestação, o planejador deve também propor os novos alimentadores que se derivam da barra de média tensão. O tratamento destes novos alimentadores é análogo ao exposto no item 5.3.3, relativo aos alimentadores novos em subestações existentes.

Com a representação dos novos alimentadores, a representação da nova subestação em nada afeta a codificação/decodificação dos *strings* representantes de cada indivíduo no AG para configuração de redes. Da mesma forma que os reforços de trechos de rede ou novos alimentadores, o custo fixo da subestação será incorporado ao custo total somente quando o correspondente fluxo resultante (determinado pelo procedimento de fluxo de carga) for não nulo. Uma outra forma de decidir pela incorporação da SE nova seria através da análise de seus alimentadores; a instalação de qualquer um dos alimentadores novos que se derivam da SE obviamente implica na sua instalação. Desta maneira, na modelagem, a subestação nova é tratada como existente, sendo a diferença básica na inclusão (ou não) do seu custo fixo. A figura 5.7 ilustra a modelagem de novos alimentadores.

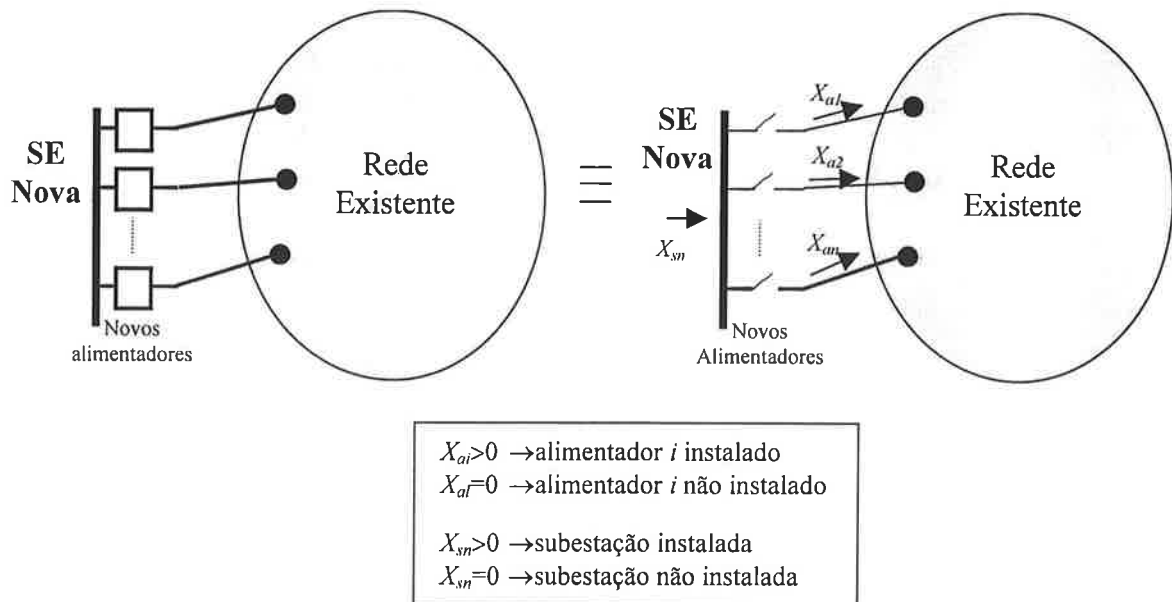


Fig. 5.7 – Modelagem de SEs novas

5.3.5 Ampliação de Subestações Existentes

Uma outra forma de suprir um possível déficit global de demanda na região de estudo de planejamento é através do aumento de capacidade em subestações existentes. Esta operação pode ser realizada de duas formas distintas: (i) através de instalação de unidade transformadora adicional na SE e (ii) através de substituição de uma unidade transformadora por outra de capacidade superior. A primeira forma depende, obviamente, da subestação ter espaço físico para instalação da nova unidade. A substituição depende de haver um transformador de capacidade maior que o existente, em geral nos padrões utilizados na empresa. Para os dois casos, deve-se verificar se os equipamentos da subestação comportam este aumento de capacidade; por exemplo, a potência de curto circuito sofre aumento quando a capacidade é ampliada e, obviamente, os disjuntores da SE devem estar dimensionados para o novo valor.

Ambos os procedimentos para ampliação da capacidade de subestações existentes podem ser tratados da mesma forma na modelagem de AGs para o planejamento. Assim como nos demais reforços, não há necessidade de alterações na codificação/decodificação de *strings*. Nem, tampouco, há a necessidade de chaves de manobra adicionais. Basta tão somente monitorar o carregamento na subestação após o procedimento de fluxo de potência. Quando o carregamento da SE existente exceder o valor máximo de fluxo e houver possibilidade de aumento de capacidade suficiente, o reforço em unidade transformadora é incorporado ao sistema, bem como o correspondente custo fixo adicional. A figura 5.8 ilustra a modelagem de aumento de capacidade com unidade transformadora adicional.

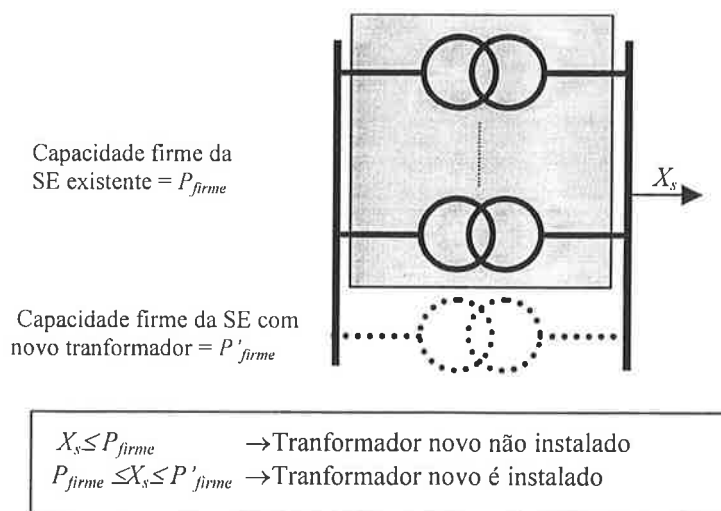


Fig. 5.8 – Modelagem de ampliação de SEs existentes

5.3.6 Recondutoramento de Trechos de Rede

O reforço relativo a recondutoramento de condutores pode ser facilmente incorporado na modelagem de AG para o planejamento de sistemas de distribuição. Na formulação do problema de planejamento por PLIM uma variável de decisão (binária) deve ser incluída para cada trecho de rede [3], o que onera por demais a consideração deste reforço.

Para a modelagem do recondutoramento de trechos de rede no AG é interessante a sua analogia com a substituição de transformadores em subestações existentes, descrita no sub-item anterior. Da mesma forma que a troca por um transformador de maior capacidade deve ser realizada em função do carregamento da subestação, o mesmo deve ocorrer com o recondutoramento de um trecho de rede por um condutor de seção nominal maior.

Desta forma, a inclusão desta obra candidata na rede é bastante simples e também não demanda modificações na codificação/decodificação dos *strings* associado aos indivíduos do AG. Pode-se também considerar toda a série padronizada de condutores da empresa em análise. A escolha do condutor de seção nominal superior na série padronizada, para substituição do existente, será então função do montante de violação de carregamento no trecho e dos intervalos de capacidade máxima entre os vários condutores. Obviamente, o custo fixo a ser incluído no custo total de expansão será função do condutor escolhido, dado que o custo de material é diferenciado por seção nominal.

A figura 5.9 ilustra a incorporação da alternativa de recondutoramento em um dado trecho de rede existente, para outros condutores de seção nominal maiores na série padronizada $(a, b, \dots, n-1, n)$.

5.3.7 Aspectos adicionais para o modelo de planejamento

A inclusão dos reforços candidatos no modelo de planejamento, conforme visto nos sub-itens anteriores, é muito simples. A modelagem vista no capítulo 4 pode ser diretamente utilizada, com alguns pequenos detalhes que não alteram o ponto mais importante correspondente aos processos de codificação e decodificação dos *strings* do AG. Assim, as configurações geradas durante o processo corresponderão necessariamente a soluções viáveis sob o aspecto topológico. As características de modelagem do problema de planejamento podem ser entendidas, em parte, como a determinação de uma rede equivalente para um estudo de reconfiguração de redes, onde os reforços são modelados através de chaves de manobra ou através de monitoramento dos fluxos de potência.

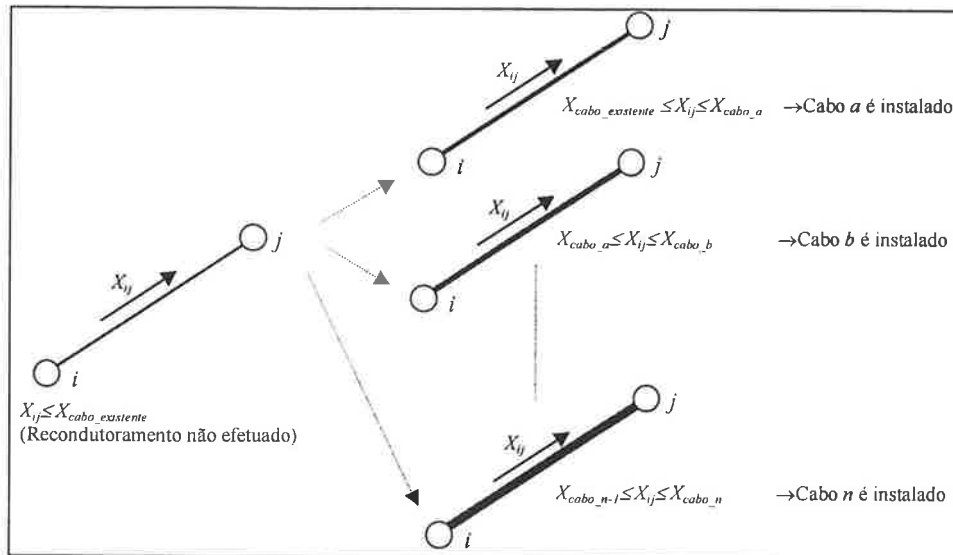


Fig. 5.9 – Recondução de trechos de rede

O exemplo da figura 5.10 ilustra o conceito de rede equivalente para a expansão de um sistema (contando com a subestação *SE1*, alimentador *Alim1*, e trecho *lig1*) onde são propostos os seguintes reforços: alimentadores novos *Alim2*, *Alim3* e *Alim4*, trecho de rede *lig2*, chave de manobra *Ch1* e subestação *SE2*.

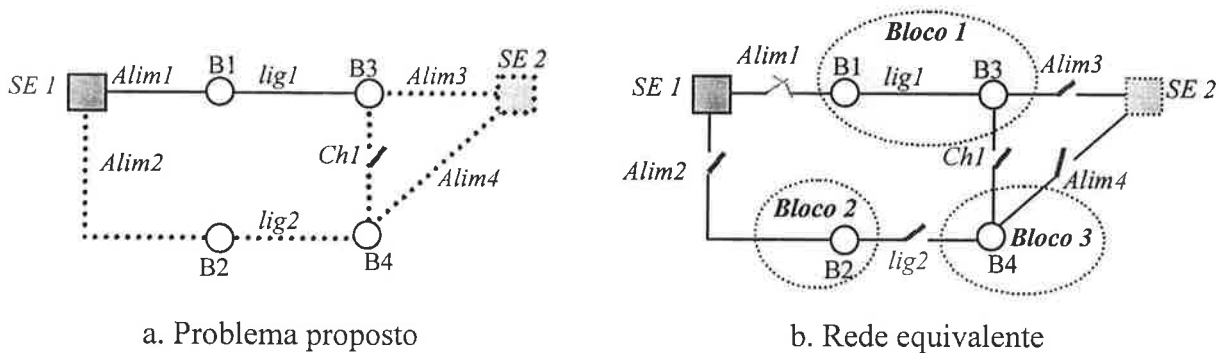


Fig. 5.10 – Modelagem para reforços do planejamento no AG para configuração de redes

Obviamente, a rede equivalente pode ser tratada com a modelagem geral de AGs para configuração de redes. Os reforços em trechos de rede, alimentadores e chaves de manobra são considerados na rede equivalente através de chaves. Os reforços em subestação (subestação nova e possível ampliação da subestação existente) bem como um possível recondução dos trechos *SE1-B1* (*Alim1*) e *B1-B3* (*lig1*) são tratados através de monitoramento de seus respectivos carregamentos.

A função objetivo, que considera os custos de investimentos e expansão do sistema, é então tratada de forma exata, no sentido que não são necessárias as linearizações nas perdas em componentes do

sistema, conforme mostrado na formulação PLIM (2.1) - capítulo 2. No item anterior, descreveu-se como os custos fixos, relativos aos novos reforços a serem instalados no sistema, podem ser avaliados de maneira bastante simples na modelagem do problema por AGs, basicamente através do monitoramento das variáveis de fluxo nos reforços do sistema.

A função de avaliação correspondente, que incorpora a função objetivo e as restrições do problema, tem o mesmo tratamento dado ao caso genérico de configuração de redes, conforme item 4.3.3. As restrições do problema, relativas aos níveis de carregamento nos componentes da rede e aos níveis de tensão, podem ser tratadas através de penalização da função objetivo, impondo-se um custo adicional a alternativa (método das penalidades – cfr. eq. 3.4 ou análogo a eq. 4.1) ou através de penalização direta da função de avaliação (análogo a eq. 4.2).

A consideração de incertezas para o problema de planejamento é muito relevante, principalmente em função dos dados de mercado espacial, ou seja, dos dados de demanda por centro de carga para os anos futuros, e dos coeficientes da função objetivo, por exemplo, o custo unitário de equipamentos que também pode sofrer variação ao longo do período de planejamento. Essas incertezas podem ser tratadas através de conjuntos *fuzzy*, conforme item 4.4 do capítulo 4.

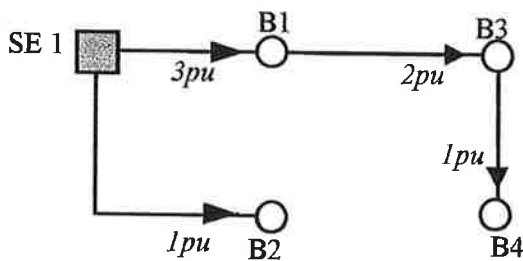
Além do tratamento de múltiplos objetivos, com a possibilidade de incluir os aspectos subjetivos de tomada de decisão, conjuntos *fuzzy* permitem utilizar o conceito de relaxação de critérios, que assume importância maior face às incertezas do processo de planejamento. A título ilustrativo, considere o caso de ampliação de subestações existentes que é realizado em função do carregamento da subestação, isto é, quando o seu carregamento excede a potência firme, conforme ilustrado na figura 5.8. Como resultado do procedimento de fluxo de potência *fuzzy*, aplicado a cada configuração (associada a um indivíduo do AG), tem-se o carregamento em todos os componentes do sistema representado por grandeza *fuzzy*. Assim, a decisão de ser ampliada a capacidade da subestação dependerá de comparação de números *fuzzy*, conforme discutido no item 4.4.4, isto permite que o engenheiro de planejamento, ao variar os controles de relaxação de restrições, analise a sensibilidade aos resultados. Caso o modelo fosse determinístico, mesmo uma diferença percentual mínima entre os valores do carregamento e da potência firme da SE, impor a ampliação da subestação, o que não se justifica em função das incertezas em prever demandas espaciais para horizontes de até 5 anos.

5.4 Casos Teste do Modelo de Planejamento por AG

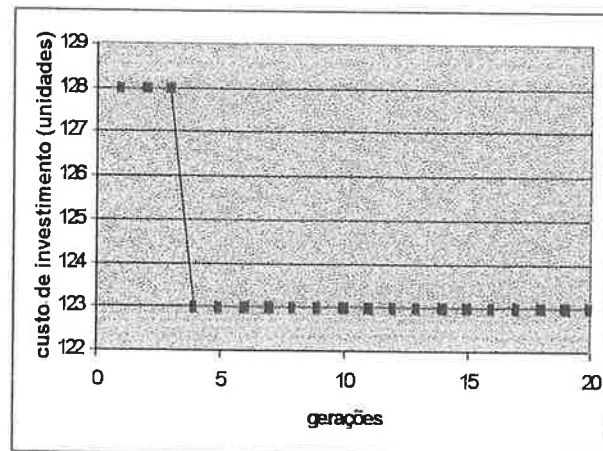
5.4.1 Caso Teste 1

O segundo exemplo ilustrativo do capítulo 3 (figura 3.14), bastante similar ao sistema da fig. 5.10, foi simulado pelo modelo AG de planejamento descrito no item 5.3. Neste exemplo, considera-se tão somente o custo fixo dos reforços na rede, não sendo impostas restrições de carregamento nos componentes ou níveis de tensão.

A solução ótima foi a mesma obtida no exemplo ilustrativo do capítulo 3, porém, face ao processo de decodificação utilizado, o AG converge muito rapidamente; dependendo dos seus parâmetros, a própria população inicial já conta com a solução ótima. Desta forma, este exemplo não ilustra as vantagens da modelagem proposta. De qualquer forma, a configuração obtida e o acompanhamento do custo total ao longo das gerações, para um caso com 20 gerações, 50 indivíduos por população, e taxas de cruzamento e mutação iguais a 80% e 0,5%, respectivamente, são apresentados na figura 5.11.



a. Configuração ótima



b. Custo mínimo por geração

Figura 5.11 – Solução para o Caso Teste 1

5.4.2 Caso Teste 2

O segundo caso teste trata de uma rede de distribuição de porte maior. O problema de planejamento em questão já havia sido simulado com outro modelo, denominado SISPLAN [6, 7, 8, 9], cujo processo de otimização baseia-se em programação matemática (algoritmo de transporte *out-of-kilter*

para os subproblemas de PL e método *branch-and-bound* para modelagem de custo fixo). A simulação será feita para o sistema existente com a carga do horizonte, na qual considera-se que foram definidos alguns reforços. No modelo SISPLAN, a rede é reduzida basicamente através de concentração da carga dos ramais (sem pontos de interligação com outros alimentadores ou sem conexões com reforços no sistema) nos nós de tronco. A rede reduzida correspondente ao sistema de distribuição existente com os reforços propostos, para o segundo caso teste, é apresentada na figura 5.12. Os dados de cabos, barras e ligações para este caso teste encontram-se no Anexo A, nas tabelas A.1, A.5 e A.6, respectivamente. A rede conta com 29 barras e 32 ligações (sendo 8 trechos de rede sem chaves de manobra, 20 trechos com chave NF e 4 trechos com chaves NA).

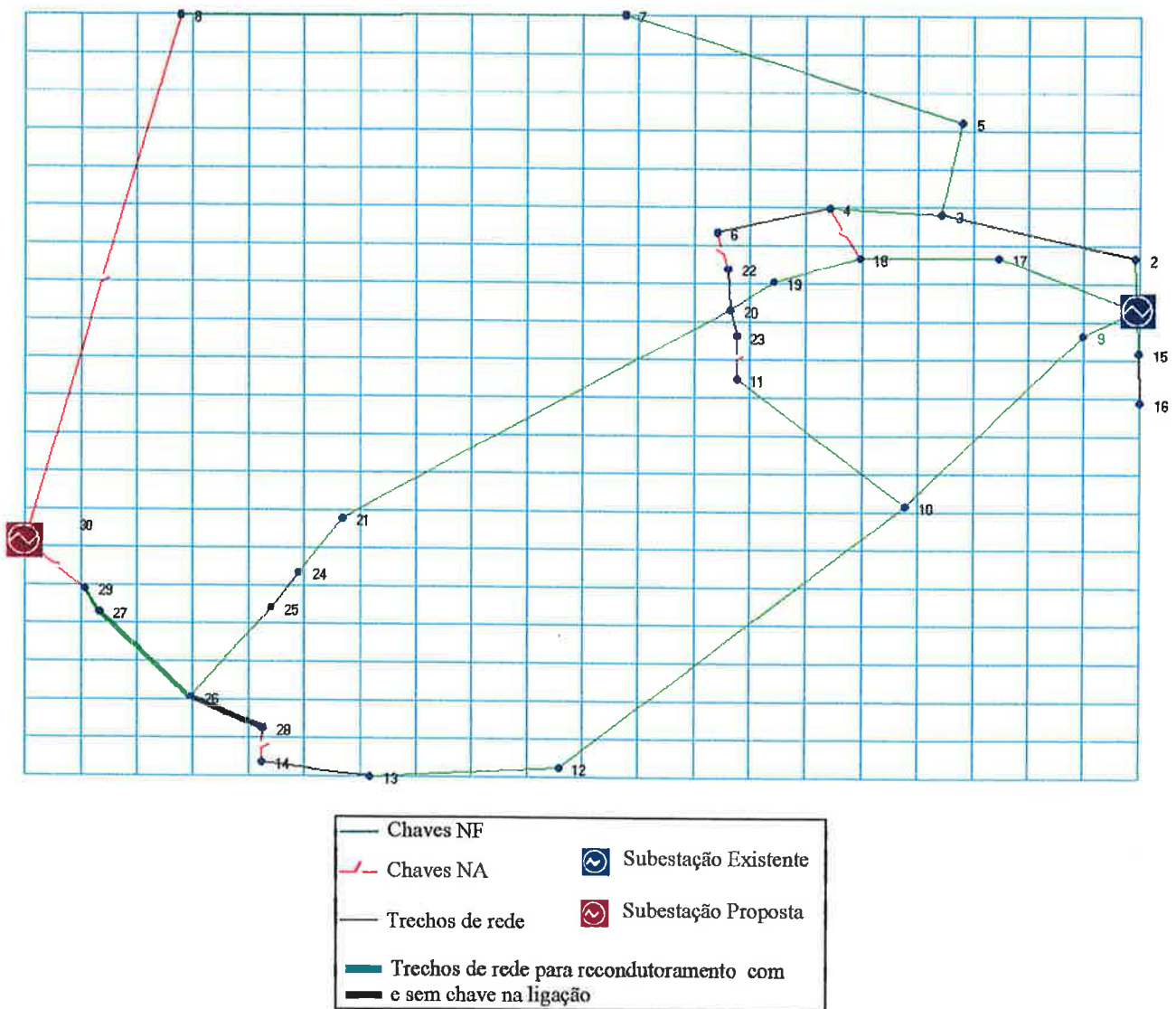


Fig. 5.12 – Sistema para o Caso Teste 2

O diagnóstico para a rede reduzida (obviamente mais ameno do que para a rede completa, pois não contempla as quedas de tensão e os carregamentos nos ramais), apresentado na Tabela 5.7, mostra

- Possibilidade de recondução dos trechos 27-29, 27-26 e 26-28, permitindo aumento da capacidade de 5,5MVA para 12,7MVA, com custo anualizado de R\$1.000 por quilômetro de rede.

No primeiro caso simulado, não houve preocupação com as restrições de tensão, ou seja, a função de pertinência associada ao perfil de tensões na rede não é considerada para a agregação *fuzzy* do objetivo e restrições. A função de pertinência de custo é análoga ao caso de minimização de perdas, utilizada no item 5.2, com um valor de referência arbitrariamente adotado. As funções de pertinência das restrições de carregamento de trechos de rede e de subestações são também as mesmas utilizadas no item 5.2, porém com uma modificação do tipo $\mu'_{restr} = (\mu_{restr})^2$, para forçar mais ainda as características desejadas da solução sem violação de restrições, conforme figura 5.14.

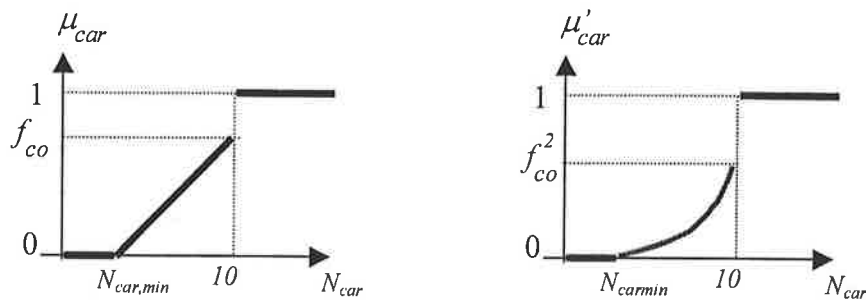
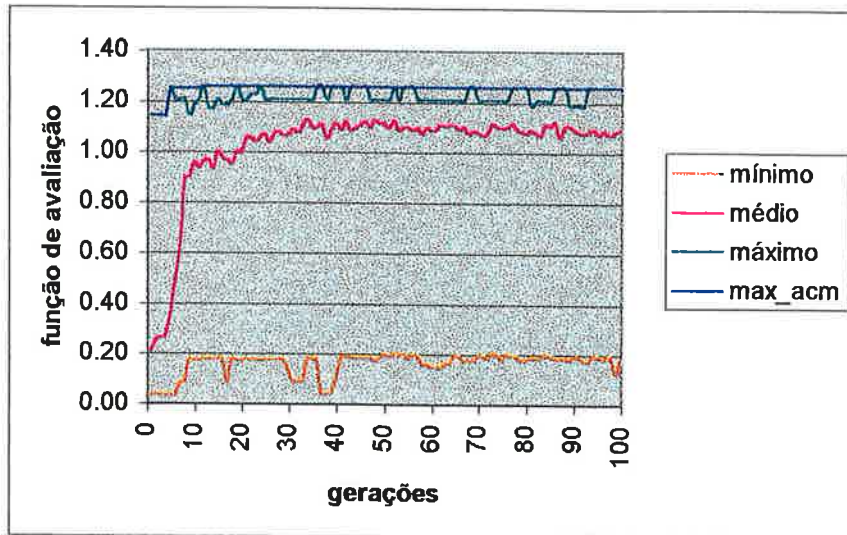


Fig. 5.14 – Função de pertinência para restrições

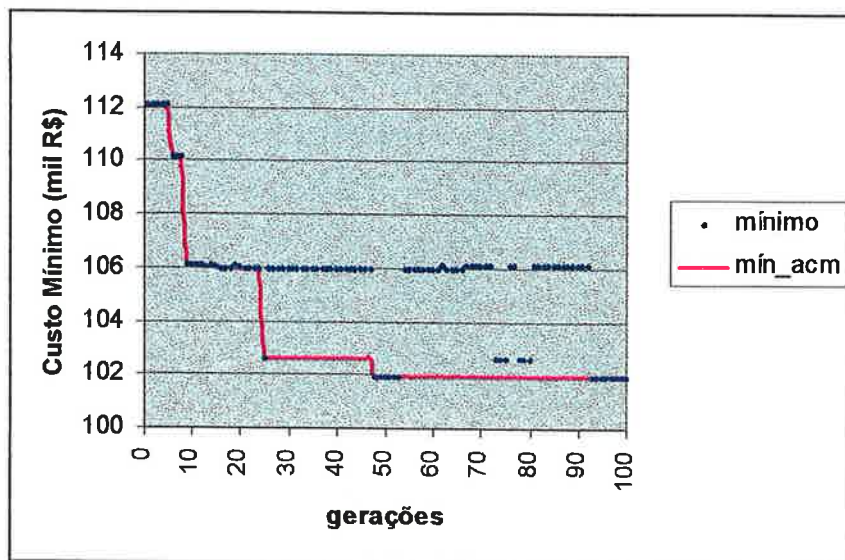
A agregação, para obtenção da função de pertinência do conjunto de decisão *fuzzy*, isto é, para a determinação da função de avaliação de cada indivíduo do AG, foi realizada pelo operador produto.

Os parâmetros do AG utilizados foram os seguintes: 100 gerações, 150 indivíduos por população, e taxas de cruzamento e mutação iguais a 80% e 0,5%, respectivamente. A estratégia 2, conforme descrita no item 5.2.2, foi utilizada para a decodificação dos *strings*.

Os gráficos de função de avaliação e custo anual no horizonte ao longo das gerações, desconsiderando a restrição de tensão, são apresentados, respectivamente, nas figuras 5.15a e 5.15b.



a. Função de avaliação



b. Custo mínimo

Fig. 5.15 – Evolução do AG para planejamento – Caso Teste 2

A configuração resultante é exatamente igual às apresentadas nas figuras 5.12 e 5.13. A diferença básica está no fato que, dos reforços propostos, a ampliação da subestação existente é selecionada. Os resultados finais para a solução ótima obtida são apresentados na tabela 5.8, onde nota-se claramente que o problema de violação de carregamento na SE é resolvido, com custo de expansão mínimo.

Tabela 5.8 – Resultados gerais para a configuração ótima (sem considerar restrição de tensão)

Parâmetro	Valor
Queda de Tensão Máxima	20,4 %
Carregamento Máximo Rede	76%
Carregamento Máximo SEs	67%
Custo das Perdas Totais na Rede	R\$ 61.979
Custo Total de Investimento	R\$ 40.000
Custo Total da Alternativa Ótima	R\$ 101.979
Função de pertinência - objetivo	1,261
Nota de tensão	4,59
Nota de carregamento rede	10,0
Função de pertinência - car. rede	1,00
Nota de carregamento de SEs	10,0
Função de pertinência - car. SEs	1,00
Função de pertinência – decisão (operador produto)	1,261

Um segundo processamento do mesmo problema de planejamento passa a considerar a restrição de tensão. Neste caso, as funções de pertinência das restrições são modificadas da seguinte forma:

- I. Notas para avaliação do perfil de tensão são obtidas com as três faixas a seguir:
 Faixa 1: $-2\% \leq \Delta V_i \leq 3\%$; Faixa 2: $3\% < \Delta V_i \leq 10\%$; Faixa 3: $\Delta V_i > 10\%$; com notas, respectivamente, iguais a $N_1=10,0$; $N_2=5,0$ e $N_3=0,0$.
- II. A função de pertinência para restrição de tensão é obtida com os mesmos coeficientes usados para o problema de minimização de perdas, item 5.2, porém com a função quadrado aplicada, conforme realizado para as restrições de carregamento.

A simulação é então realizada com os mesmos parâmetros do AG, porém reduzindo-se o número de gerações para 50 e utilizando-se a estratégia 1 de decodificação (cfr. item 5.2.2). A figura 5.15 apresenta a configuração ótima obtida nestas condições, onde o perfil de tensão é apresentado, mostrando que praticamente todas as barras apresentam nível de tensão superior a 0,95pu.

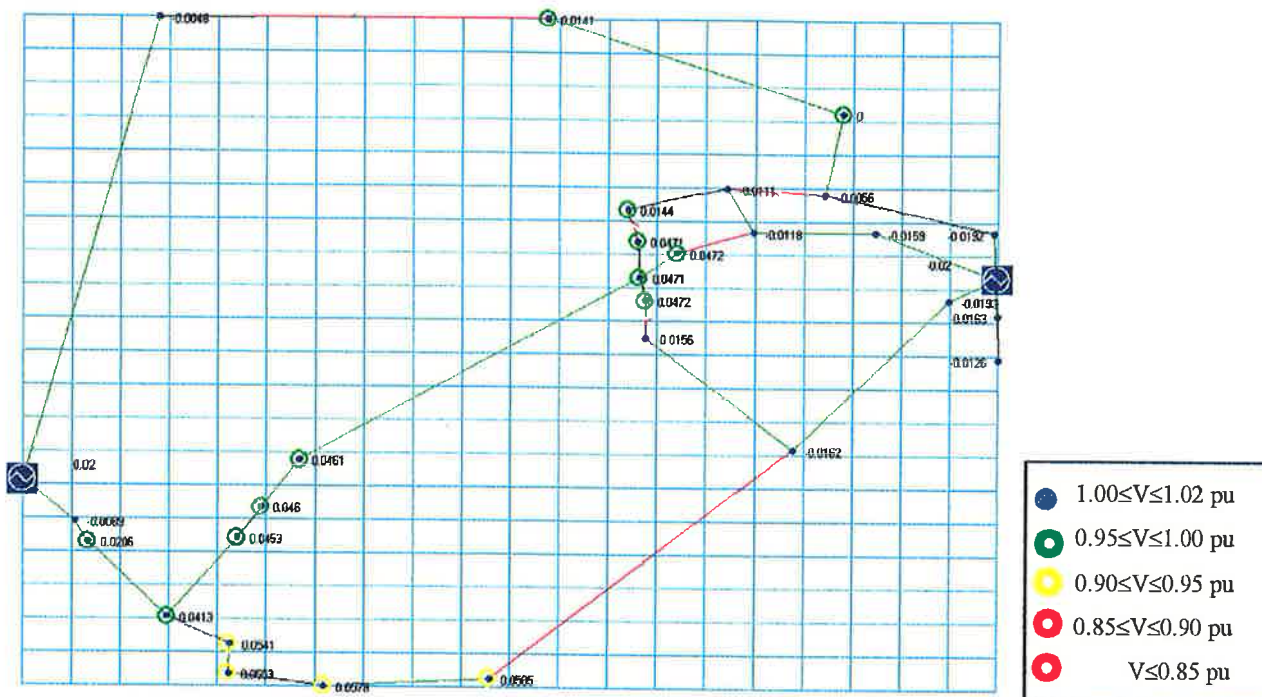


Fig. 5.15 – Configuração e perfil de tensão (queda de tensão em pu) obtidos para o caso teste 2 com restrição de tensão

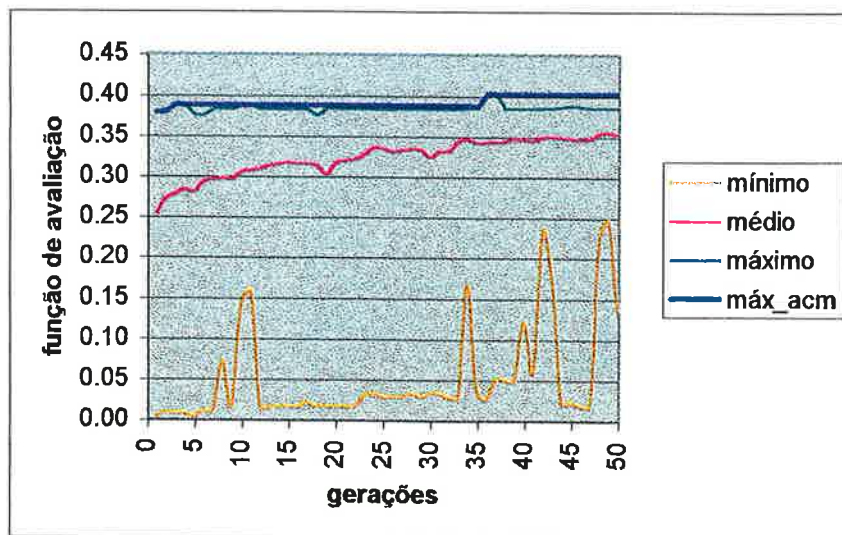
A consideração da restrição de tensão neste caso teste leva a uma série de reforços instalados na rede: a instalação da nova subestação na barra 30 com os dois novos alimentadores correspondentes, e os reforços propostos em recondutoramento. A tabela 5.9 apresenta os resultados para esta solução.

Tabela 5.9 – Resultados gerais para a configuração ótima do caso teste 2 (considerando restrição de tensão)

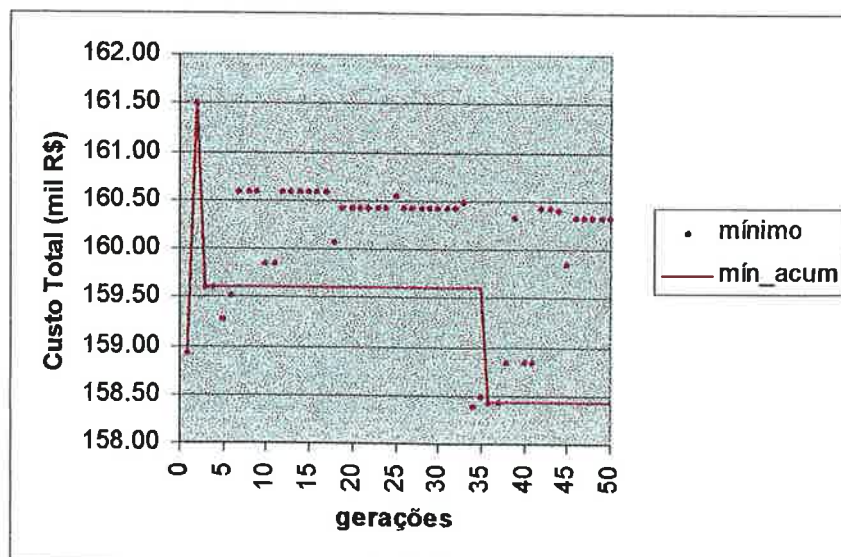
Parâmetro	Valor
Queda de Tensão Máxima	5,9%
Carregamento Máximo Rede	82%
Carregamento Máximo SEs	99%
Custo das Perdas Totais na Rede	R\$ 20.097
Custo Total de Investimento	R\$ 138.340
Custo Total da Alternativa Ótima	R\$ 158.437
Função de pertinência - objetivo	0,81
Nota de tensão	7,83
Função de pertinência - tensão	0,497
Nota de carregamento rede	10,0
Função de pertinência - car. rede	1,00
Nota de carregamento de SEs	10,0
Função de pertinência - car. SEs	1,00
Função de pertinência – decisão (operador produto)	0,403

Da análise da tabela 5.9, é interessante notar que o aumento em investimentos no sistema é compensado, de certa forma, pela diminuição do custo de perdas e melhoria do perfil de tensão. Deve-se destacar ainda que a melhoria da qualidade quanto ao nível de tensão poderia ser contabilizada através de benefícios monetários [64].

As figuras 5.16a e 5.16b apresentam a evolução da função de avaliação e custo total da alternativa para este caso.



a. Função de avaliação



b. Custo total por geração

Fig. 5.16 – Resultados do AG para o caso teste 2 com restrição de tensão

5.4.3 Caso Teste 3

O terceiro caso teste trata de uma rede de distribuição de porte ainda maior, que permite testar a capacidade do AG para redes reais. A rede reduzida conta com 325 barras, supridas através de 4 subestações e 32 alimentadores. Os dados de barras e ligações do sistema são apresentados no anexo A, nas tabelas A.6 e A.7, respectivamente.

O diagnóstico da rede existente, com a carga do horizonte, mostra a necessidade de uma série de reforços, conforme tabela 5.10, onde apresentam-se os carregamentos das subestações e alimentadores. Nota-se um grande déficit quanto à capacidade de subestações. Também, grande parte dos alimentadores apresenta carregamento maior do que o máximo admissível.

A partir do diagnóstico de carregamento em todos os trechos da rede e, utilizando-se o método apresentado em [9], as áreas carentes de reforços do sistema foram determinadas e foram propostas 3 novas subestações para serem instaladas no sistema, com 21 alimentadores, com dados fornecidos na tabela 5.11.

Além disso, foram propostas ampliações nas subestações SE1 e SE2, através de instalação de unidades transformadoras adicionais de, respectivamente, 10 e 40 MVA, com custos de investimento anualizados iguais a R\$20.000 e R\$40.000.

Operações de recondutoramento também foram permitidas, com custo anualizado de R\$1000,00/km para condutores com limite térmico de 12MVA.

Tabela 5.10 – Diagnóstico do sistema de distribuição para o caso teste 3

Subestação	Alimentador	Carregamento Alimentador (MVA)	Carregamento Máximo (MVA)	Carregamento SE (MVA)	Potência Firme SE (MVA)
SE1 (Barra 1)	SE1-01	6,24	8,17	16,2	7,00
	SE1-02	8,18	8,17		
	SE1-03	1,75	2,24		
SE2 (Barra 25)	SE2-01	14,00	8,17	101,6	48,00
	SE2-02	7,62	8,17		
	SE2-03	10,82	4,16		
	SE2-04	3,90	8,17		
	SE2-05	11,16	8,17		
	SE2-06	8,46	8,17		
	SE2-07	7,85	8,17		
	SE2-08	8,58	4,16		
	SE2-09	8,52	8,17		
	SE2-10	11,09	8,17		
	SE2-11	9,56	8,17		
SE3 (Barra 149)	SE3-01	13,14	8,17	78,8	56,00
	SE3-02	8,74	8,17		
	SE3-03	9,11	8,17		
	SE3-04	6,81	4,16		
	SE3-05	3,50	8,17		
	SE3-06	8,09	8,17		
	SE3-07	7,66	8,17		
	SE3-08	1,36	8,17		
	SE3-09	6,02	4,16		
	SE3-10	9,99	8,17		
	SE3-11	4,41	8,17		
SE4 (Barra 238)	SE4-01	8,43	5,44	44,2	28,00
	SE4-02	4,01	5,44		
	SE4-03	9,65	5,44		
	SE4-04	4,73	8,17		
	SE4-05	4,09	5,44		
	SE4-06	4,19	5,44		
	SE4-07	9,09	5,44		
TOTAL para as SEs:				240,8	139,00

Tabela 5.11 – Dados de Subestações Candidatas

Subestação Candidata	Capacidade (MVA)	Custo Anualizado (R\$)	Alimentador Novo (Candidato)	Capacidade (MVA)	Custo (*) Anualizado (R\$)
SE5	50	500.000	SE5-01	8,14	14730
			SE5-02	8,14	14258
			SE5-03	8,14	17236
			SE5-04	8,14	16508
			SE5-05	8,14	16132
			SE5-06	8,14	14310
			SE5-07	8,14	16056
			SE5-08	8,14	13408
			SE5-09	8,14	17402
			SE5-10	8,14	11482
			SE5-11	8,14	15698
			SE5-12	8,14	16198
SE6	30	400.000	SE6-01	8,14	10768
			SE6-02	8,14	13168
			SE6-03	8,14	14248
			SE6-04	8,14	18896
			SE6-05	8,14	20192
			SE6-06	8,14	17272
SE7	15	300.000	SE7-01	8,14	15406
			SE7-02	8,14	12026
			SE7-03	8,14	14954
(*) custo anualizado inclui o bay de saída do alimentador					

A rede existente com a localização das subestações candidatas e correspondentes alimentadores candidatos é apresentada na figura 5.17.

O problema de planejamento aqui exposto é de grande dimensão. Não só existem muitos reforços a serem instalados (3 subestações candidatas, 21 alimentadores candidatos, possibilidades de ampliação de 2 SEs e recondutoramento de cabos), mas também um número bastante alto de chaves de manobra existentes (155 unidades) na rede que, obviamente, aumenta da mesma forma o espaço de possíveis soluções. Modelos convencionais de planejamento, baseados em programação matemática, não têm capacidade de determinar solução de problema desta dimensão sem aproximações e sem desconsiderar restrições na formulação.

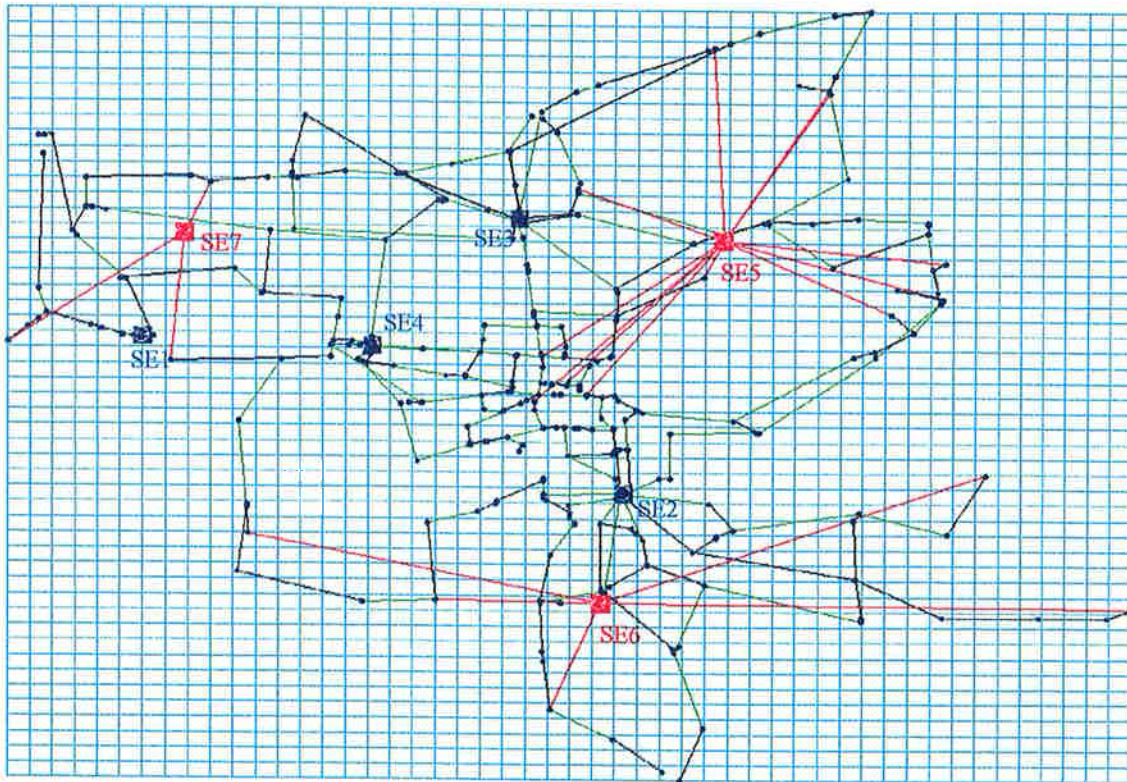


Fig. 5.17 – Sistema de distribuição e reforços em SEs novas para o caso teste 3

Diversos processamentos foram realizados com o modelo de planejamento baseado em AG, mas somente um dos casos é apresentado aqui para ilustração. Os parâmetros utilizados foram os seguintes:

- 150 gerações, 150 indivíduos por população, taxa de cruzamento de 80% e taxa de mutação de 1%;
- Funções de pertinência lineares, com mesmos parâmetros que no caso de minimização de perdas; porém, na restrição de tensão, foram adotadas as faixas de tensão:
Faixa 1: $-2\% \leq \Delta V_i \leq 10\%$; Faixa 2: $10\% < \Delta V_i \leq 15\%$; Faixa 3: $\Delta V_i > 15\%$; com notas, respectivamente, iguais a $N_1=10,0$; $N_2=0,0$ e $N_3=0,0$;
- Operador de agregação *fuzzy* do objetivo e das restrições: produto;
- Estratégia 1 de decodificação, conforme descrição no item 5.2.2.

A configuração obtida para este caso pelo modelo AG é apresentada na figura 5.18. Nota-se que a subestação SE7 não é instalada, ou seja são instaladas as subestações novas SE5 e SE6, a primeira com 8 alimentadores e a segunda com 4 alimentadores novos. As subestações SE1 e SE2 têm sua

capacidade ampliada pela instalação de novos transformadores. A nova distribuição de fluxos e número de alimentadores por subestação são apresentados na tabela 5.12

Também, na figura 5.18, são destacadas as barras que resultaram com nível de tensão abaixo de 0,90 pu (apenas duas barras de fim de linha), mostrando que o perfil de tensão resultante é bastante razoável. A tabela 5.13 apresenta os resultados adicionais relativos à configuração obtida.

As tabelas 5.14a e 5.14b apresentam os resultados relativos à função de avaliação e ao custo total de expansão do modelo de planejamento por AG, ao longo das gerações. O tempo de processamento resultou em 375 segundos, em um Pentium II 450MHz, com aproximadamente 2,5 segundos por geração.

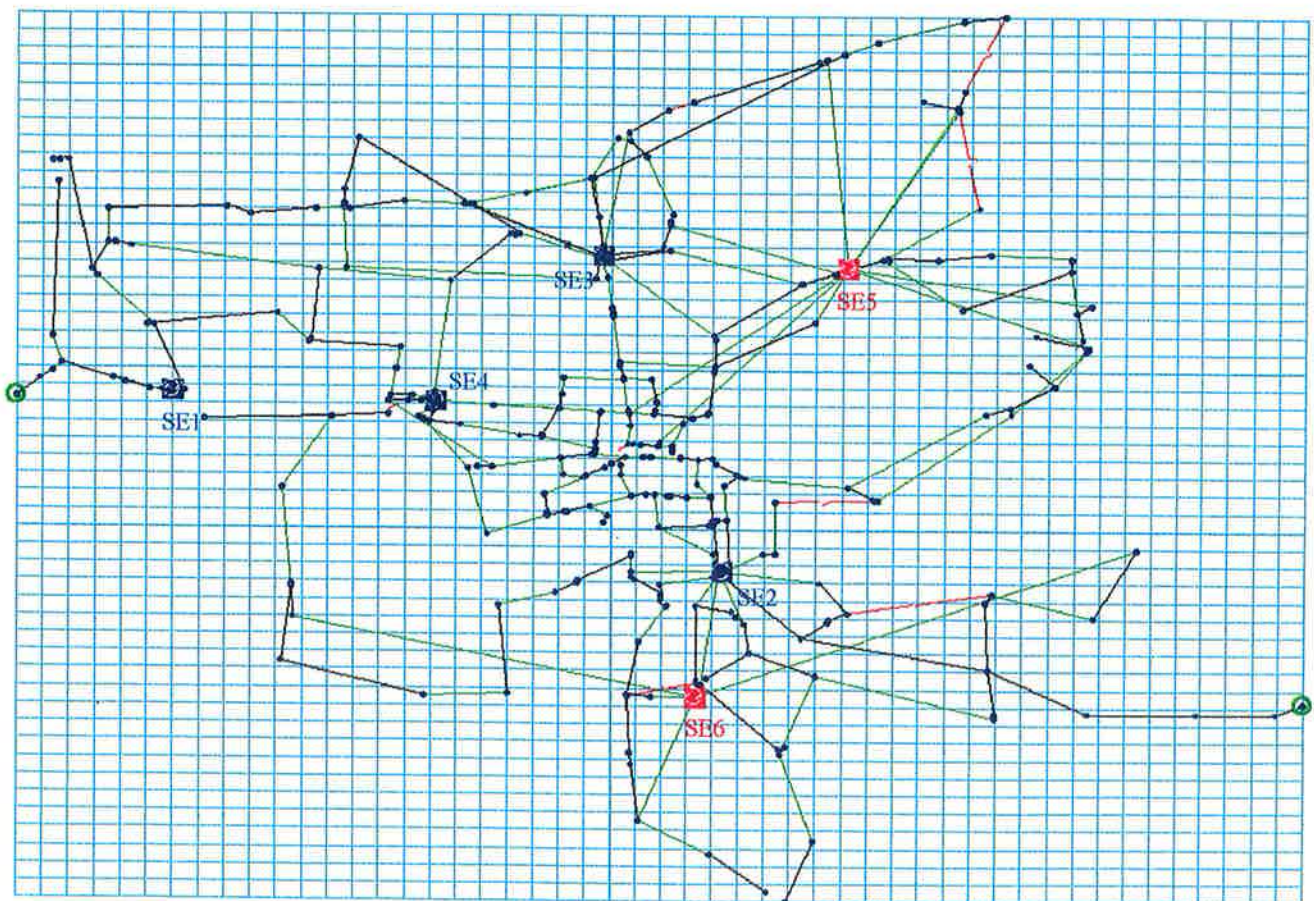


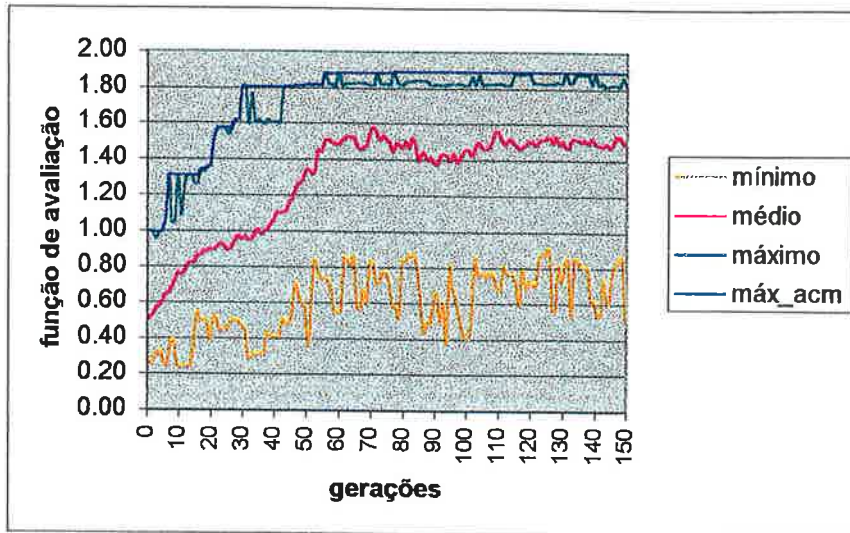
Fig. 5.18 – Configuração obtida para o caso teste 3

Tabela 5.12 – Distribuição de carregamento nas subestações do sistema

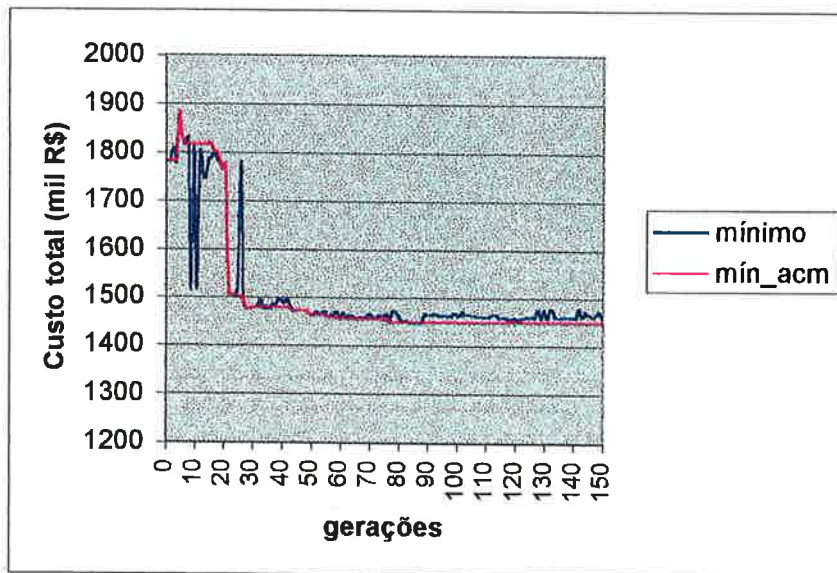
Subestação	Carregamento (MVA)		Capacidade (MVA)		Número de Alimentadores	
	Original	AG	Original	AG	Original	AG
SE1	17,2	16,2	7,0	17,0	3	3
SE2	109,0	75,5	48,0	88,0	11	11
SE3	88,8	52,3	56,0	56,0	11	10
SE4	44,7	27,8	28,0	28,0	7	7
SE5	-	45,2	-	50	-	8
SE6	-	23,8	-	30	-	4
Total	240,8	240,8				

Tabela 5.13 – Resultados gerais para a configuração obtida no caso teste 3

Parâmetro	Valor
Queda de Tensão Máxima	16%
Carregamento Máximo Rede	99,7%
Carregamento Máximo SEs	99,2%
Custo das Perdas Totais na Rede	R\$ 307.024
Custo Total de Investimento	R\$ 1.145.333
Custo Total da Alternativa Ótima	R\$ 1.452.357
Função de pertinência – objetivo	2,13
Nota de tensão	9,86
Função de pertinência – tensão	0,887
Nota de carregamento rede	10,0
Função de pertinência – car. rede	1,00
Nota de carregamento de SEs	10,0
Função de pertinência – car. SEs	1,00
Função de pertinência – decisão (operador produto)	1,89



a. função de avaliação



b. custo total de expansão

Fig. 5.14 – Resultados do AG para o caso teste 3

5.5 Discussão

Este capítulo mostrou que a modelagem de configuração de redes por AG tem enorme potencial para o tratamento dos problemas específicos de reconfiguração de redes e de planejamento de sistemas de distribuição.

O problema de reconfiguração de redes, para minimização de perdas elétricas totais através da determinação do estado das chaves de manobra do sistema, foi ilustrado através de um caso teste de médio porte, que permitiu a comparação de resultado com um outro método, baseado em busca

heurística, que determina a configuração ótima. O modelo baseado em AG, proposto neste trabalho, mostrou-se altamente eficiente, pois determinou a solução ótima, em tempos de processamento bastante baixos. Vários casos, variando-se a estratégia e os operadores de agregação *fuzzy*, mostraram que o AG reage diferentemente em termos de eficiência computacional, mas sempre tendeu a determinar a solução ótima do problema.

Alguns aspectos para acomodar a modelagem geral, descrita no capítulo 4, para o problema de planejamento, foram considerados neste capítulo. A extensão para tratamento deste problema ficou bastante simples, tanto pela generalidade da modelagem geral como pelas características intrínsecas dos AGs. Reforços comuns de serem modelados em problemas de expansão de redes foram considerados através de chaves equivalentes ou através de monitoramento de variáveis de carregamento nos componentes do sistema de distribuição.

Três casos teste foram considerados para ilustrar o modelo de planejamento por AG. Estes casos basicamente diferem pelo tamanho das redes. O primeiro caso teste tratou do mesmo exemplo ilustrativo do capítulo 3 que, pelo pequeno porte, não permitiu a demonstração dos verdadeiros potenciais da modelagem. O segundo caso teste permitiu o tratamento de uma rede de tamanho médio, demonstrando alguns controles que o planejador tem sobre o modelo para considerar os diferentes aspectos do problema; neste caso, em particular, mostrou-se que a consideração de restrições de tensão pode ser importante durante a etapa de otimização da rede, principalmente quando os problemas de tensão são espalhados em todo o sistema, os quais dificilmente poderiam ser resolvidos com alocação de suporte reativo. O terceiro caso mostrou o real potencial do AG, no qual a modelagem foi colocada à prova para uma rede de grande porte. O resultado foi obtido em tempo de processamento bastante baixo para a dimensão do problema, demonstrando que o modelo de planejamento pode tratar da expansão de sistemas de tamanho real, considerando todas as restrições do problema, sem aproximações na(s) função(ões) objetivo.

Capítulo 6

Conclusões

6.1 Conclusões Gerais

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de uma nova modelagem para o problema de configuração de redes, baseada em algoritmos genéticos.

No capítulo 2, foram abordados modelos baseados em programação matemática e em busca heurística, que servem como base importante de sustentação da modelagem proposta neste trabalho.

Inicialmente, apresentou-se uma formulação por PLIM do problema de configuração de redes, com a otimização de um único objetivo, sujeito às restrições de balanço de demanda, carregamento dos componentes do sistema, de radialidade e de níveis de tensão. A formulação aplica-se ao planejamento de sistemas de distribuição; porém o problema de reconfiguração de redes pode ser considerado como um caso particular desta formulação. O modelo incorpora múltiplos estágios, o que possibilita o tratamento dinâmico do planejamento, determinando-se quando cada reforço deve ser instalado no sistema. Ainda, como solução do problema, em cada estágio, determinam-se os reforços nas subestações e na rede elétrica, bem como a nova configuração do sistema que, obviamente, incorpora as áreas de influência das subestações novas e existentes. A restrição de radialidade utilizada neste tipo de formulação não garante soluções radiais, principalmente quando a rede apresenta barras com demanda nula. Além do mais, a representação das perdas é realizada através de linearização, o que pode levar a um aumento demasiado de variáveis do problema. A aplicação deste modelo a problemas de planejamento em sistemas de distribuição reais, com múltiplos estágios, não é viável, dado o grande número de variáveis, contínuas e inteiras, envolvidas na formulação PLIM. Uma primeira aproximação feita é a abordagem pseudo-dinâmica que, per se,

não resolve o problema dimensional. Na prática, para estudos de expansão de sistemas reais, utilizam-se algoritmos de transporte que resolvem casos particulares de formulações PLIM e, por este motivo, impõem a desconsideração das restrições de tensão e radialidade da rede; estes aspectos devem ser considerados após o procedimento de otimização da rede.

Modelos baseados em busca heurística permitem a consideração de todas as restrições necessárias para os problemas de configuração de redes com um único estágio. As perdas elétricas em um dado componente podem ser representadas por uma função quadrática do correspondente fluxo. Diferentes estratégias e métodos de busca heurística foram apresentados. Em particular, o método de busca pela melhor escolha, desenvolvido em [11], permite o tratamento de sistemas de distribuição de porte considerado médio (dezenas de variáveis de decisão).

Em ambas as abordagens, foi também mostrado que múltiplos objetivos e aspectos subjetivos de tomada de decisão, bem como as incertezas nos dados, podem ser tratadas a partir da teoria de conjuntos *fuzzy*, de diversas maneiras diferentes. Nos modelos de busca heurística, pode-se aplicar um procedimento de fluxo de potência *fuzzy*, que permite o tratamento dos dados de demanda e de coeficientes da função objetivo através de representação por números *fuzzy*. Tal procedimento permite determinar a consequência de tais incertezas nas principais variáveis do problema, ou seja nos resultados de carregamento e perdas nos componentes e nos níveis de tensão nas barras da rede.

Ficou claro, da análise realizada no capítulo 2, que os modelos de planejamento não possibilitam o tratamento de redes reais de distribuição, principalmente em função da dimensão do problema e sua característica de explosão combinatória.

Assim sendo, estabeleceu-se a motivação para o estudo de técnica alternativa para a solução do problema de configuração de redes, relativa à aplicação de algoritmos genéticos. Neste trabalho, procurou-se utilizar o AG básico, conhecido em sua forma canônica. Trabalhos futuros a serem desenvolvidos deverão incorporar a pesquisa de variantes deste algoritmos, visando maior eficiência do processo. No capítulo 3, os conceitos necessários ao entendimento do funcionamento de AGs foram descritos, tendo-se em vista sua aplicação aos problemas de configuração de redes. O procedimento básico foi então apresentado, com especial ênfase para a geração da população inicial, para a avaliação dos indivíduos de uma população, e para os operadores genéticos básicos. Dois exemplos ilustraram a aplicação de AGs para problemas relacionados à configuração de redes; o primeiro envolvendo a determinação de variáveis de fluxo, portanto variáveis contínuas

representadas por números reais positivos e, o segundo, envolvendo um problema de determinação da configuração de rede com custo mínimo.

Uma vez estabelecida as bases de funcionamento de AGs e sua potencial aplicação para os problemas de planejamento, passou-se então, no capítulo 4, à uma levantamento dos principais trabalhos relacionados à aplicação de AGs a problemas de configuração de redes. Estes trabalhos foram analisados com o devido grau de detalhe, com resultados que os autores consideravam positivos. O principal problema encontrado nestes artigos concentrou-se nos processos de codificação e decodificação dos *strings*, representantes de cada indivíduo de uma dada população. Observou-se que, dos trabalhos estudados, nenhum destes garante que configurações radiais e conexas sejam geradas durante o processo. O trabalho [48] apresentou um processo de codificação interessante, que tende a gerar configurações topologicamente viáveis; no entanto, não há nenhum procedimento mais elaborado no processo de decodificação, o que leva a um número relativamente alto de configurações inviáveis e, portanto, a uma certa ineficiência do processo de AG.

Este processo de codificação, apresentado em [48], serviu como base para os processos de codificação e decodificação apresentados neste trabalho. O processo de codificação, em particular, foi estendido para o tratamento de blocos e chaves, o que é mais conveniente para a aplicação em sistemas de distribuição de grande porte. O novo processo de decodificação proposto funciona como um filtro topológico, garantindo que todos os indivíduos resultem em configurações radiais e conexas. No capítulo 4, este processo de decodificação foi apresentado em detalhe, mostrando que o filtro topológico baseia-se no conceito de famílias de blocos. O monitoramento do estado de cada família, realizado dinamicamente durante o processo de decodificação de um dado *string*, permite garantir o funcionamento apropriado deste filtro. É importante destacar que, neste processo, não são inibidas quaisquer configurações presentes no espaço de soluções; logo, a busca pela solução ótima não é comprometida e sim melhorada.

A maneira de AGs representarem as características desejadas de um dado indivíduo da população é através de uma única função de avaliação. Quanto maior a função de avaliação, tanto mais ajustado às tais características este indivíduo estará. Assim, é óbvia a relação entre a função de avaliação e a função objetivo do problema em questão. Por exemplo, no problema de minimização de perdas, foram citadas duas maneiras (3.1) e (3.2) de relação entre a função de avaliação com as perdas totais na rede. No entanto, no modelo de configuração de redes por AGs, exige-se que o indivíduo mais ajustado seja aquele no qual não só a função objetivo seja otimizada mas também as restrições

sejam satisfeitas. Nos capítulos 3 e 4, mostrou-se como a introdução de penalidades na função objetivo ou na função de avaliação permitem a consideração das restrições do problema. Para a consideração dos critérios técnicos de carregamento e tensão na modelagem, foram propostas duas alternativas interessantes. A primeira alternativa baseia-se na definição de notas para os perfis de carregamento e tensão, que constitui um aprimoramento em relação à consideração de índices máximos, que não fornecem informação sobre o estado global da rede. A segunda alternativa baseia-se no conceito de cortes de carga para a eliminação das violações de carregamento e tensão, o que é particularmente interessante para a avaliação de uma medida de risco de não atendimento das restrições do problema.

Ainda no capítulo 4, apresentou-se a maneira pela qual os conjuntos *fuzzy* são considerados no modelo de configuração de redes por AGs para representar convenientemente as incertezas e os aspectos subjetivos de tomada de decisão, relativos ao problema de configuração de redes, de forma análoga à aplicada para os modelos baseados em programação matemática e busca heurística.

Neste sentido, ficou bastante clara a relação entre a agregação *fuzzy*, utilizada nos modelos simétricos de tomada de decisão de Bellman & Zadeh [33], e a função de avaliação. Esta constatação mostrou-se bastante interessante, pois permitiu trazer toda uma estrutura já estudada em trabalhos anteriores pelo autor, principalmente em programação matemática *fuzzy* [3, 34, 67]. Uma das principais vantagens desta estrutura consiste no tratamento, dentro da modelagem de configuração de redes por AGs, de múltiplos objetivos e suavização de restrições (*soft constraints*), considerados através das correspondentes funções de pertinência. Assim sendo, os aspectos subjetivos ficam incorporados através das funções de pertinência relacionadas a objetivos e restrições e dos vários operadores de agregação considerados neste trabalho. Uma vez que os AGs trabalham com avaliação explícita de soluções completas de configurações de rede, não existe restrição qualquer quanto ao tipo de funções de pertinência adotadas: podem ser funções dadas explicitamente por equações, por intervalos ou mesmo por pontos; além disso, também não existe limitação quanto aos operadores de agregação utilizados.

Ainda, com relação à aplicação de conjuntos *fuzzy* ao modelo de configuração de redes por AG, as incertezas implícitas nos dados do problema podem ser incorporadas na avaliação de cada configuração, associada a um dado indivíduo da população. Para tanto, os métodos de análise de redes, no caso o procedimento de fluxo de potência, podem trabalhar com operações aritméticas *fuzzy* que, conforme mencionado anteriormente, permitem determinar os parâmetros elétricos e as

funções objetivo associadas a uma dada configuração de rede através de grandezas *fuzzy*. Assim sendo, a todos os indivíduos de uma dada população, pode ser atribuído um índice de agregação *fuzzy* (4.11), no qual os vários objetivos e restrições são ponderados por pesos *fuzzy*. Tais pesos, representados por números *fuzzy*, podem ser também considerados através de variáveis lingüísticas (por exemplo, atributo muito, médio, ou pouco importante), facilitando-se desta forma a consideração dos aspectos subjetivos de tomada de decisão; os indivíduos podem então ser ordenados segundo métodos conhecidos (*ranking*), aplicados à números *fuzzy*. Obviamente, este processo tem repercussão direta no processo de avaliação dos indivíduos e na reprodução dos melhores indivíduos para as gerações futuras.

A utilização de grandezas *fuzzy* associadas aos parâmetros elétricos do problema permite também a relaxação dos critérios técnicos, relativos aos níveis de carregamento dos componentes da rede e aos níveis de tensão nas barras do sistema. Os mesmos métodos de verificação de restrições utilizados nos modelos de programação matemática em trabalhos anteriores do autor [38, 67]] e nos modelos baseados em busca heurística [11, 28], permitem a consideração de relaxação dos critérios técnicos através de parâmetros de controle, previamente estipulados pelo engenheiro que realiza o estudo de configuração de redes. Além disso, a verificação da “distância” de possíveis transgressões para cada uma das restrições e contabilização de um índice global, permitem a escolha de alternativas mais robustas que, mesmo em cenários mais pessimistas, não incorrem em violações de critérios.

No capítulo 5, a modelagem é aplicada para dois problemas específicos de configuração de redes, quais sejam o de minimização de perdas através da alteração dos estados das chaves do sistema e o de planejamento de sistemas de distribuição.

Para o primeiro problema, reconfiguração de redes para minimização de perdas, a modelagem por AG exposta no capítulo 4 tem aplicação direta. Um caso teste, que considera um problema de porte médio, permite a comparação de resultado com o método de busca heurística pela melhor escolha, que determina a configuração ótima, isto é, aquela na qual as perdas totais são mínimas. Este caso teste mostra a eficiência do método proposto de decodificação dos *strings*, no qual somente configurações radiais e conexas são consideradas para posterior avaliação. Também, as restrições de carregamento e níveis de tensão são incorporadas efetivamente na solução, através das notas atribuídas aos respectivos perfis de carregamento e tensão. Diferentes operadores de agregação *fuzzy* para otimização do objetivo de minimização das perdas e das restrições de tensão e

carregamento, de forma simétrica, levaram à determinação da solução ótima do problema, basicamente diferindo entre si somente quanto ao número de gerações necessárias para alcançar o ótimo. Este exemplo ilustra o grande número de parâmetros de controle que o engenheiro dispõe para estudar diferentes situações de estruturas de preferência, que possibilitam também a obtenção de outras soluções eficientes (não dominadas) em problemas de otimização com múltiplos objetivos.

Apesar da modelagem de configuração de redes por AG descrita no capítulo 4 ser bastante geral, sua aplicação ao problema de planejamento necessita algumas considerações quanto aos modelos dos reforços propostos para a expansão do sistema de distribuição. Desta maneira, no capítulo 5, descreveu-se como cada um destes reforços é tratado, para posterior consideração na modelagem por AG. Reforços candidatos como os trechos de rede, chaves de manobra e novos alimentadores podem ser considerados através de chaves e os correspondentes custos de investimento devem ser incorporados ao custo total de expansão desde que as chaves resultem fechadas no processo de decodificação ou que seus carregamentos, determinados pelo fluxo de potência *fuzzy*, resultem não nulos. Os reforços em subestações novas, ampliações em subestações existentes e recondutoramento de trechos de rede podem ser considerados sem a necessidade de introdução de chaves fictícias na rede. Basta o monitoramento das variáveis de fluxo correspondentes.

A partir destas considerações, a modelagem geral aplica-se diretamente ao problema de planejamento. Desta forma, todos os aspectos de eficiência do processo de codificação e decodificação de *strings* aplicam-se diretamente a todas as configurações alternativas à expansão do sistema, geradas durante o procedimento de AG. Além disso, a teoria de conjuntos *fuzzy* também aplica-se diretamente ao problema de planejamento, permitindo a consideração de múltiplos objetivos e dos correspondentes aspectos subjetivos de tomada de decisão, bem como das incertezas nos dados de planejamento. A verificação de restrições por comparação de números *fuzzy* é particularmente interessante para o problema específico de planejamento, quando os parâmetros de controle permitem a relaxação de restrições de modo a postergar ou evitar investimentos desnecessários no sistema, principalmente face às incertezas associadas ao mercado espacial.

Alguns casos teste para ilustrar o modelo de planejamento por AG foram considerados no capítulo 5. O modelo mostrou-se bastante eficiente, mesmo para o sistema de maior porte, composto por 325 barras, onde foram propostos praticamente todos os tipos de reforços (novos alimentadores, novas subestações, ampliações de subestações existentes e recondutoramento de trechos de rede). Além

disso, foram mantidas 155 chaves de manobra existentes no sistema, para permitir a determinação da configuração de rede associada a melhor alternativa encontrada pelo AG. Mesmo assim, face à um problema desta dimensão, a melhor solução foi obtida em cerca de 80 gerações com uma população de 150 indivíduos, em aproximadamente 3 minutos num computador Pentium II 450MHz.

6.2 Principais Contribuições do Trabalho

Conforme exposto no item anterior, a presente tese foi organizada de modo que os modelos desenvolvidos anteriormente pudessem trazer benefícios para a modelagem do problema de configuração de redes por AG. Foi proposto um novo modelo que utiliza-se eficientemente das características topológicas das redes de distribuição para a modelagem por AGs.

A escolha da utilização de algoritmos genéticos trouxe consigo uma série de vantagens deste método, tais como a codificação não direta dos parâmetros do problema, o tratamento de uma população de alternativas do problema (e não a partir de uma solução única), consideração direta das informações da função objetivo (e não suas derivadas ou informações auxiliares) e a utilização das regras de transição probabilísticas para busca no espaço de soluções.

Além disso, todos os desenvolvimentos relativos à teoria de tomada de decisão com múltiplos objetivos e incertezas através de conjuntos *fuzzy*, já aplicadas nos demais modelos pesquisados pelo autor [67], puderam ser incorporados ao modelo.

Os seguintes pontos, que podem ser extraídos da descrição do trabalho apresentada no item anterior, permitem resumir as principais contribuições do trabalho, sendo apresentadas em ordem decrescente de importância segundo opinião do autor:

- Proposição de um método inédito de codificação/ decodificação dos *strings* associados aos indivíduos de cada população, que garante que só sejam geradas configuração viáveis sob o aspecto topológico. O processo de decodificação pode ser considerado um filtro topológico, que não interfere com as características principais dos AGs; indivíduos são gerados aleatoriamente na população inicial e através de transições probabilísticas durante as gerações de populações

percorridas durante o processo. O processo não inibe a determinação de qualquer configuração do problema, porém o controle do estado das famílias de blocos, realizado dinamicamente durante o processo de decodificação, garante que não ocorram fechamentos de malhas. Desta forma, as soluções completas de possíveis alternativas de configuração de rede devem ser verificadas somente sob o ponto de vista da função objetivo e atendimento dos critérios técnicos, o que tende a acelerar significativamente a convergência dos AGs, principalmente quando comparado com os métodos descritos na literatura, que não garantem a inexistência de malhas ou ilhas nas soluções avaliadas. Os ótimos resultados alcançados, mesmo para as redes de grande porte, podem ser explicados pelo processo de decodificação aqui desenvolvido.

- Consideração de penalizações na função de avaliação (ou na função objetivo) para atendimento das restrições do problema: os dois métodos propostos para incorporação de restrições, o primeiro através de notas associadas aos perfis de carregamento e tensão na rede, e o segundo através de cortes de carga na rede, são originais. O segundo método, em particular, permite não só a consideração, sob um mesmo índice, de violações de carregamento e de tensão, como também a incorporação de um índice de risco associado ao não atendimento da carga do sistema sob os critérios técnicos previamente definidos.

- Aplicação de conjuntos *fuzzy* em AGs para configuração de redes: os métodos desenvolvidos pelo autor em trabalhos anteriores foram acomodados de forma positiva no novo modelo. Estes podem ser subdivididos em duas contribuições efetivas:
 - a) Métodos de agregação *fuzzy*, que permitem considerar, de modo simétrico (com o mesmo nível de importância), objetivos e restrições, representados através de suas funções de pertinência. Foi mostrado que a função de avaliação dos algoritmos genéticos pode ser entendida como a função de pertinência do conjunto de decisão *fuzzy*. A partir desta constatação, de caráter inédito quanto ao aspecto de contribuição, uma série de extensões da estrutura de tomada de decisões em ambiente *fuzzy* pode ser incorporada ao modelo de configuração de redes por AG. Assim, os aspectos subjetivos de tomada de decisão e a consideração de múltiplos objetivos, bem como a consideração de restrições suaves são implicitamente incorporadas ao modelo. Diferentes funções de pertinência e operadores de agregação podem ser utilizados, conforme apresentado no trabalho e nos casos teste de aplicação da modelagem.

- b) Consideração de incertezas nos dados através de números *fuzzy*. A vantagem dos AGs em trabalhar sobre soluções completas (e viáveis sob o aspecto de topologia, graças ao processo de decodificação proposto neste trabalho), permite com que sejam incorporados métodos de análise de redes bastante sofisticados; no presente trabalho, considerou-se a análise das configurações de rede através de um fluxo de potência *fuzzy*, que incorpora as incertezas presentes nos dados de planejamento. As conseqüências de tais incertezas nos resultados do fluxo de potência resultaram numa série de proposições interessantes: a consideração de um índice de agregação *fuzzy* associado a cada indivíduo da população que agrega todas as incertezas e aspectos subjetivos do problema e, portanto, melhor representa as características de cada elemento da população; a relaxação de critérios técnicos, que pode trazer efeitos bastante interessantes, principalmente nos problemas de planejamento, por exemplo através do adiamento de reforços na rede por pequenas violações de restrições que, face às incertezas do problema, podem ser melhor controladas pelo engenheiro; incorporação de índice de risco global de violação de restrições, de modo a serem preferidas soluções mais robustas, que tenham pouca possibilidade de apresentarem transgressões em função das incertezas do problema, principalmente quanto à previsão de carga.
- Implementação computacional da modelagem proposta: o desenvolvimento de um programa computacional para o tratamento do problema de configuração de redes foi realizado de forma a aproveitar as características dos sistemas de distribuição. O processo de decodificação dos *strings* foi desenvolvido de acordo com a especificação descrita no capítulo 4, valendo-se dos conceitos de blocos e famílias de blocos de carga. Tal decodificação permitiu que somente soluções completas radiais fossem analisadas, através de um modelo de fluxo de potência *fuzzy* para redes radiais, que apresenta eficiência computacional muito grande, possibilitando a avaliação de milhares de indivíduos durante o processo de AG.
 - Revisão de AGs: o presente trabalho possibilita, através de exemplos bastante simples e ilustrativos propostos pelo autor, o entendimento e a motivação para a aplicação de AGs no problema de configuração de redes. Espera-se que deste trabalho sejam derivados outras aplicações correlatas de AGs.

6.3 Tópicos para ulterior desenvolvimento

O presente trabalho tem por objetivo contribuir para uma série de estudos em distribuição de energia elétrica, relacionados às áreas de manutenção, operação e planejamento de sistemas. Algumas extensões naturais do trabalho são citadas a seguir, sem a pretensão de cobrir todos os possíveis desenvolvimentos futuros:

- Estudo das variantes do AG básico para o modelo de configuração de redes: nesta pesquisa espera-se verificar o impacto das variantes do algoritmo básico, em sua forma canônica, descrito neste trabalho, que vêm sendo muito estudadas na área de AGs. Pretende-se, deste estudo, analisar a influência destas variantes na eficiência computacional e na convergência do processo. Por exemplo, serão consideradas diferentes formas de reprodução (método da roleta, método elitista, etc.), diferentes maneiras de implementar os operadores genéticos de cruzamento (por exemplo com múltiplos pontos de corte) e mutação, bem como a utilização de outros operadores, diferentes maneiras de representar a normalização da função de avaliação, etc.;
- Estudo comparativo dos métodos de penalização, isto é, através de notas relativas aos perfis de carregamento e tensão e através dos cortes de carga para eliminação de transgressões nos critérios técnicos. Prevê-se também aplicação do índice de agregação *fuzzy*, que considera as funções objetivo e a penalização de violação em restrições, possibilitando a ordenação dos indivíduos, analisando-se os correspondentes impactos na eficiência do AG.
- Incorporação de fontes alternativas, co-geração e produtores independentes no problema de configuração de redes. As referências [65, 66] utilizam modelos baseados em programação matemática para o tratamento deste problema. A aplicação de AGs permitirá, além de maior flexibilidade de modelagem tais como funções objetivo e restrições não lineares, a consideração de redes de distribuição de dimensões maiores.
- Abordagem dinâmica do problema de planejamento, isto é, considerar também os aspectos temporais de instante de instalação dos reforços no sistema. Algumas proposições já estão sendo estudadas pelo autor. Basicamente, deve-se adequar o procedimento de codificação/decodificação dos *strings* para não só assegurar configurações radiais ao longo dos estágios de

tempo que subdividem o período de planejamento, mas também para assegurar que reforços instalados em um determinado estágio sejam mantidos até o horizonte de planejamento.

- Processamento paralelo: AGs apresentam a grande vantagem de permitirem o processamento paralelo de indivíduos, quando nenhuma troca de informações é necessária durante as etapas de decodificação e avaliação. Assim, o processamento paralelo de indivíduos poderia representar enormes ganhos em tempos de processamento, principalmente em aplicações em tempo real, como é o caso dos problemas de reconfiguração de redes.

- Consideração do problema de múltiplos objetivos, buscando-se, numa única simulação, um grande número de soluções não dominadas. Algumas idéias, extraídas de [41], dividem a população em sub-populações, cada uma otimizando um objetivo ou, mais genericamente, com combinação distinta de importância dos diferentes objetivos (diferentes conjuntos de pesos para cada sub-população). Obviamente, isto reflete em diferentes funções de avaliação para cada sub-população e na operação de reprodução para a formação das gerações seguintes. Os operadores genéticos de cruzamento e mutação, no entanto, mantêm-se inalterados, isto é, permitem que indivíduos de sub-populações diferentes sofram cruzamentos entre si. Tal idéia, bem como possíveis variantes, seriam bastante interessantes para serem pesquisadas.

- Estudo de problemas de alocação de equipamentos em redes de distribuição. Nesta categoria, podem ser incluídos os problemas de compensação reativa, através da instalação de bancos de capacitores e reguladores de tensão, visando melhoria da qualidade da tensão e problemas de alocação de dispositivos de proteção e seccionamento, visando a melhoria de índices de confiabilidade nas redes de distribuição, como a minimização da energia não distribuída.

- Estudo de extensões para algoritmos evolucionários: AGs correspondem a um dos tipos de algoritmos evolucionários. Outras técnicas conhecidas correspondem a estratégias de evolução, programação evolucionária e programação genética, e mostram-se bastante promissoras para aplicação em vários problemas da área de sistemas de potência [12].

Referências Bibliográficas

- [1] SUN, D. I.; FARRIS, D. R.; COTE, P. J.; SHOULTS, R. R.; CHEN, M. S., Optimal distribution substation and primary feeder planning via the fixed charge network formulation, **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Vol. PAS 101, nº 3, March 1982, pp. 602-608.
- [2] OLIVEIRA, M. F. AND MIRANDA, V., Optimisation studies in distribution networks including reliability evaluations, In: CIRED - INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICITY DISTRIBUTION, Liege, Belgium, 1979.
- [3] KAGAN, N. **Electrical power distribution systems planning using multiobjective and fuzzy mathematical programming**. London, 1992. 215p. Thesis (Ph.D.). Queen Mary & Westfield College, University of London.
- [4] KAGAN, N.; ADAMS, R. N. A Benders' decomposition approach to the multi-objective distribution planning problem. **Electrical Power & Energy Systems**, v.15, n.5, p.259-71, Oct. 1993.
- [5] KAGAN, N.; BOVOLATO, M. C. Planejamento da expansão do sistema de distribuição utilizando programação matemática probabilística. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 11^o, São Paulo, 1996. **Anais**. São Paulo, SBA, 1996.
- [6] KAGAN, N.; ROBBA, E. J.; OLIVEIRA, C. C. B. SISPLAN - sistema computacional para estudos de planejamento de redes primárias de distribuição de energia elétrica. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 12., Recife, 1994, SENDI 94: contribuições técnicas. Recife, ELETROBRÁS/CELPE, 1994. Disquete 11, seção D, n.112

- [7] KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B.; SCHMIDT, H. P.; ROBBA, E. J. Planejamento da expansão de sistemas de distribuição com proposição automática de localização e capacidade de reforços. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 13., São Paulo, 1997.
- [8] KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B.; ROBBA, E. J. SISPLAN - metodologia de planejamento de expansão de sistema de distribuição primária de energia elétrica. In: SEMINÁRIO DE INGENIERIA DE POTÊNCIA IEEE CHILE, 4. / SEMINÁRIO DE DISTRIBUCCION DE ENERGIA ELÉTRICA, 1., Santiago de Chile, 1994, Anales. Santiago de Chile, Universidad de Santiago de Chile, 1994.
- [9] KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B.; SCHMIDT, H. P.; ROBBA, E. J. Methodology for automatic allocation of new facilities in distribution systems expansion planning. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICITY DISTRIBUTION, Buenos Aires, 1996, CIRED ARGENTINA'96.
- [10] KAGAN, N.; ADAMS, R. N. Application of Benders' decomposition technique to the distribution planning problem, In: PROCEEDINGS OF THE 10TH PSCC - POWER SYSTEM COMPUTATION CONFERENCE, Graz, Austria, **Anais**,1990.
- [11] OLIVEIRA, C. C. B. **Configuração de redes de distribuição de energia elétrica com múltiplos objetivos e incertezas através de procedimentos heurísticos**. São Paulo, 1997. 225p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- [12] MIRANDA, V.; SRINIVASAN, D.; PROENÇA, L. M. Evolutionary computation in power systems, In: PROCEEDINGS OF THE PSCC'96 - POWER SYSTEM COMPUTATION CONFERENCE, Dresden, Alemanha, **Anais**,1996.
- [13] JARDINI, J. A.; TAHAN, C. M. V; AHN, S. U; FIGUEIREDO, F. M. Residential and commercial daily load curve representation by statistical function for engineering studies purposes. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICITY DISTRIBUTION, 13., Brussels, 1995, CIRED: reports. Brussels, CIRED, 1995. ses. 5, p. 5.23.1-6. V. 1.

- [14] KAGAN, N.; GOUVEA, M. R.; TAHAN, C. M. V. . Análise de desequilíbrios em redes de baixa tensão. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA, 2, São Lourenço, 1997.
- [15] ENGEL, M. V.; GREENE, E. R. & WILLIS, H. L. (Eds). IEEE Tutorial on Power Distribution Planning, The Power Engineering Education Committee, Documento EHO 361-6-PWR, 1992.
- [16] GÖNEN, T. AND RAMIREZ-ROSADO, I. J. Pseudo-dynamic planning for expansion of power distribution systems, **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. PWRS-6, n° 1, , pp. 245-254, Feb. 1991.
- [17] GÖNEN, T.; RAMIREZ-ROSADO, I. J. Optimal multi-stage planning of power distribution systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.2, n.2, p.512-9, Apr. 1987.
- [18] ADAMS, R. N.; LAUGHTON, M. A. Optimal planning of power networks using mixed integer programming. Part 1: static and time phased network synthesis. **Proc. IEE**, v.121, n.2, p.139-47, Feb. 1974.
- [19] THOMPSON, G. L., WALL, D. L. AND NORTHCOTE-GREEN, J. E. D. An optimization model for planning radial distribution networks, **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Vol. PAS 98, n° 3, pp. 1061-1068, May 1979.
- [20] MASUD, E. An interactive procedure for sizing and timing distribution substations using optimization techniques. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Vol. PAS 93, n° 5, , pp. 1281-1286, Sep. 1974.
- [21] CRAWFORD, D. M AND HOLT, S. B. A mathematical optimization technique for locating and sizing distribution substations and deriving their optimal service areas, **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Vol. PAS 94, n° 2, pp. 230-235, March 1975.
- [22] HINDI, K. S. AND BRAMELLER, A. Design of low voltage distribution networks: a mathematical programming method, **Proc. IEE**, Vol. 124, N° 1, pp. 54-58, Jan. 1977.

- [23] GÖNEN, T. AND FOOTE, B. L. Mathematical dynamic optimisation model for electric system planning, **Electrical Power and Energy Systems**, Vol. 4, nº 2, pp. 129-136, April 1982.
- [24] GÖNEN, T. AND RAMIREZ-ROSADO, I. J. Review of distribution system planning models: a model for optimal multi-stage planning, **Proc. IEE**, Vol. 133, Pt. C, nº 7, pp. 397-408, Nov. 1986.
- [25] BURANI, G. F. Planejamento da expansão da distribuição primária com aplicação de técnicas de transporte, In: X SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, Rio de Janeiro, Outubro 1988.
- [26] ZELENY, M. Multiple Criteria Decision Making, McGraw Hill, Columbia University, 1982.
- [27] GOICOECHEA, A.; HANSEN, D. R. AND DUCKSTEIN, L. Multiobjective Decision Analysis with Engineering and Business Applications, John Wiley and Sons, 1982.
- [28] KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B. 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**, 1996.
- [29] FRÓES, S. M.; KAGAN, N. Técnicas de inteligência artificial aplicadas ao problema de planejamento da expansão do sistema de distribuição de energia elétrica. São Paulo, 1997. EPUSP, 18p. (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas, BT/PEA/9704).
- [30] KAGAN, N.; BIGHAM, J. 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., Rio Claro, 1993. Rio Claro, UNESP/SBA, 1993.

- [31] CHERKAUOUI, R.; BART, A.; GERMOND, A. J. Optimal Configuration of Electrical Distribution Networks Using Heuristic Methods, In: 11TH PSCC - POWER SYSTEM COMPUTATION CONFERENCE, Sep. 1993.
- [32] RICH, E.; KNIGHT, K. Artificial Intelligence, McGraw Hill, 1991.
- [33] BELLMAN, R. E. AND ZADEH, L. A. Decision making in a fuzzy environment. **Management Science**, vol. 17(B), n. 4, 1970, pp. 141-164.
- [34] KAGAN, N.; ADAMS, R. N. A computational decision support system for electrical distribution systems planning. In: CONFERENCE ON COMPUTER SYSTEMS AND SOFTWARE ENGINEERING, 6. / ANNUAL EUROPEAN COMPUTER CONFERENCE, 6., The Hague, 1992, COMPEURO 92: proceedings. Los Alamitos, IEEE Computer Society Press, 1992.
- [35] ZIMMERMANN, H.-J. Fuzzy Sets, Decision Making and Expert Systems, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1987.
- [36] HANNAN, E. L. Linear programming with multiple fuzzy goals, **Fuzzy Sets and Systems**, vol. 6, 1981, pp. 235-248.
- [37] NAKAMURA, K. Some extensions of fuzzy linear programming, **Fuzzy Sets and Systems**, vol. 14, 1984, pp. 211-229.
- [38] KAGAN, N. AND ADAMS, R. N. Electrical Power Distribution Systems Planning Using Fuzzy Mathematical Programming, **Electric Power and Energy Systems**, June 1994.
- [39] DUBOIS, D., PRADE, H. Fuzzy Sets and Systems - Theory and Applications, Acad. Press, N. York, 1980.
- [40] BAAS, S. M., KWAKERNAAK, H. Rating and ranking of multiple-aspect alternatives using fuzzy sets, **Automatica**, Vol. 13, 1977.

- [41] GOLDBERG, D. E. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley, 1989.
- [42] NOVAES, A. G., Métodos de Otimização: Aplicações aos Transportes, Edgard Blücher Ltda., São Paulo, 1978.
- [43] SCHAFER, J. D. Some experiments in machine learning using vector evaluated genetic algorithms, Dissertação de doutoramento, Vanderbilt University, Nashville.
- [44] SCHMIDT, H.P.; OLIVEIRA, C.C.B.; KAGAN, N.; ROBBA, E.J. Methodology for locating switching and protective equipment in distribution systems. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICITY DISTRIBUTION, Buenos Aires, 1996, CIRED ARGENTINA'96.
- [45] KAGAN, N.; SCHMIDT, H.P.; OLIVEIRA, C.C.B.; ROBBA, E.J.; TAHAN, C.M.V. Otimização da qualidade de fornecimento pela localização de dispositivos de proteção e seccionamento em redes de distribuição. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA, 2, São Lourenço, 1997.
- [46] RAMIREZ-ROSADO, I. J.; BERNAL-AGUSTÍN, J. L. Genetic algorithms to the design of large power distribution systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, v.13, n.2, p.695-703, May 1998.
- [47] YEH, E.C., VENKATA, S.S. & SUMIC, Z. Improved distribution system planning using computational evolution, **IEEE Transactions on Power Systems**, vol.11, n. 2, May 1996.
- [48] MIRANDA, V.; RANITO, J. V; PROENÇA, L. M. Genetic algorithms in optimal multi-stage distribution network planning, **IEEE Transactions on Power Systems**, vol.9, n. 4, Nov. 1994.
- [49] CHANG, H.; KUO, C. An efficient approach for reconfiguration problem in distribution systems, **Stockholm Power Tech Conference**, p. 722-8, Stockholm, Sweden, June 1995.

- [50] MIRANDA, V.; PROENÇA, L. M. A general methodology for distribution planning under uncertainty, including algorithms and fuzzy models in a multi-criteria environment, **Stockholm Power Tech Conference**, p. 832-7, Stockholm, Sweden, June 1995.
- [51] LEVITIN, G.; MAZAL-TOV, S.; ELMAKIS, D. Optimal allocation of sectionalizers in radial distribution networks, **Stockholm Power Tech Conference**, p. 761-5, Stockholm, Sweden, June 1995.
- [52] MIRANDA, V.; PROENÇA, L. M.; OLIVEIRA, L; CARVALHO, L. Dynamic planning of distribution networks for minimum regret strategies, 13., Brussels, In: CIRED, 1995. ses. 6, p. 6.13.1-5. V. 1.
- [53] MIRANDA, V.; PROENÇA, L. M. Planejamento dinâmico de redes de distribuição com produção dispersa. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICITY DISTRIBUTION, Buenos Aires - Argentina, 1996, CIRED ARGENTINA'96
- [54] BROWN, R. E.; GUPTA, S, CHRISTIE, R. D.; VENKATA, S. S. A genetic algorithm for reliable distribution system design. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT SYSTEMS APPLICATIONS TO POWER SYSTEMS, ISAP96, Orlando, EUA. **Anais**, p.29-33, 1996.
- [55] YEH, E. C.; VENKATA, S. S.; ZUMIC, Z. Improved distribution system planning using computation evolution, **IEEE Transactions on Power Systems**, vol.11, n. 2, p. 668-74, May. 1994.
- [56] OYAMA, T. Restorative planning of power system using genetic algorithm with branch exchange method. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT SYSTEMS APPLICATIONS TO POWER SYSTEMS, ISAP96, Orlando, EUA. **Anais**, p.175-9, 1996.
- [57] NARA, K.; SHIOSE, A.; KITAGAWA, M.; ISHIHARA, T. Implementation of genetic algorithm for distribution systems loss minimum re-configuration, **IEEE Transactions on Power Systems**, vol.7, n. 3, p. 1044-51, Aug. 1992.

- [58] BRETAS, N. G.; DELBEM, A. C. B.; CARVALHO, A. Restabelecimento de energia ótimo para sistemas de distribuição radiais por algoritmos genéticos, In: III CONLADIS – CONGRESSO LATINO AMERICANO DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, p. 577-81, Setembro de 1998.
- [59] PEREIRA, M. A.; MURARI, C. A. F. Aplicação de algoritmos genéticos em redes de distribuição de energia elétrica. In: III CONLADIS – CONGRESSO LATINO AMERICANO DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, p. 592-6, Setembro de 1998.
- [60] EL ABIAD, A. H. AND STAGG, G. W., Computer Methods in Power System Analysis, McGraw Hill, New York, 1968.
- [61] KAGAN, N.; ROBBA, E. J.; RAMOS, D. S. Sistemas de potência. São Paulo, 1985. s.ed.
- [62] OLIVEIRA, C. C. B.; KAGAN, N. Heuristic model for the selection and allocation of shunt capacitors and voltage regulators in electrical power distribution systems. Submetido e aprovado para: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT SYSTEMS APPLICATIONS TO POWER SYSTEMS, ISAP99, Rio de Janeiro, 1999.
- [63] OLIVEIRA, C. C. B.; KAGAN, N. Modelagem heurística para a seleção e locação de bancos de capacitores e de reguladores de tensão em redes de distribuição de energia elétrica. III CONLADIS – CONGRESSO LATINO AMERICANO DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, p. 602-6, Setembro de 1998.
- [64] GOUVEA, M. R.; KAGAN, N. A methodology for planning electricity supply systems on aggregated basis. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICITY DISTRIBUTION, 13., Brussels, 1995, CIRED: reports. Brussels, CIRED, 1995. ses. 6, p. 6.32.1-6. V. 1.
- [65] KAGAN, N.; ADAMS, R. N.; TER-GAZARIAN, A. A multiobjective approach for the integration of new energy sources into the electrical distribution system design. In: ENCONTRO LUSO-AFRO-BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO E OPERAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 1., Porto - Portugal, 1991.

- [66] TER-GAZARIAN, A.; KAGAN, N. Design model for electrical distribution systems considering renewable, conventional and energy storage units. In: IEE PROCEEDINGS-C: GENERATION, TRANSMISSION AND DISTRIBUTION. v. 139, n. 6, p. 499-504, Nov. 1992.
- [67] KAGAN, N. **Application of fuzzy sets theory to distribution systems planning**. In: Fuzzy Logic Techniques in Power Systems, W. Mielczarski (Ed.), Springer-Verlag, Berlin, 1997.

Dados das Redes dos Casos Teste

Tabela A.1 – Dados de cabos para o caso teste

Índice	Descrição	Impedância de seqüência direta (Ω/km)		Corrente Admissível (A)
		Resistência	Reatância	
1	4 CAA	1.5900	0.5200	140.
2	4 CA	1.5200	1.4800	125.
3	1/0 CA	0.6000	0.4500	215.
4	2/0 CA	0.4700	0.4400	260.
5	4/0 CA	0.3000	0.4200	340.
6	336 CA	0.1900	0.4000	510.
19	1/0 CAA	0.7000	0.5200	230.
23	336 CAA	0.1900	0.3800	530.

Tabela A.2 - Dados de Barras do Sistema da Fig. 5.1

Barra	Demanda (kW)	Barra	Demanda (kW)
1	*	65	2000.0
53	*	38	0.0
71	*	68	0.0
2	0.0	82	1000.0
3	0.0	28	0.0
5	0.0	14	0.0
54	2000.0	15	0.0
55	2000.0	16	300.0
56	0.0	36	0.0
72	1000.0	35	0.0
77	0.0	69	3000.0
4	0.0	70	0.0
6	800.0	83	700.0
8	2000.0	86	400.0
57	1000.0	24	0.0
62	800.0	32	500.0
66	0.0	21	100.0
73	800.0	22	100.0
74	1000.0	23	0.0
78	1000.0	30	500.0
80	300.0	29	600.0
7	500.0	39	500.0
12	800.0	40	0.0
13	800.0	84	1000.0
58	1000.0	85	400.0
59	600.0	27	100.0
63	1000.0	26	0.0
64	0.0	37	500.0
67	0.0	25	100.0
75	2000.0	34	0.0
76	500.0	46	500.0
79	800.0	31	500.0
81	1500.0	41	0.0
33	500.0	42	100.0
9	100.0	48	500.0
10	100.0	43	0.0
11	300.0	44	0.0
17	500.0	45	0.0
18	500.0	50	500.0
19	0.0	47	500.0
20	800.0	49	500.0
60	1000.0	51	300.0
61	500.0	52	500.0

* - Subestações

Tabela A.3 - Dados de Ligações do Sistema da Fig. 5.1

Nós terminais		Cabo	Comprim. (m)	Tipo (*)
2	4	23	2000.0	0
3	6	23	6000.0	0
5	8	23	6000.0	0
54	57	23	4000.0	0
55	62	23	2000.0	0
56	66	23	2000.0	0
72	73	23	2000.0	0
72	74	23	2000.0	0
77	78	23	4000.0	0
77	80	23	2000.0	0
4	7	23	2000.0	0
6	12	23	4000.0	0
8	13	23	4000.0	0
57	58	23	2000.0	0
57	59	23	8000.0	0
62	63	23	2000.0	0
62	64	23	8000.0	0
66	67	23	4000.0	0
74	75	23	2000.0	0
74	76	23	3000.0	0
78	79	23	2000.0	0
78	81	23	100.0	1
7	9	23	2000.0	0
7	10	23	2000.0	0
7	11	23	2000.0	0
12	17	23	4000.0	0
12	18	23	4000.0	0
13	19	23	4000.0	0
13	20	23	4000.0	0
59	60	23	4000.0	0
59	61	23	4000.0	0
64	65	23	4000.0	0
67	68	23	4000.0	0
81	82	23	6000.0	0
28	33	23	4000.0	0
11	14	23	4000.0	0
11	15	23	4000.0	0
11	16	23	2000.0	0
35	38	23	2000.0	0
68	69	23	4000.0	0
68	70	23	6000.0	0
82	83	23	3000.0	0
82	86	23	4000.0	0
24	28	23	2000.0	0
28	32	23	2000.0	0
16	21	23	2000.0	0
16	22	23	2000.0	0
16	23	23	2000.0	0

Nós terminais		Cabo	Comprim. (m)	Tipo (*)
30	36	23	2000.0	0
29	35	23	2000.0	0
35	39	23	3000.0	0
35	40	23	2000.0	0
83	84	23	2000.0	0
83	85	23	2000.0	0
23	27	23	100.0	1
26	30	23	2000.0	0
30	37	23	4000.0	0
25	29	23	4000.0	0
29	34	23	2000.0	0
40	46	23	100.0	1
27	31	23	2000.0	0
37	41	23	1000.0	0
37	42	23	1000.0	0
46	48	23	4000.0	0
31	43	23	2000.0	0
31	44	23	2000.0	0
31	45	23	2000.0	0
48	50	23	3000.0	0
45	47	23	100.0	1
47	49	23	4000.0	0
49	51	23	2000.0	0
49	52	23	4000.0	0
24	20	23	100.0	1
23	26	23	100.0	1
23	25	23	100.0	1
1	2	23	100.0	1
1	3	23	100.0	1
1	5	23	100.0	1
53	54	23	100.0	1
53	55	23	100.0	1
53	56	23	100.0	1
71	72	23	100.0	1
71	77	23	100.0	1
80	33	23	100.0	2
64	38	23	100.0	2
20	36	23	100.0	2
15	19	23	100.0	2
13	76	23	100.0	2
14	17	23	100.0	2
12	61	23	100.0	2
18	34	23	100.0	2
43	39	23	100.0	2
85	52	23	100.0	2
51	50	23	100.0	2
48	69	23	100.0	2
86	70	23	100.0	2

* - tipos de ligações: 0-trecho sem chave 1-trecho c/ chave NF 2-trecho c/ chave NA

Tabela A.4 – Dados de Carga do Caso Teste da fig. 5.12

Barra	Demanda (kW)	Fator de Potência
1	*	*
2	0.0	.00
3	452.4	.86
4	260.4	.85
5	139.1	.85
6	776.2	.85
7	906.1	.85
8	1091.6	.85
9	0.0	.00
10	444.5	.85
11	49.9	.85
12	231.9	.85
13	947.4	.85
14	3051.4	.85
15	0.0	.00
16	3124.8	.85
17	.0000	.00
18	71.3	.85
19	35.7	.85
20	7.1	.85
21	3.6	.85
22	0.0	.00
23	42.8	.85
24	164.1	.85
25	873.9	.85
26	85.6	.85
27	428.1	.85
28	2214.5	.85
29	2238.8	.85
* - Subestação		

Tabela A.5 – Dados de Ligações do Caso Teste da fig. 5.12

Nós terminais		Cabo	Comprim. (m)	Corrente Admissível (A)	Tipo (*)
2	1	3	140	144.0	1
3	2	3	2310	215.0	0
4	3	3	1003	215.0	1
5	3	3	1370	215.0	1
6	4	2	3010	125.0	0
7	5	3	3977	215.0	1
8	7	3	6440	215.0	1
9	1	6	770	341.7	1
10	9	6	3137	400.0	1
11	10	3	3380	215.0	1
12	10	6	5050	400.0	1
13	12	6	1720	400.0	1
14	13	6	1070	510.0	0
15	1	3	300	144.0	1
16	15	3	300	215.0	0
17	1	5	1485	227.8	1
18	17	5	1485	340.0	1
19	18	5	1290	340.0	1
20	19	5	550	340.0	1
21	20	5	4518	340.0	1
22	20	3	80	215.0	0
23	20	3	400	215.0	0
24	21	5	845	340.0	1
25	24	5	1050	340.0	0
26	25	5	1424	340.0	1
27	26	19	1420	230.0	1
28	26	19	1051	230.0	0
29	27	19	1920	230.0	1
29	30	23	568	355.1	2
8	30	23	7332	355.1	2
4	18	5	275	340.0	2
6	22	3	1199	215.0	2
14	28	3	69	215.0	2
11	23	3	30	215.0	2

Tabela A.6 (1/3)– Dados de Barras do Caso Teste da Fig. 5.17

Número	Demanda (kW)	Fator de Potência
1	1.0200	.0000
2	.0000	.0000
3	73.9156	.9400
4	24.6397	.9399
5	10.5624	.9401
6	31.6813	.9400
7	4079.1710	.9400
8	688.6641	.9213
9	.0000	.0000
10	425.2487	.9200
11	.0000	.0000
12	904.8027	.9343
13	.0000	.0000
14	1666.5100	.9243
15	433.1521	.9200
16	2016.8300	.9300
17	228.7842	.9300
18	903.8999	.9200
19	865.8620	.9300
20	280.9115	.9256
21	1786.8870	.9245
22	.0000	.0000
23	.0000	.0000
24	1749.6520	.9200
25	*	*
26	.0000	.0000
27	174.1955	.9200
28	161.6189	.9200
29	2639.8270	.9200
30	5561.7750	.8448
31	64.6528	.9200
32	1401.4450	.9200
33	64.6528	.9200
34	1249.8800	.9200
35	.0000	.0000
36	2726.0320	.9200
37	.0000	.0000
38	897.1520	.9200
39	447.1533	.9200
40	402.4374	.8500
41	1538.2110	.8900
42	411.3871	.8500
43	3302.3730	.8926
44	631.9767	.9200
45	.0000	.0000
46	.0000	.0000
47	.0000	.0000
48	1239.1380	.8679
49	2104.3210	.9000
50	101.8208	.9000
51	1160.4460	.9200
52	.0000	.0000
53	437.4576	.9200
54	911.9122	.9186
55	507.7067	.9200
56	2195.2680	.9136
57	393.7154	.9200
58	1565.8020	.9000
59	208.1676	.9000
60	.0000	.0000

Número	Demanda (kW)	Fator de Potência
61	.0000	.0000
62	89.6405	.9200
63	352.9788	.9200
64	3459.5760	.9200
65	.0000	.0000
66	94.8153	.9200
67	56.8926	.9200
68	948.1844	.9200
69	.0000	.0000
70	.0000	.0000
71	2373.3930	.9200
72	796.4765	.9200
73	2443.1540	.9200
74	3939.5660	.9200
75	512.0215	.9200
76	.0000	.0000
77	1402.7640	.8844
78	409.4409	.8800
79	1793.3630	.8800
80	900.7722	.9200
81	80.8063	.8800
82	2317.4460	.8800
83	1555.8840	.8800
84	.0000	.0000
85	78.6540	.9200
86	78.6540	.9200
87	687.8701	.9200
88	676.4451	.9200
89	1782.5110	.9200
90	629.2482	.9200
91	1596.2820	.9200
92	896.6859	.9200
93	1421.0550	.9200
94	.0000	.0000
95	335.7382	.9200
96	1106.5770	.9200
97	881.6631	.9200
98	982.6616	.9200
99	.0000	.0000
100	3478.8280	.9200
101	1793.3590	.9200
102	.0000	.0000
103	.0000	.0000
104	15.0858	.9201
105	984.6417	.9200
106	101.8271	.9200
107	.0000	.0000
108	.0000	.0000
109	1059.5230	.9200
110	843.3819	.9200
111	60.3381	.9200
112	490.2508	.9200
113	730.3491	.9200
114	37.7074	.9200
115	1949.5210	.9200
116	135.7670	.9000
117	152.1071	.9200
118	22.6307	.9200
119	1423.3590	.9200
120	517.1962	.9200

Tabela A.6 (2/3)– Dados de Barras do Caso Teste da Fig. 5.17

Número	Demanda (kW)	Fator de Potência	Número	Demanda (kW)	Fator de Potência
121	.0000	.0000	181	3597.7140	.9400
122	267.5007	.9200	182	.0000	.0000
123	553.0220	.9200	183	860.3298	.9100
124	638.7285	.9200	184	399.9564	.9200
125	.0000	.0000	185	2496.2650	.9143
126	821.0427	.9200	186	718.3240	.9200
127	2437.6300	.9200	187	1070.5880	.9133
128	.0000	.0000	188	1268.6250	.9100
129	225.1963	.9200	189	.0000	.0000
130	4169.7180	.9200	190	.0000	.0000
131	435.8806	.9200	191	991.9675	.9000
132	249.9778	.9200	192	556.4796	.9131
133	716.5225	.9200	193	1955.9530	.9126
134	577.1495	.8831	194	.0000	.0000
135	.0000	.0000	195	21.5440	.9000
136	282.6213	.9000	196	2618.7220	.9180
137	139.0006	.9000	197	.0000	.0000
138	139.0006	.9000	198	2149.8990	.9197
139	.0000	.0000	199	3304.2830	.9200
140	3258.7690	.9196	200	.0000	.0000
141	1448.2170	.9166	201	169.6998	.9000
142	694.9761	.9000	202	779.6653	.9200
143	236.2654	.9124	203	.0000	.0000
144	484.2447	.9039	204	2110.1400	.9200
145	531.5560	.9200	205	1256.5060	.9154
146	977.6018	.9000	206	3343.6390	.9200
147	162.1547	.9000	207	.0000	.0000
148	1227.7890	.9000	208	353.4162	.9400
149	*	*	209	1008.5210	.9400
150	.0000	.0000	210	.0000	.0000
151	57.5381	.9500	211	.0000	.0000
152	2826.4480	.9277	212	.0000	.0000
153	289.6501	.9244	213	265.0637	.9200
154	143.8438	.9500	214	649.4011	.9200
155	997.3152	.9500	215	181.0195	.9200
156	3094.2430	.9500	216	654.4998	.9200
157	95.8938	.9500	217	1721.4250	.9200
158	1519.2600	.9213	218	491.8370	.9200
159	3348.8140	.9200	219	.0000	.0000
160	775.7852	.9200	220	1082.3290	.9200
161	.0000	.0000	221	242.9700	.9200
162	1118.9250	.9200	222	732.3699	.9200
163	1658.4570	.9200	223	.0000	.0000
164	287.0444	.9200	224	.0000	.0000
165	374.7495	.9200	225	160.0104	.9200
166	1490.1620	.9200	226	526.2380	.9200
167	119.5968	.9200	227	561.8038	.9200
168	712.2839	.9200	228	53.3355	.9200
169	598.0011	.9200	229	21.3360	.9200
170	.0000	.0000	230	8631.2070	.9200
171	2384.5670	.9200	231	35.5565	.9199
172	.0000	.0000	232	.0000	.0000
173	.0000	.0000	233	.0000	.0000
174	181.0213	.9400	234	9.0549	.9199
175	282.8411	.9400	235	1528.0130	.9200
176	825.8923	.9400	236	2874.4330	.9200
177	407.2886	.9400	237	.0000	.0000
178	113.1383	.9400	238	*	*
179	565.6788	.9400	239	.0000	.0000
180	3133.8610	.9400	240	2359.2530	.9200

Tabela A.6 (3/3)– Dados de Barras do Caso Teste da Fig. 5.17

Número	Demanda (kW)	Fator de Potência
241	313.7614	.9200
242	833.9685	.9200
243	181.0195	.9200
244	126.7071	.9200
245	181.0195	.9200
246	187.0543	.9200
247	1588.9250	.9200
248	573.6188	.9200
249	126.7071	.9200
250	1093.1180	.9200
251	500.8157	.9200
252	362.0337	.9200
253	.0000	.0000
254	199.3358	.8400
255	1043.2360	.9087
256	302.0269	.8811
257	119.0632	.8425
258	59.8013	.8700
259	356.1420	.9200
260	484.8698	.9200
261	.0000	.0000
262	1250.3040	.9053
263	199.3325	.8700
264	.0000	.0000
265	.0000	.0000
266	170.0209	.9100
267	858.6452	.9182
268	.0000	.0000
269	998.8239	.9100
270	777.8979	.9126
271	1268.6400	.9148
272	315.1649	.9100
273	242.4274	.9100
274	1172.9320	.9143
275	378.1962	.9100
276	735.3860	.9100
277	.0000	.0000
278	965.4249	.9200
279	1635.6400	.9112
280	129.9780	.9100
281	.0000	.0000
282	.0000	.0000
283	.0000	.0000
284	479.5451	.9000

Número	Demanda (kW)	Fator de Potência
285	67.8790	.9000
286	769.3223	.9000
287	603.3884	.9000
288	81.4575	.9000
289	135.7670	.9000
290	2267.7400	.9200
291	135.7670	.9000
292	79.1989	.9000
293	112.6024	.9101
294	.0000	.0000
295	28.4451	.8599
296	.0000	.0000
297	241.7885	.8600
298	3207.0760	.8891
299	475.6725	.8600
300	142.2323	.8600
301	.0000	.0000
302	.0000	.0000
303	1340.0980	.9200
304	220.6623	.9200
305	1165.4010	.9200
306	1241.2600	.9200
307	220.6623	.9200
308	.0000	.0000
309	.0000	.0000
310	126.9263	.9200
311	181.0195	.9200
312	272.9670	.9200
313	61.4135	.9200
314	163.7828	.9200
315	163.7828	.9200
316	204.7164	.9200
317	1610.4040	.9200
318	1765.8490	.9200
319	552.7489	.9200
320	1250.1620	.9200
321	327.5526	.9200
322	511.8061	.9200
323	.0000	.0000
324	413.7515	.9200
325	1485.4890	.9200
326	*	*
327	*	*
328	*	*

Tabela A.7(1/3) – Dados de Ligações do Caso Teste da Fig. 5.17

Nós Terminais		Cabo	Comprim. (m)	Tipo (**)	Custo Fixo
2	1	6	94	1	0
3	2	6	1424	0	0
4	3	6	1050	1	0
5	4	6	114	0	0
6	5	6	760	0	0
7	5	4	2025	0	*
8	6	6	567	1	0
9	6	6	54	0	0
10	7	4	270	0	*
11	10	5	2260	0	*
12	8	4	1058	0	*
13	1	6	43	1	0
14	13	6	953	1	0
15	14	6	14	0	0
16	14	6	2240	0	0
17	16	6	2000	1	0
18	16	1	700	1	*
19	17	5	3550	0	*
20	18	4	2596	0	*
21	19	1	7076	0	*
22	1	1	500	1	*
23	22	1	500	1	*
24	23	2	1900	0	0
26	25	6	131	1	0
27	26	6	811	1	0
28	27	6	165	0	0
29	28	6	311	0	0
30	28	6	60	0	0
31	29	6	600	0	0
32	30	6	120	0	0
33	32	6	143	1	0
34	33	3	1280	1	0
35	34	6	886	0	0
36	35	3	213	0	*
37	25	6	34	1	0
38	37	6	1322	1	0
39	38	6	670	0	0
40	38	6	150	0	0
41	39	6	750	0	0
42	39	6	553	0	0
43	41	6	1664	1	0
44	41	1	1357	1	*
45	43	1	60	0	*
46	44	6	148	0	0
47	25	4	56	1	*
48	47	4	796	1	*
49	48	4	282	1	*
50	48	4	100	0	*
51	49	4	619	0	*
52	49	1	330	0	*
53	51	2	60	0	*
54	53	1	296	0	*
55	54	1	580	1	*
56	55	1	1500	0	*
57	56	1	1220	1	*
58	57	1	1700	0	*
59	58	1	1287	0	*
60	25	6	42	1	0

Nós Terminais		Cabo	Comprim. (m)	Tipo (**)	Custo Fixo
61	60	6	2172	1	0
62	61	6	1500	0	0
63	62	6	1930	1	0
64	63	6	1080	0	0
65	25	6	48	1	0
66	65	6	878	1	0
67	66	4	309	0	*
68	66	6	1244	0	0
69	68	6	1320	0	0
70	69	6	625	1	0
71	70	6	1020	0	0
72	71	6	310	0	0
73	72	6	941	0	0
74	73	6	860	1	0
75	74	4	800	0	*
76	25	6	35	1	0
77	76	6	885	1	0
78	77	6	567	0	0
79	78	1	1640	1	*
80	78	3	200	0	*
81	79	6	158	0	0
82	79	1	949	1	*
83	82	1	1810	0	*
84	25	6	500	1	0
85	84	6	1737	0	0
86	85	3	430	0	*
87	85	6	2100	0	0
88	87	1	743	0	*
89	87	6	1092	0	0
90	87	1	1380	0	*
91	89	6	1000	0	0
92	91	2	1560	0	*
93	92	1	3450	0	*
94	25	4	25	1	*
95	94	4	795	1	*
96	95	4	110	0	*
97	96	4	877	1	*
98	97	4	1170	1	*
99	98	4	33	0	*
100	98	4	1851	1	*
101	100	4	1360	1	*
102	101	4	40	0	*
103	25	6	30	1	0
104	103	6	30	1	0
105	104	6	950	0	0
106	105	6	660	1	0
107	105	1	90	0	*
108	106	6	230	0	0
109	108	6	60	1	0
110	108	6	60	1	0
111	110	6	340	0	0
112	109	6	1150	1	0
113	112	6	1880	1	0
114	112	4	320	0	*
115	113	6	233	0	0
116	115	6	516	0	0
117	116	6	750	1	0
118	117	6	250	1	0

* - possibilidade de recondução

** - tipos de ligações: 0-trecho sem chave 1-trecho c/ chave NF 2-trecho c/ chave NA

Tabela A.7(2/3) – Dados de Ligações do Caso Teste da Fig. 5.17

Nós Terminais		Cabo	Comprim. (m)	Tipo	Custo Fixo
119	116	1	496	0	*
120	118	6	443	0	0
121	25	6	43	1	0
122	121	6	323	1	0
123	122	6	923	1	0
124	123	6	537	1	0
125	123	4	450	0	*
126	124	4	100	1	*
127	124	4	111	1	*
128	126	4	118	0	*
129	128	3	450	1	*
130	128	4	420	1	*
131	129	1	206	0	*
132	129	1	217	1	*
133	132	1	240	0	*
134	130	4	250	0	*
135	25	6	215	1	0
136	135	6	856	0	0
137	136	6	90	0	0
138	137	6	390	0	0
139	137	6	30	0	0
140	138	4	50	1	*
141	138	4	203	1	*
142	140	4	290	1	*
143	141	4	440	0	*
144	142	4	440	1	*
145	144	6	125	0	0
146	144	4	152	0	*
147	146	4	100	0	*
148	146	4	300	1	*
150	149	6	675	1	0
151	150	6	675	1	0
152	151	6	3056	0	0
153	151	6	1242	1	0
154	152	6	1370	1	0
155	154	4	795	1	*
156	155	1	950	0	*
157	156	4	1287	1	*
158	157	4	277	0	*
159	158	4	310	0	*
160	159	3	319	0	*
161	149	6	75	1	0
162	161	6	1665	1	0
163	162	6	1165	0	0
164	163	6	295	1	0
165	164	6	490	1	0
166	165	6	1620	1	0
167	165	6	150	0	0
168	166	6	1110	0	0
169	168	6	711	1	0
170	168	6	300	0	0
171	169	6	200	0	0
172	169	6	660	0	0
173	149	6	59	1	0
174	173	6	440	0	0
175	174	4	82	0	*
176	175	4	410	0	*
177	176	4	1700	1	*
178	176	4	180	0	*

Nós Terminais		Cabo	Comprim. (m)	Tipo	Custo Fixo
179	177	4	750	1	*
180	179	4	1126	1	*
181	180	4	1840	1	*
182	149	4	147	1	*
183	182	4	1477	0	*
184	183	4	610	1	*
185	183	4	800	1	*
186	185	4	150	1	*
187	186	4	301	0	*
188	187	4	1060	1	*
189	188	4	97	0	*
190	149	6	35	1	0
191	190	6	1485	0	0
192	191	6	600	1	0
193	192	6	520	0	0
194	149	6	129	1	0
195	194	6	2349	1	0
196	195	6	894	0	0
197	196	6	236	1	0
198	197	4	1269	0	*
199	198	4	200	0	*
200	149	6	100	1	0
201	200	6	896	0	0
202	201	6	1450	1	0
203	202	6	834	0	0
204	203	6	508	0	0
205	204	6	450	0	0
206	205	6	700	1	0
207	149	6	59	1	0
208	207	6	939	1	0
209	208	6	1070	1	0
210	209	6	30	0	0
211	209	6	50	0	0
212	149	4	70	1	*
213	212	4	520	1	*
214	213	4	505	1	*
215	214	4	100	0	*
216	215	6	180	0	0
217	216	4	766	1	*
218	217	4	810	1	*
219	217	4	33	0	*
220	218	3	910	0	*
221	218	3	590	0	*
222	218	1	1380	0	*
223	220	3	697	0	*
224	149	6	71	1	0
225	224	6	451	0	0
226	225	6	2200	1	0
227	226	6	1000	1	0
228	227	6	30	0	0
229	227	6	970	1	0
230	229	6	554	0	0
231	230	6	223	0	0
232	149	6	55	1	0
233	232	6	895	1	0
234	233	6	43	0	0
235	233	6	3040	0	0
236	235	6	1070	0	0
237	236	6	247	0	0

* - possibilidade de recondução

** - tipos de ligações: 0-trecho sem chave 1-trecho c/ chave NF 2-trecho c/ chave NA

Tabela A.7 (3/3) – Dados de Ligações do Caso Teste da Fig. 5.17

Nós Terminais		Cabo	Comprim. (m)	Tipo	Custo Fixo
239	238	5	74	1	*
240	239	5	274	1	*
241	240	5	172	0	*
242	241	5	441	1	*
243	241	4	380	1	*
244	242	5	370	1	*
245	243	4	520	0	*
246	244	5	850	0	*
247	245	4	2130	0	*
248	245	4	1750	1	*
249	246	5	539	1	*
250	248	1	2170	1	*
251	249	4	1230	0	*
252	250	1	750	0	*
253	238	5	15	1	*
254	253	5	1165	1	*
255	254	4	280	0	*
256	255	4	270	1	*
257	256	4	636	1	*
258	257	4	100	1	*
259	257	4	560	1	*
260	258	1	241	1	*
261	258	4	222	0	*
262	260	1	760	0	*
263	262	1	250	0	*
264	238	5	177	1	*
265	264	5	177	0	*
266	265	5	259	0	*
267	266	6	750	1	0
268	267	6	180	0	0
269	268	6	540	1	0
270	269	4	130	0	*
271	269	4	140	0	*
272	270	4	310	1	*
273	272	1	169	0	*
274	272	4	151	1	*
275	271	4	561	0	*
276	272	1	231	1	*
277	274	4	60	0	*
278	276	1	60	0	*
279	276	1	450	1	*
280	279	1	250	0	*
281	238	6	120	1	0
282	281	6	120	0	0
283	282	6	420	0	0
284	283	6	1794	1	0
285	284	6	370	0	0
286	284	6	650	1	0
287	286	4	300	1	0
288	286	6	370	0	0
289	287	4	174	1	0
290	289	6	200	0	0
291	289	1	439	1	*
292	291	1	400	0	*

Nós Terminais		Cabo	Comprim. (m)	Tipo	Custo Fixo
293	290	4	300	0	*
294	238	5	152	1	*
295	294	5	152	1	*
296	295	5	72	0	*
297	296	5	1140	1	*
298	297	5	1330	1	*
299	298	3	660	1	*
300	299	3	260	0	*
301	238	5	75	1	*
302	301	5	75	0	*
303	302	5	2230	1	*
304	303	5	1230	0	*
305	303	5	1170	1	*
306	305	5	1950	1	*
307	305	5	1200	0	*
308	306	5	130	0	*
309	238	5	29	1	*
310	309	5	29	0	*
311	310	5	451	1	*
312	311	5	570	1	*
313	312	1	530	0	*
314	312	5	380	1	*
315	314	5	240	1	*
316	315	4	211	1	*
317	316	4	329	0	*
318	317	4	150	0	*
319	317	4	220	1	*
320	319	4	459	1	*
321	320	4	100	1	*
322	320	4	130	1	*
323	321	4	50	0	*
324	322	4	200	0	*
325	322	4	82	0	*
102	326	6	2365	2	14730
119	326	6	2129	2	14258
134	326	6	3618	2	17236
147	326	6	3254	2	16508
159	326	6	3066	2	16132
171	326	6	2155	2	14310
181	326	6	3028	2	16056
189	326	6	1704	2	13408
199	326	6	3701	2	17402
222	326	6	741	2	11482
280	326	6	2849	2	15698
325	326	6	3099	2	16198
36	327	6	384	2	10768
56	327	6	1584	2	13168
73	327	6	2124	2	14248
83	327	6	4448	2	18896
93	327	6	5096	2	20192
252	327	6	3636	2	17272
21	328	6	2703	2	15406
230	328	6	1013	2	12026
247	328	6	2477	2	14954

* - possibilidade de recondução

** - tipos de ligações: 0-trecho sem chave 1-trecho c/ chave NF 2-trecho c/ chave NA