

SU PEI FEI

**PROPOSIÇÃO AUTOMÁTICA DE REFORÇOS EM
REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
UTILIZANDO PROGRAMAÇÃO LINEAR E
ALGORITMO GENÉTICO**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia.

São Paulo
2006

SU PEI FEI

Engenheiro Eletricista, EPUSP, 2003

**PROPOSIÇÃO AUTOMÁTICA DE REFORÇOS EM
REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
UTILIZANDO PROGRAMAÇÃO LINEAR E
ALGORITMO GENÉTICO**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia.

Área de concentração:
Engenharia Elétrica

Orientador:
Prof. Dr. Nelson Kagan

São Paulo

2006

*Aos meus familiares,
pelo apoio e incentivo.*

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Nelson Kagan, meu orientador, por sua excelência na orientação do trabalho, pelo seu apoio e pelas contribuições para a conclusão desta dissertação.

Aos Professores Hernán Schmidt e Carlos Tahan pelas contribuições prestadas na banca de qualificação que certamente enriqueceram esta dissertação.

Aos inúmeros colegas do Enerq e Daimon Engenharia e Sistemas que contribuíram em diversas etapas do trabalho, em especial, ao João Carlos Guaraldo, pelos valiosos ensinamentos em programação.

Por fim, agradeço a todos meus familiares que sempre me incentivaram a estudar desde o começo.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1 Motivação..... | 1 |
| 1.2 Objetivos | 3 |
| 1.3 Organização do documento..... | 4 |
| 2. ESTADO DA ARTE | 6 |
| 2.1 Caracterização do problema..... | 6 |
| 2.2 Revisão bibliográfica | 7 |
| 3. MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO PARA SOLUÇÃO DO PROBLEMA..... | 10 |
| 3.1 Introdução | 10 |
| 3.2 Programação linear..... | 13 |
| 3.2.1 Algoritmo de out-of-kilter..... | 13 |
| 3.2.1.1 Descrição do algoritmo | 15 |
| 3.3 Método das K-médias (<i>cluster analysis</i>)..... | 17 |
| 3.4 Algoritmos Genéticos | 20 |
| 3.4.1 Introdução | 20 |
| 3.4.2 Estrutura do Algoritmo Básico..... | 21 |
| 3.4.3 Estabelecimento da População Inicial..... | 23 |
| 3.4.4 Avaliação da População | 25 |
| 3.4.5 Reprodução da População | 25 |
| 3.4.6 Cruzamento e Mutação | 27 |
| 4. MODELAGEM DO PPD COM PROPOSIÇÃO AUTOMÁTICA DE REFORÇOS | 29 |
| 4.1 Introdução | 29 |
| 4.2 Locação de subestações e novos alimentadores..... | 31 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 4.3 | Modelagem de Rede Elétricas de Distribuição Primária Por AG..... | 35 |
| 4.3.1 | Codificação | 36 |
| 4.3.2 | Função de Avaliação | 38 |
| 4.3.3 | Consideração das Restrições do Problema..... | 39 |
| 4.3.4 | Recondutoramento e Expansão de SEs | 41 |
| 5. | EXEMPLOS DE APLICAÇÕES | 43 |
| 5.1 | Considerações Iniciais..... | 43 |
| 5.2 | Caso Teste 1 | 43 |
| 5.3 | Caso Teste 2 | 49 |
| 5.4 | Caso Teste 3 | 53 |
| 5.5 | Caso Teste 4 | 59 |
| 6. | CONCLUSÕES | 64 |
| 6.1 | Considerações Finais..... | 64 |
| 6.2 | Pesquisas Para Ulterior Desenvolvimento | 65 |
| 7. | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 67 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 3-1 Rede elétrica e rede de transporte equivalente | 14 |
| Figura 3-2 Fluxo no arco..... | 15 |
| Figura 3-3 Exemplo de um string | 21 |
| Figura 3-4 Diagrama de Blocos de um AG básico [7]..... | 23 |
| Figura 3-5 Distribuição uniforme | 24 |
| Figura 3-6 Seleção de indivíduos pelo método da roleta | 26 |
| Figura 3-7- Operador cruzamento..... | 27 |
| Figura 4-1- Rede de transporte para determinação de áreas carentes | 33 |
| Figura 4-2- Procedimento de Proposição Automática de SEs | 35 |
| Figura 4-3- Diagrama de blocos do método de classificação | 36 |
| Figura 4-4 – Rede com divisão em blocos | 37 |
| Figura 5-1- Topologia da Rede 1 do caso teste..... | 44 |
| Figura 5-2- Identificação dos pontos de reforço da rede-1 e SE proposta | 45 |
| Figura 5-3- Diagnóstico da rede (sem reforços instalados) | 47 |
| Figura 5-4- Otimização da rede-1 por AG | 48 |
| Figura 5-5- Avaliação dos indivíduos, a cada geração, na otimização da rede-1 | 49 |
| Figura 5-6- Resultados de alocação de duas SEs para a rede | 51 |
| Figura 5-7- Reconfiguração da rede com proposição automática de duas novas SEs | 52 |
| Figura 5-8- Avaliação dos indivíduos, a cada geração, na otimização da rede com duas SEs propostas..... | 52 |
| Figura 5-9- Diagnóstico da rede-2 pelo fluxo de potência..... | 54 |
| Figura 5-10- Rede-2 com duas SE's propostas automaticamente..... | 56 |
| Figura 5-11- Otimização da rede-2 pelo AG..... | 57 |

| | |
|--|----|
| Figura 5-12-Evolução da avaliação dos indivíduos da rede-2 | 57 |
| Figura 5-134-Diagnóstico da rede-2 após instalação da SE nova..... | 58 |
| Figura 5-14- Classificação dos reforços da rede-3..... | 60 |
| Figura 5-15-Obras propostas pelo AG na rede-3 | 62 |
| Figura 5-16-Visualização de fluxo na rede-3 reconfigurada por AG | 63 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 4.1- Codificação utilizada | 37 |
| Tabela 5.1-Dados da Rede | 45 |
| Tabela 5.2- Parâmetros utilizados no AG | 48 |
| Tabela 5.3-Notas de avaliação do AG e custo final para rede-1 alocada com uma SE | 49 |
| Tabela 5.4-Ensaio realizados para alocação de duas SE's para rede..... | 50 |
| Tabela 5.5 Notas de avaliação do AG e custo final para rede com proposição de 2 SEs | 53 |
| Tabela 5.6-Dados da Rede | 53 |
| Tabela 5.7- Ensaio de alocação de duas SE's | 54 |
| Tabela 5.8-Ensaio de alocação de três SE's..... | 55 |
| Tabela 5.9-Obras realizados na rede-2..... | 56 |
| Tabela 5.10-Quadro resumo das obras realizadas..... | 58 |
| Tabela 5.11 Notas de avaliação do AG e custo final para rede-2 com duas SE's propostas | 58 |
| Tabela 5.12-Características da rede-3 | 59 |
| Tabela 5.13-Ensaio realizados com proposição de duas SE's para rede-3..... | 59 |

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo apresentar uma metodologia para localização e proposição de reforços no sistema de distribuição de energia elétrica através de programação linear, PL, e algoritmo genético, AG.

A técnica de PL utilizada para a localização de pontos de reforços e, principalmente, novas subestações de distribuição, é baseada no algoritmo de “*out-of-kilter*”, um conhecido algoritmo de transporte.

A seleção de melhores alternativas é solucionada através do AG, que permite a modelagem de redes com proporções reais e possibilita a obtenção de resultados em tempos de execução compatíveis para aplicação de atividades em planejamento de sistemas de distribuição de energia. O modelo de algoritmo proposto aloca automaticamente novos reforços, como o recondutoramento de trechos da rede e a expansão de subestações existentes, complementando os reforços candidatos, novas subestações e novos alimentadores, propostos previamente pelo modelo de PL.

A metodologia proposta é aplicada à resolução de uma rede de distribuição real, possibilitando a análise da potencialidade que esta modelagem pode oferecer.

ABSTRACT

This dissertation presents a methodology for the allocation and proposal of new reinforcements in electric distribution systems through linear programming (LP) and genetic algorithm (GA).

The linear programming technique used for the allocation of new reinforcements, namely new distribution substation locations, is based on the “out-of-kilter” algorithm, a well known transport algorithm.

The selection of alternatives, determined by technical and economical criteria, is carried out through a genetic algorithm that allows the modeling of real sized distribution networks and makes possible the attainment of results in compatible execution times for distribution network planning.

The proposed model places new reinforcements automatically, as it is the case of cable resizing in distribution lines and the expansion of existing substations, complementing the new substations and new feeders proposed by the linear programming model.

The proposed methodology is applied to the solution of a real distribution network, showing the potential applications of the models.

1. INTRODUÇÃO

O presente capítulo descreve a motivação e objetivos principais do trabalho desenvolvido, apresentando as linhas gerais e a forma de organização deste documento.

1.1 Motivação

O setor elétrico brasileiro (SEB) passa por uma fase de reestruturação com a implantação de um novo modelo instituído pelo governo federal. Neste novo modelo de administração do SEB, foi criada a Agência Nacional de Energia Elétrica, a ANEEL, que tem como objetivos principais regular e fiscalizar a geração, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica, garantir tarifas justas, zelar pela qualidade dos serviços e estimular a competição, nos segmentos de geração e distribuição.

Com a atual situação do SEB, principalmente face às privatizações, as concessionárias de distribuição de energia buscam otimizar seus investimentos para obterem ganhos de forma a recuperar o seu capital investido e melhorar a qualidade de seus serviços de fornecimento de energia para um padrão aceitável dentro dos limites estabelecidos pelo órgão regulador (ANEEL).

O setor de planejamento nas empresas concessionárias de distribuição de energia elétrica é o responsável pela elaboração do plano de obras, cálculo dos custos marginais, montantes de investimento a médio e longo prazo, expansão do sistema

elétrico, levando em conta as perspectivas do mercado consumidor e também os critérios econômicos, tais como taxas de juros, índices de inflação e taxa de recuperação do capital.

O planejamento de redes de distribuição é realizado nos níveis de alta, média e baixa tensão, para atendimento ao crescimento da demanda. Tem por funções avaliar novos pontos de suprimento, a configuração topológica das redes de subtransmissão, distribuição primária e secundária, os tipos de redes, aéreas ou subterrâneas. Além disso, deve considerar a incorporação de novas fontes de geração em centros de carga e outras formas alternativas de atendimento de grandes consumidores, otimizando o uso racional e conservação da energia que permitem estabelecer os níveis investimentos necessários para atender os consumidores dentro dos limites de níveis de continuidade e qualidade de serviço, conforme estabelecidos pela ANEEL.

Tradicionalmente, os estudos de planejamento são definidos em três categorias, conforme os horizontes de estudo considerados, sejam eles de curto, médio e longo prazo.

O planejamento de curto prazo conhecido também como planejamento operacional, apresenta obras que serão feitas em um futuro próximo, em geral dias ou semanas, sendo a reconfiguração de redes (manutenção e perdas) e o suporte reativo (locação de capacitores) exemplos típicos desta classe.

O planejamento de longo prazo, em geral de horizonte de estudo de dez a quinze anos, conhecido também como planejamento estratégico, tem por características não há amarração física com o sistema estudado, mas sim o tratamento do sistema existente por grupos ou famílias de redes, com características ou atributos semelhantes. Tem por objetivo, a partir do crescimento da demanda no período considerado, determinar os níveis de qualidade em função de diferentes níveis de investimento. Possibilita também a obtenção de um plano geral de obras, para ser utilizado como referência para o planejamento de médio prazo.

O planejamento de médio prazo, com horizonte de estudo em geral de cinco anos, conhecido também como planejamento tático, determina um plano de obras para um certo número de obras candidatas, dentre elas as apontadas pelos estudos de longo prazo. Neste caso, o objetivo é especificar mais claramente os reforços necessários, o instante em que deverão entrar em operação, bem como a alocação física destes na área atendida pelo sistema estudado. Dentro desta classe de obras, podemos citar a expansão da capacidade de subestações, instalação de novos alimentadores, locação e instalação de novas subestações, recondutoramento de trechos da rede, etc.

Neste contexto, torna-se essencial aos planejadores avaliarem as alternativas de expansão do sistema e os reforços candidatos e determinar as melhores obras, levando em conta os critérios técnicos de atendimento à demanda considerando restrições de carregamento admissível e níveis de tensão, bem como critérios econômicos como custos de investimento e das perdas em demanda e em energia, bem como outros critérios, de qualidade de serviço, impactos ambientais e aspectos sócio-políticos.

1.2 Objetivos

Este trabalho apresenta uma metodologia para identificar os pontos que, em função do crescimento da carga, necessitam de reforços durante o horizonte de estudo de planejamento. A modelagem se utiliza de programação linear (PL), em particular um algoritmo de transporte, de alto desempenho computacional. A identificação dos pontos candidatos fornece as áreas carentes de reforços, ou seja, aquelas áreas nas quais é necessária a concentração de novas obras de planejamento. Assim, é possível propor automaticamente obras que atendem a demanda crescente dos consumidores com níveis de qualidade adequados respeitando os critérios técnicos estabelecidos pelos órgãos reguladores.

Uma vez propostas alternativas candidatas para a expansão da rede, a seleção das melhores alternativas é solucionada por um algoritmo genético (AG), que tem se mostrado bastante eficiente na solução de problemas da engenharia e possibilita a

modelagem de restrições do problema (carregamento máximo de equipamentos, níveis de tensão e radialidade) e da função objetivo, que é inerentemente uma função não-linear das variáveis de fluxo de potência e de variáveis de decisão (instalação ou não de novos reforços).

Desta maneira, destacam-se os principais objetivos deste trabalho:

- Descrição sucinta dos métodos de otimização empregados neste trabalho, PL (algoritmo de *out-of-kilter*), *cluster analysis* (método das k-médias) e AG;
- Descrição da modelagem proposta para localização de áreas carentes de reforços no sistema de distribuição de média tensão utilizando PL;
- Descrição da metodologia de localização de novas subestações, através do método das k-médias (*cluster analysis*), de forma que as novas subestações propostas se posicionem nos centros de carga de áreas carentes de reforços;
- Descrição da etapa de otimização da expansão da rede, com o algoritmo genético na seleção de melhores alternativas;
- Aplicação da ferramenta desenvolvida em redes de distribuição com dimensões reais e análise de resultados.

1.3 Organização do documento

O capítulo 2 apresenta as considerações sobre o problema do planejamento de distribuição (PPD) e a revisão da literatura da otimização de subestações e alimentadores.

O capítulo 3 descreve os métodos de otimização de PL, em especial o algoritmo de transporte, a metodologia de classificação por *cluster analysis* pelo método de *k-médias* e o AG composto por operadores de representação, avaliação, mutação, recombinação e seleção num algoritmo básico.

O capítulo 4 descreve a modelagem proposta, inicialmente a localização de pontos reforço no sistema usando PL, no qual são estabelecidas as barras da rede que devem ter algum tipo de injeção de potência de forma que os critérios técnicos de carregamento e balanço da demanda em todos os pontos da rede sejam atendidos.

Alternativas de novas subestações são estabelecidas através de uma metodologia de classificação, através do método das k-médias de forma que as novas subestações propostas se posicionem nos centros de carga de áreas carentes de reforços. Na etapa de otimização da rede, desenvolve-se um AG, que permite a determinação da melhor configuração da rede, considerando as subestações propostas, ampliação das subestações existentes, recondutoramento automático de alimentadores, novos alimentadores ou trechos de rede, bem como a reconfiguração da rede através de alteração do estado das chaves normalmente fechadas e normalmente abertas presentes na rede.

No capítulo 5, apresenta-se a aplicação da metodologia proposta no capítulo 4 a uma rede de distribuição e os resultados obtidos.

Finalmente, o capítulo 6 descreve as conclusões gerais do trabalho, resumindo os principais resultados obtidos com o emprego da metodologia proposta e descreve possíveis pesquisas para ulterior desenvolvimento.

2. ESTADO DA ARTE

2.1 Caracterização do problema

O planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica é um problema complexo que envolve muitos fatores nos estudos. A determinação de um planejamento ótimo dentre as várias alternativas torna-se muito difícil para o planejador. Especialmente nos problemas de locação de novas subestações de distribuição, quando se deseja determinar a quantidade e capacidade de novas subestações e quando estas devem entrar em operação.

Diversas pesquisas e técnicas de programação matemática [1]-[9] foram desenvolvidas neste contexto e contribuíram para o estudo de problema de planejamento de distribuição.

A grande maioria dos trabalhos desenvolvidos [10]–[12] parte de um conjunto de reforços candidatos, que é geralmente proposto pelo usuário, a partir de diversas informações, como o diagnóstico técnico da rede de distribuição existente com o crescimento da carga no horizonte e informações específicas da região (por exemplo: locais possíveis para novas subestações). No entanto, nota-se que a definição deste conjunto dificilmente é de forma automática. Este trabalho vem contribuir para que sejam estabelecidos modelos que permitam ao menos um suporte ao planejador nesta etapa de análise do diagnóstico e proposição de reforços candidatos a serem utilizados como entrada para os métodos de otimização.

2.2 Revisão bibliográfica

A modelagem do problema de planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica acompanhou diretamente o desenvolvimento da área de programação matemática.

Os modelos baseados em PL não permitiam a otimização dos custos fixos, que possibilitam a representação correta dos custos de investimento em reforços do sistema. Com o surgimento da programação linear inteira mista (PLIM) [3], foi possível representar tanto os custos fixos como os custos variáveis, desde que os custos variáveis fossem representados através de funções lineares das variáveis do problema, como exemplo o caso das perdas elétricas num trecho de rede que é uma função quadrática da corrente passante.

Os modelos iniciais levaram em consideração basicamente a 1ª de Kirchhoff na representação das restrições relativas a critérios técnicos, que atende a condição de balanço de demanda, sendo possível também a incorporação da restrição de limites máximos de carregamento dos elementos da rede. Posteriormente, foram desenvolvidas restrições que representam a 2ª de Kirchhoff e dessa forma foi possível impor as restrições de níveis de tensão do sistema.

Os modelos baseados em PLIM permitiram abordar a dinâmica do problema de planejamento que considera o período de planejamento subdividido em múltiplos estágios, porém há um problema nas formulações em PLIM que é o aumento das variáveis proporcional ao número de estágios. Para considerar o aspecto temporal, foi proposta abordagem pseudo-dinâmica [13] do problema, na qual pode-se analisar uma seqüência de problemas com um único estágio.

A consideração de múltiplos objetivos e incertezas nos modelos foi considerada através de extensões de técnicas de otimização, como tomada de decisão com múltiplos objetivos [14], programação matemática probalística [15] e programação

matemática fuzzy [14]. Apesar da formulação do problema por PLIM mostrar-se bastante completa, as soluções do problema por técnicas de otimização convencionais (PL pelo método SIMPLEX, PLIM pelo método *branch-and-bound*, etc.) não conseguiram acompanhar de forma adequada o elevado número de variáveis, principalmente as variáveis de decisão (variáveis inteiras, no caso de PLIM).

Algoritmos evolucionários, em particular os algoritmos evolutivos vem tendo aplicações com sucesso nas áreas de engenharia e na área de sistemas elétricos de potência. Um recente trabalho [16] mostrou resultados muito promissores de sua aplicação. Já em relação aos algoritmos genéticos (AGs), muitas aplicações vem sendo desenvolvidas com sucesso [7, 17] e mostraram grandes vantagens em aplicações nos problemas de planejamento de sistemas de distribuição.

Os problemas de planejamento de médio prazo de sistemas de distribuição podem ser classificados nos subproblemas de otimização de alimentadores e de subestações de distribuição. Apesar de serem tratados separados nos trabalhos iniciais [14], os modelos atuais consideram estes dois subproblemas conjuntamente, dado que existe uma forte relação entre as duas soluções. Na referência [18], o relacionamento entre os dois sub-problemas é claramente demonstrado na metodologia proposta. Inicialmente é feita a definição do ponto de localização da subestação (SE), os alimentadores são traçados baseado num algoritmo de caminho mínimo para atendimento das cargas. Então, um novo problema de otimização da locação da SE é resolvido, através de técnica de busca heurística, tendo como função objetivo a minimização das perdas. Um sistema especialista também é utilizado para avaliar a possibilidade de instalação da SE no local assim como os custos e fatores geográficos e o traçado dos trechos entre pontos de carga. Realizada a localização da SE, repete-se a otimização dos alimentadores até que a perda do sistema seja mínima e as restrições do problema sejam atendidas. Neste trabalho não foi abordado a possibilidade de trabalhar com redes de dimensões reais e, pela modelagem proposta, apenas uma SE é alocada automaticamente entre os pontos de carga existentes no sistema.

Um artigo mais recente [19] apresenta uma metodologia de locação de subestações utilizando conjuntos *fuzzy* na representação de incertezas de carga e AG na solução do problema. Neste trabalho, pode-se destacar a modelagem por AG, que permite considerar diversos aspectos do problema, como níveis de tensão na SE, perdas nos alimentadores, incerteza de demanda das cargas usando números *fuzzy*, radialização do sistema e o carregamento dos transformadores com números *fuzzy*. Neste trabalho, uma abordagem pseudo-dinâmica é utilizada, e o AG mostra resultados satisfatórios, como rapidez na solução. Porém, deve-se ressaltar que as subestações alocadas são dentre daqueles previamente propostas.

Na referência [20], Dai et al (1995) desenvolveram um algoritmo de locação de subestações usando técnicas de PL e de busca heurística na solução do problema, tendo como função objetivo a minimização do custo de perdas e de investimento. Uma nova abordagem é acrescentada neste trabalho que é a locação de mais de uma SE e sua capacidade em uma lista cadastrada previamente com os custos envolvidos. A metodologia foi utilizada em sistemas reais de grande porte no planejamento urbano e tem mostrado bastante eficiência. Um dado relevante a ser observado é a divisão do sistema em quadriculas com densidade de carga e magnitude da carga concentrada no centro.

Com o avanço de sistemas de informação, muitas empresas adotaram o Sistema de Informação Geográfica (GIS), tendo em vista as vantagens gráficas oferecidas por este sistema. Surgiram desde então novos trabalhos que incorporam as informações geográficas da topologia da rede. Em [21], Zhou et al. (2002) propõem um novo modelo que incorpora a metodologia proposta juntamente com as informações geográficas da rede e dados de previsão de carga do sistema, permitindo desta maneira uma abordagem multi-estágios.

3. MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO PARA SOLUÇÃO DO PROBLEMA

3.1 Introdução

As técnicas utilizadas para o tratamento dos problemas de planejamento da distribuição podem ser classificadas em três grupos de acordo com a referência [22]:

- 1) técnicas baseadas na utilização de métodos de otimização clássicos;
- 2) modelos híbridos, que utilizam métodos de otimização em conjunto com métodos heurísticos;
- 3) técnicas que utilizam conceitos ou ferramentas da área de Sistemas Inteligentes.

Os métodos de otimização baseiam-se na utilização de técnicas de programação matemática, que têm por escopo a otimização de alguma função objetivo sujeita a um conjunto de restrições. Em [22] podem ser encontradas as seguintes definições:

- programação linear (PL): tem por objetivo a maximização ou minimização de uma função linear sujeita a restrições representadas por equações e inequações lineares;
- programação inteira (PI): utilizada em problemas de otimização nos quais todas as variáveis são inteiras. Um problema de programação linear em que todas as variáveis são inteiras, é também chamado de problema de programação linear inteira ou de programação linear inteira pura;

- programação linear inteira mista (PLIM): utilizada em problemas de programação linear em que parte das variáveis são inteiras e parte são contínuas;
- programação não linear (PNL): tem por objetivo a maximização ou minimização de uma função não-linear, sujeita a restrições lineares ou não lineares;
- algoritmos de transporte (AT): algoritmos de programação linear específicos para o tratamento de problemas de fluxo em redes;
- programação dinâmica (PD): tem por objetivo o tratamento de problemas de otimização com múltiplos estágios.

Muitos dos modelos desenvolvidos para o tratamento de problemas de sistemas de potência utilizam uma ou mais destas técnicas. Outros, entretanto, utilizam uma combinação destes algoritmos com regras ou procedimentos heurísticos, com duas finalidades básicas:

- 1) reduzir o esforço computacional, em termos de tempo de processamento;
- 2) possibilitar a consideração de alguns aspectos difíceis de serem incorporados nos modelos de otimização.

Heurística pode ser definida como uma técnica que, baseada em informações específicas do domínio de um problema, permite melhorar a eficiência de um processo de busca.

A utilização adequada de heurísticas em conjunto com técnicas de otimização possibilita a manutenção de um certo grau de precisão na solução de um problema, enquanto assegura convergência e tempos de processamento aceitáveis.

O uso de regras ou procedimentos heurísticos pode apresentar vantagens e desvantagens quando se faz uma comparação com os métodos de otimização puros. A utilização de heurísticas adequadas ao problema possibilita que o espaço de busca de soluções seja convenientemente reduzido, permitindo assim que vários aspectos

do problema sejam modelados simultaneamente, sem que o esforço computacional seja proibitivo. Além disso, pode-se incorporar aspectos que são de difícil modelagem (ou mesmo que não podem ser modelados) quando se utilizam somente algoritmos de programação matemática.

Por outro lado, a utilização de heurísticas deve ser criteriosa, pois, com a sua utilização, geralmente não se pode mais garantir que a solução “ótima” seja encontrada e, o que é mais grave, a utilização de heurísticas inadequadas pode levar a soluções errôneas ou mesmo impossibilitar a resolução do problema.

A aplicação prática de técnicas de Sistemas Inteligentes (SI) na área de sistemas de potência vem crescendo consideravelmente nos últimos anos. Algumas técnicas têm sido bastante utilizadas:

- sistemas especialistas: são sistemas dedicados baseados em regras, com uma arquitetura composta por uma base de dados, uma base de conhecimento e um mecanismo de inferência. Baseiam-se na aquisição de conhecimento de especialistas no assunto. A idéia central é de que o sistema seja capaz de fazer conclusões similares às dos especialistas, utilizando as informações deles obtidas e transformadas em conjuntos de regras (geralmente do tipo *if-then-else*);
- métodos de busca heurística: são técnicas utilizadas para direcionar o processo de busca em problemas combinatórios.
- algoritmos genéticos (AGs): trata-se de uma técnica que se baseia nos princípios evolucionários de seleção natural de Darwin. O AG será detalhado no item 3.4 deste capítulo.
- recozimento simulado (*simulated annealing*): é uma estratégia de busca baseada numa analogia entre a minimização de uma função objetivo (por ex. minimização do custo) e a obtenção de um estado de mínima energia em

sistemas físicos. Recozimento (*annealing*) é um processo metalúrgico pelo qual um material, a partir de sua temperatura de fusão (alto nível de energia), é lentamente resfriado até que seja obtida uma configuração cristalina estável. O objetivo desse processo é o de produzir um estado final de mínima energia;

3.2 Programação linear

A técnica de programação linear foi criada por Dantzig durante a Segunda Guerra Mundial). Nesta mesma época foi desenvolvido o método SIMPLEX, tornando-se cada vez mais popular desde então. A partir dos anos 60, a PL já começa a ser utilizada na área de sistemas de sistemas de potência.

Na década de 70, Crawford e Holt (1975) [10] apresentaram as bases da técnica de programação para solução do PPD, utilizando o algoritmo apresentado por Ford-Fulkerson (1956), aqui denominado de "Algoritmo de Transporte de Ford-Fulkerson" [1].

Os problemas de transporte podem ser vistos como casos específicos de programação linear. Além disso, a modelagem do algoritmo de transporte se adapta muito bem ao planejamento da expansão da distribuição de energia elétrica. A própria formulação do problema de transporte já deixa transparecer essa analogia: alocação de unidades partindo de certo número de pontos de origem para certo número de destinos, de tal modo que se obtenha um custo mínimo ou um lucro máximo.

3.2.1 Algoritmo de out-of-kilter

Em [2], Galvão (1985) usou um algoritmo conhecido como *out-of-kilter* para resolver um problema de planejamento na transmissão de energia elétrica. Este algoritmo foi apresentado por Fulkerson (1961) [23], e se destacou por consumir menos memória computacional, além de permitir a introdução de algumas restrições convenientes ao tratamento das redes elétricas, não consideradas nos outros métodos.

O algoritmo conhecido por “out-of-kilter” (Ford-Fulkerson) tem por objetivo determinar a distribuição de fluxo em uma rede de transporte que resulte no mínimo custo, respeitando as restrições de capacidade máxima dos elementos da rede e da conservação do fluxo (1ª Lei de Kirchoff). Para a utilização do algoritmo em uma rede elétrica, esta deve ser representada por uma rede equivalente de transporte, na qual todos os elementos da rede são representados através de nós e arcos direcionais, conforme ilustrado na Figura 3.1. Os nós de carga e de geração são representados por arcos que os ligam a um nó artificial da rede (nó de referência).

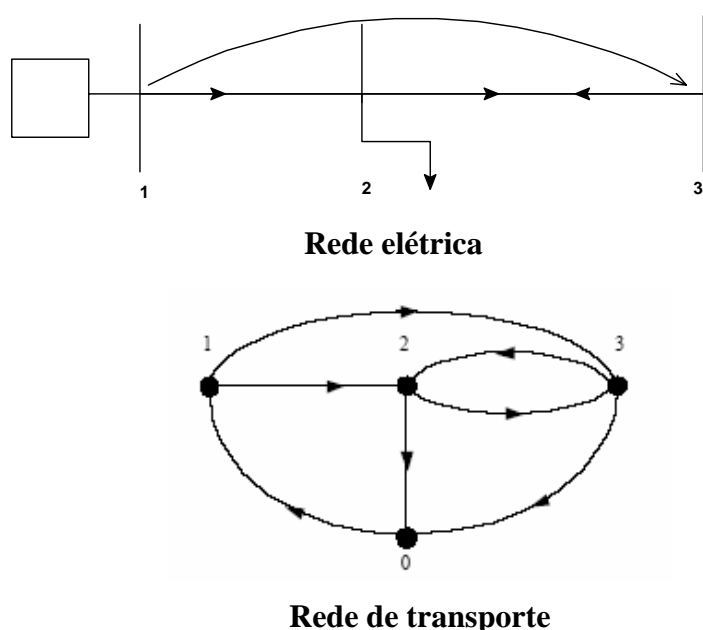


Figura 3-1 Rede elétrica e rede de transporte equivalente

Na Figura 3.1, as setas indicam os possíveis sentidos de fluxo em cada trecho de rede. Na rede de transporte, os arcos são direcionais, indicando o sentido do fluxo. Desta forma, um trecho da rede elétrica que possui um único sentido possível de fluxo (caso dos trechos 1-2 e 1-3) é representado por um único arco na rede de transporte (arcos 1-2 e 1-3, respectivamente). Por outro lado, um trecho no qual o fluxo pode ser nos dois sentidos (caso do trecho 2-3) é representado por dois arcos na rede de transporte (arcos 2-3 e 3-2). As barras de carga são representadas por um

arco direcionado para o nó de referência (arcos 2-0 e 3-0), e a barra de geração por um arco do nó de referência para a barra (arco 0-1).

O problema básico a ser resolvido pelos algoritmos de transporte de custo mínimo é dado por:

$$\begin{aligned}
 & \min \sum_{k=1}^{n_{arcs}} c_k X_k \\
 & s.t. \sum_{k \in \Omega_i^+} X_k - \sum_{k \in \Omega_i^-} X_k = 0 \quad i = 1, \dots, n_{nodes} \quad (3.1) \\
 & 0 \leq L_k \leq X_k \\
 & X_k \leq U_k \quad k = 1, \dots, n_{arcs}
 \end{aligned}$$

onde n_{arcs} e n_{nodes} representam, respectivamente, o número de arcos e o número de nós da rede de transporte.

3.2.1.1 Descrição do algoritmo

Para cada arco (ij) da rede de transporte, são estabelecidos quatro valores, conforme ilustrado na Figura 3.2.



Figura 3-2 Fluxo no arco

- L_{ij} : fluxo mínimo no arco
- U_{ij} : fluxo máximo no arco
- c_{ij} : custo por unidade de fluxo no arco
- f_{ij} : fluxo no arco

O princípio básico do algoritmo é o estabelecimento de caminhos fechados, através dos arcos da rede de transporte, com a utilização de um procedimento de rotulação dos nós da rede, de forma a se estabelecer os valores de fluxo nos arcos que

minimizem o custo total de transporte. Para cada arco (i-j) da rede, define-se as variáveis:

\bar{c}_{ij} : custo unitário de transporte modificado;

c_{ij} : custo unitário de transporte;

π_i : potencial do nó i , ou “custo unitário de aquisição pelo nó i ”;

π_j : potencial do nó j , ou “custo unitário de venda pelo nó j ”.

$$\bar{c}_{ij} = c_{ij} + \pi_i - \pi_j$$

$\bar{c}_{ij} < 0$: transporte pelo arco representa um ganho ;

$\bar{c}_{ij} = 0$: transporte pelo arco é indiferente;

$\bar{c}_{ij} > 0$: transporte pelo arco representa uma perda ;

π_i : “custo unitário de aquisição” pelo nó i ;

π_j : “custo unitário de venda” pelo nó j .

Procedimentos:

1. Definem-se valores iniciais para os fluxos nos arcos e potenciais dos nós (geralmente zero).
2. Procura-se um arco “out-of-kilter” e alteram-se os fluxos e/ou potenciais de modo a levá-lo à situação “in-kilter”
3. Busca-se outro arco “out-of-kilter” e repete-se os procedimentos anteriores.

Para alterar fluxo entre nós s e t :

Utiliza-se o Algoritmo Rotulador [1, 22], que procura um caminho na rede, de i até j , através do qual o fluxo possa ser aumentado, sem que qualquer arco tenha sua condição piorada. Se for encontrado um caminho, aumenta-se o fluxo nos arcos correspondentes. Caso contrário, os potenciais dos nós devem ser alterados. A alteração dos potenciais dos nós utiliza os seguintes conjuntos:

A : conjunto dos nós rotulados;

\bar{A} : conjunto dos nós não rotulados;

B : conjunto de arcos (i,j) com $i \in A, j \in \bar{A}, \bar{c} > 0, f_{ij} \leq U$;

\bar{B} : conjunto de arcos (i,j) com $i \in \bar{A}, j \in A, \bar{c} < 0, f_{ij} \geq L$.

Quando não é possível encontrar um caminho fechado na rede, deve-se aumentar o potencial de todos os nós não rotulados (nós pertencentes ao conjunto \bar{A}) do valor:

$$\xi = \min(\xi_1, \xi_2)$$

em que :

$$\xi_1 = \min |\bar{c}| \quad \text{se } B \neq \phi \quad ; \text{senão } \xi_1 = \infty;$$

$$\xi_2 = \min |-\bar{c}| \quad \text{se } \bar{B} \neq \phi \quad ; \text{senão } \xi_2 = \infty.$$

3.3 Método das K-médias (*cluster analysis*)

Segundo Hair (1998), a análise de *cluster*, também conhecida como análise de conglomerados, é um conjunto de técnicas estatísticas cujo objetivo é agrupar objetos segundo suas características, formando grupos ou conglomerados homogêneos. Os objetos em cada conglomerado tendem a ser semelhantes entre si, porém diferentes dos demais objetos dos outros conglomerados. Os conglomerados obtidos devem apresentar tanto uma homogeneidade interna (dentro de cada conglomerado), como uma grande heterogeneidade externa (entre conglomerados). Portanto, se a aglomeração for bem sucedida, quando representados em um gráfico, os objetos dentro dos conglomerados estarão muito próximos, e os conglomerados distintos estarão afastados.

A análise de *cluster* é uma técnica do tipo de interdependência, pois não é possível determinar antecipadamente as variáveis dependentes e independentes. Ao contrário, examina relações de interdependência entre todo o conjunto de variáveis. Neste ponto, esta técnica é similar a análise fatorial, no entanto, a diferença é que, enquanto a análise de *cluster* trata os objetos, a análise fatorial se preocupa com as variáveis.

Segundo Malhotra (2001), a análise de cluster tem uma aplicação ampla na área de marketing para vários objetivos como segmentação de mercado, compreensão do comportamento do comprador, identificação das oportunidades de um novo produto, seleção de mercados de testes e redução de dados. Mais recentemente, esta técnica vem sendo aplicada em áreas de investimentos, economia e financeira. Alguns exemplos da aplicação da técnica na área de sistemas de potência se encontram na classificação de curvas típicas de carga [24]. Malhotra (2001) define as etapas para a aplicação da análise de *cluster*. Inicialmente, é necessário definir o problema de aglomeração e as variáveis a serem tratadas estatisticamente. Escolhe-se, então, uma medida de distância dos conglomerados. Em seguida, define-se o processo de aglomeração que dependerá das variáveis em estudo e do problema em foco. Neste ponto, a intuição do pesquisador deve ser utilizada para a escolha do melhor processo e definição do número de conglomerados na próxima etapa. Os conglomerados resultantes devem ser interpretados em termos das variáveis usadas para constituirlos e de outras variáveis adicionais importantes. Finalmente, o pesquisador precisa avaliar a validade do processo de aglomeração.

A formulação do problema consiste na definição das variáveis a serem aglomeradas. O conjunto de variáveis escolhidas deve descrever a semelhança entre os objetos de forma relevante para o problema de pesquisa. As variáveis podem ser escolhidas como base em pesquisas passadas e na teoria.

No trabalho específico desta dissertação, as variáveis utilizadas são:

x : abscissa da carga;

y : ordenada da carga;

p : potência da carga.

Como o objetivo da análise de *cluster* é agrupar objetos semelhantes, é necessária uma medida da distância entre os mesmos. Os objetos com menor distância entre si são mais semelhantes, logo são aglomerados em um mesmo conglomerado. Já os mais distantes participam de conglomerados distintos. Existem várias formas de

medir a distância entre os objetos, porém, a mais utilizada é a distância Euclidiana, a qual será utilizada neste estudo. A distância Euclidiana é a raiz quadrada da soma dos quadrados das diferenças de valores para cada variável. As distâncias Euclidianas referentes a este estudo são apresentadas abaixo:

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$$

onde :

d_{ij} : distância euclidiana entre os pontos i e j;

x_i : abscissa da carga i;

y_i : ordenada da carga i.

Segundo Malhotra (2001), existem dois tipos de processos de aglomeração, que podem ser hierárquicos e não-hierárquicos. A aglomeração hierárquica se caracteriza pelo estabelecimento de uma hierarquia ou estrutura em forma de árvore, podendo ser aglomerativos ou divisivos. A aglomeração não-hierárquica, também chamada de *K-means clustering*, ou método das K-médias será utilizado neste trabalho. Em [24], Meffe (2005) utiliza inicialmente o método de *K-means* para realizar o agrupamento das curvas típicas em vários ensaios e em seguida é realizado o método das nuvens dinâmicas para determinar as formas-fortes quebrando a dependência do sorteio inicial e logo em seguida utiliza-se o método de Ward para reagrupar as curvas obtendo resultados satisfatórios. O método de *K-means*, inicialmente, determina ou assume um centro de conglomerado e em seguida agrupa todos os objetos que estão a menos de um valor pré-estabelecido do centro. O centro de conglomerado é recalculado pelo centro de carga do conjunto, ou seja:

$$x = \frac{\sum_i^n x_i p_i}{\sum_i^n p_i}; \quad y = \frac{\sum_i^n y_i p_i}{\sum_i^n p_i}.$$

Nesta dissertação, o método *K-means* será utilizado para determinar o centro de carga dos conjuntos de pontos carentes de reforços.

3.4 Algoritmos Genéticos

3.4.1 Introdução

Neste item, apresenta-se breve introdução sobre AGs e a descrição de suas principais idéias e conceitos, bem como o funcionamento do algoritmo básico.

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 ponto ótimo de dada função mesmo quando esta apresenta características não lineares, múltiplos ótimos locais e descontinuidades. Assim, os AG's realizam uma busca que evita a convergência para ótimos locais.

A vantagem principal dos AGs em relação aos outros métodos de busca e de otimização refere-se à robustez do método, 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 utilizam a informação da função objetivo e não suas derivadas ou informações auxiliares;
- AGs utilizam regras de transição probabilísticas para busca no espaço de soluções e não regras determinísticas.

3.4.2 Estrutura do Algoritmo Básico

Neste item, apresenta-se uma descrição 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, 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 3.3, o *string* contém 6 *bits*.

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |

Figura 3-3 Exemplo de um *string*

Um *string* pode ser entendido, da genética, como um cromossomo que apresenta genes (ou *bits*) em diferentes *locus* (posições no *string*), representando diversas características de um indivíduo. O valor de cada gene, que corresponde à determinada característica, representa 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 chamada 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.

AGs trabalham com uma população de soluções alternativas, e não uma alternativa única. Isto significa que estabelecida uma regra de formação para um *string* e sua relação com o problema real (codificação), um AG trabalhará com diferentes combinações de *string*, ou indivíduos, que irão compor uma população.

Uma vez estabelecido o elemento básico de AGs, um *string*, e sua relação com o problema real, sua codificação, o mecanismo de um AG é relativamente simples. O problema básico reside na determinação do “melhor” indivíduo ou o “mais ajustado”.

Isto é feito medindo-se o valor de uma função de avaliação aplicada a cada indivíduo. Tal função deverá apresentar relação direta com a função objetivo. Ou seja, quanto maior for o valor de tal função mais ajustado estará aquele indivíduo em relação às características desejadas, neste caso, minimizar perdas. Daí também a designação da 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, o conjunto inicial de *strings*, é geralmente estabelecido de modo aleatório. Em seguida, as populações evoluem em gerações, basicamente por meio 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*.

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 (1859).

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, representará a solução do problema em questão. O algoritmo

genético é apresentado, de modo simplificado, no diagrama de blocos da Figura 3.4. Todos os passos deste diagrama serão descritos nos itens subseqüentes.

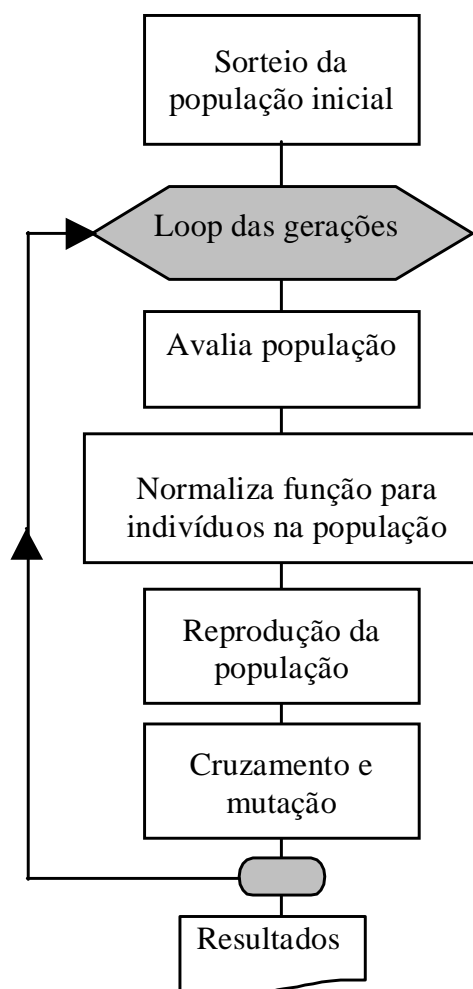


Figura 3-4 Diagrama de Blocos de um AG básico [7]

3.4.3 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 por meio do lançamento de uma moeda, dada que a probabilidade do resultado ser igual é de 50%.

A operação manual descrita 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 3.5, onde $p(x)$ representa a função densidade de probabilidade da variável aleatória x .

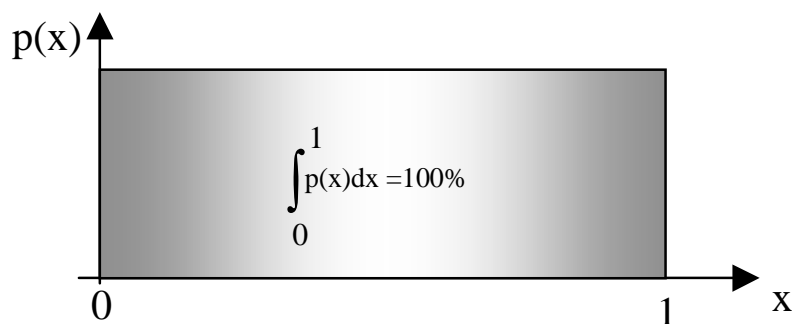


Figura 3-5 Distribuição uniforme

Desta forma, a geração da população inicial torna-se bastante simples, bastando utilizar para isso a função de geração de número aleatório, que será designada, de agora em diante, como função RAND. Assim, 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; se não, o valor do *bit* é feito igual a 1.

3.4.4 Avaliação da População

Conforme mencionado, é intuitivo pensar que quanto maior for a função de avaliação melhor ajustado estará um determinado indivíduo 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 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. Diferentes formas de mapeamento levarão a diferentes características de convergência e direcionamento da busca da solução ótima, ou seja, de desempenho do AG.

3.4.5 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 bem 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 AG's, consiste no indivíduo apresentar alto valor de função de avaliação, ou seja, estar o melhor ajustado possível com respeito às características desejadas.

Em AG's, este operador pode ser implementado de várias formas, mas aqui é escolhido o método baseado em seleção probabilística, também conhecida como roleta. 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 feito por meio de geração de número aleatório entre 0 e 1, isto é, por meio 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 impede dos AG's trabalharem com um número de indivíduos variáveis ao longo das gerações, mas, no algoritmo básico aqui descrito, o tamanho da população é mantido fixo.

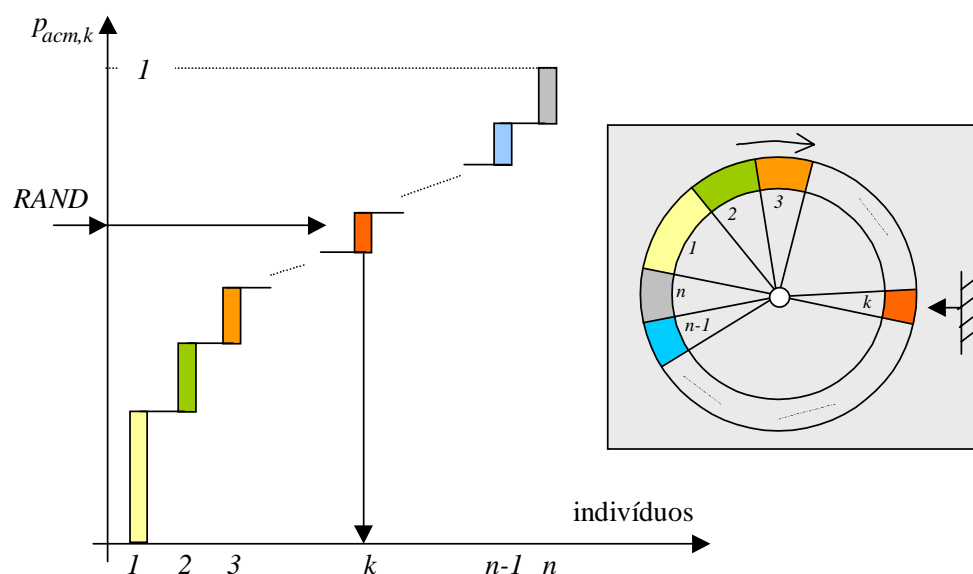


Figura 3-6 Seleção de indivíduos pelo método da roleta

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 equação:

$$P_{acm,k} = \frac{\sum_{j=1}^k f_{aval,j}}{\sum_{j=1}^n f_{aval,j}} \quad (3.2)$$

O procedimento acima garante que aqueles indivíduos mais bem 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 a determinação da solução ótima, o que é facilmente explicado pelo método de reprodução, que privilegia aqueles indivíduos mais bem ajustados. Este fato pode ocorrer principalmente no início do processo com populações pequenas, quando é comum ocorrerem poucos indivíduos muito avaliados e muitos indivíduos pouco ajustados.

3.4.6 Cruzamento e Mutação

Conforme o diagrama de blocos do AG básico na Figura 3.4, 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. Estes pares são escolhidos a partir dos indivíduos gerados pelo operador de reprodução. A partir do par de *strings*, em particular, dos indivíduos *i* e *j*, a operação de cruzamento pode ser realizada de várias formas. Mas, no algoritmo básico adotado, ela será realizada pelo procedimento descrito a seguir, conforme a Figura 3.7.

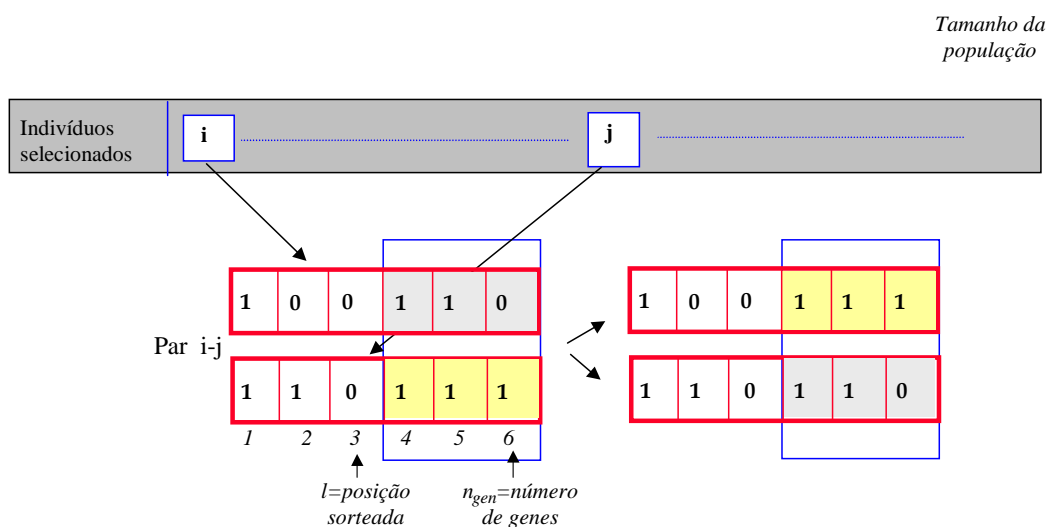


Figura 3-7- Operador cruzamento

Gera-se aleatoriamente um *locus* identificado 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} .

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 AG's, por meio de um valor de probabilidade fornecido a priori, denominado taxa de cruzamento. Ou seja, uma certa porcentagem dos indivíduos, na nova população, é simplesmente copiada, sem ocorrência de trocas de informações (material genético) entre elementos da população. Em geral, esta taxa é mantida entre 0,6 e 0,8, porém, tal valor pode ser pesquisado para cada problema específico.

Em AG's, 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. Sua implementação, em computador, é realizada pela função *RAND* analogamente à aplicação da probabilidade de cruzamento a um dado par de *strings*. Valores práticos desta taxa estão em torno de 0,001, ou seja, uma mutação a cada milhar de bits.

4. MODELAGEM DO PPD COM PROPOSIÇÃO AUTOMÁTICA DE REFORÇOS

4.1 Introdução

Este capítulo apresenta uma metodologia para estudos de planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica, considerando as redes de média tensão.

Um grande número de trabalhos tem considerado o planejamento e a análise de redes de distribuição [3,4,5,6,7,8,9]. Normalmente, nestes modelos, o planejador deve ter o trabalho de propor as obras necessárias para o atendimento aos critérios técnicos pré-estabelecidos. A partir da proposição destes reforços e, considerando o sistema existente com as cargas futuras advindas de estudos de mercado, algoritmos de otimização determinam as melhores alternativas de expansão do sistema. Assim sendo, a busca pela “ótima solução” fica restrita ao espaço de soluções gerado a partir do sistema existente e obras propostas pela intuição e conhecimento do planejador do sistema.

Desta forma, é importante, em estudos de planejamento, que sejam desenvolvidas ferramentas de suporte ao planejador, para que ele possa, da melhor maneira possível realizar a proposição de reforços no sistema.

Uma das formas mais utilizadas para apoio ao planejador, nesta etapa comumente chamada de diagnóstico da rede, consiste em serem realizados uma série de estudos de fluxo de potência, nos quais fixa-se a rede existente com a utilização das cargas

dos anos futuros, por exemplo, até o horizonte de planejamento, que normalmente é estabelecido em cinco anos para estudos de médio prazo. Ambientes de planejamento como o descrito em [25] possibilitam a visualização dos componentes de rede (trechos, chaves, subestações) que viriam a apresentar problemas de carregamento em trechos de alimentadores e problemas de níveis de tensão em barras da rede, isto se nenhum reforço ou reconfiguração da rede fosse estabelecida. Apesar destas formas de diagnóstico ajudarem em muito o planejador, ainda pode ser difícil o conhecimento dos locais que merecem receber reforços, de mínima capacidade, para sanar principalmente problemas de carregamento. Por exemplo, quando um alimentador muito longo torna-se sobrecarregado, o problema se dá no tronco. Porém, a instalação de reforços próximos às barras finais pode levar a níveis de investimento muito inferiores. Além disso, quando o diagnóstico é realizado através de fluxo de potência da rede existente com as cargas futuras, não são avaliadas as possíveis transferências de carga entre os alimentadores. Ou seja, um determinado problema de carregamento poderia ser eliminado com uma simples operação de reconfiguração da rede, normalmente realizada através de manobras de chaves normalmente abertas e normalmente fechadas da rede de distribuição.

O desenvolvimento do modelo a ser proposto nessa dissertação deve possibilitar a identificação de áreas carentes de reforços, levando em consideração as possíveis transferências de carga entre alimentadores existentes. Além disso, estabelece a metodologia para a obtenção dos melhores locais para a proposição de subestações candidatas para serem analisadas no processo de otimização da expansão da rede de distribuição.

A otimização da rede existente, com reforços candidatos, para o atendimento de critérios técnicos com carga futura, será realizada através de um algoritmo genético que, automaticamente, propõe reforços complementares, como é o caso da expansão de subestações existentes e recondutoramento de trechos da rede.

4.2 Locação de subestações e novos alimentadores

Em estudos de planejamento, conforme mencionado no item anterior, é muito importante a identificação de áreas carentes de reforços, de forma que sejam determinados os locais da rede que realmente necessitam alternativas de injeção de potência por outras maneiras, que serão identificadas como reforços ao sistema existente.

Ou seja, a idéia baseia-se no fato que a maioria dos reforços candidatos podem ser entendidos como uma injeção de carga em barras específicas da rede. É como se tivéssemos uma política de gerenciamento do lado da demanda, que fizesse com que a carga de determinadas barras específicas fosse reduzida para que os critérios técnicos de operação da rede de distribuição fossem atendidos. Isto vale para uma série de reforços, como é o caso de uma nova SE, que irá resultar em novas injeções de potência em pontos específicos da rede de distribuição, ou um novo alimentador que irá vir a suprir uma determinada parte da rede, ou até mesmo a instalação de uma unidade de geração distribuída.

Desta forma, propõe-se a obtenção de áreas carentes de reforços utilizando-se algoritmo de transporte, com formulação elaborada da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \min z = & \sum_{k \in \Omega_t} (c_{vk} S_k) \\ \text{sujeito a } & \sum_{k \in \Omega_{ki}} S_k = D_i, \quad i \in \Omega_{nós} \quad (4.1) \\ & 0 \leq L_k \leq S_k \leq U_k \quad k \in \Omega_t \end{aligned}$$

onde:

S_k - Fluxo de potência no ramo k;

c_{vk} - Custos de operação do ramo k;

$\Omega_t, \Omega_{nós}$ - Conjuntos total de ramos e total de nós, respectivamente;

Ω_{ki} - Conjunto dos ramos incidentes no nó i;

L_k, U_k - Limites inferior e superior de fluxo de potência no ramo k;

D_i - Demanda da carga no nó i.

Na formulação (4.1), considera-se:

- As chaves de interconexão simuladas através de arcos na rede de transporte, com custos de operação altos (bem acima dos custos de operação/perdas dos demais trechos de rede), de modo que operações de reconfiguração sejam executadas somente quando necessário;
- Um arco adicional em cada nó de carga da rede, de sentido contrário ao arco representando a demanda, com capacidade máxima estabelecida de diversas formas. Por exemplo, igual à própria carga da barra, ou ainda, igual à diferença entre a demanda do horizonte de estudo e a demanda do ano inicial. Obviamente, esta segunda alternativa só é válida para os casos em que a rede do ano inicial atende aos critérios técnicos. O custo unitário deste arco adicional é feito ainda bem maior que o custo das chaves de interconexão. Assim, somente em última instância, devem aparecer fluxos nestes arcos adicionais, de modo a levar à uma solução viável do problema. Isto é, são incluídas as seguintes inequações a (4.1), correspondentes aos arcos adicionais:

$$0 \leq S_k \leq \Delta D_i \quad k \in \Omega_{carga}$$

em que:

Ω_{carga} - Conjunto de nós de carga;

ΔD_i - Diferença da demanda da carga no nó i , entre horizonte e ano inicial (alternativa 2), ou simplesmente a carga total do ano horizonte (alternativa 1).

A figura 4.1 ilustra a rede de transporte para identificação das áreas carentes de uma dada rede elétrica.

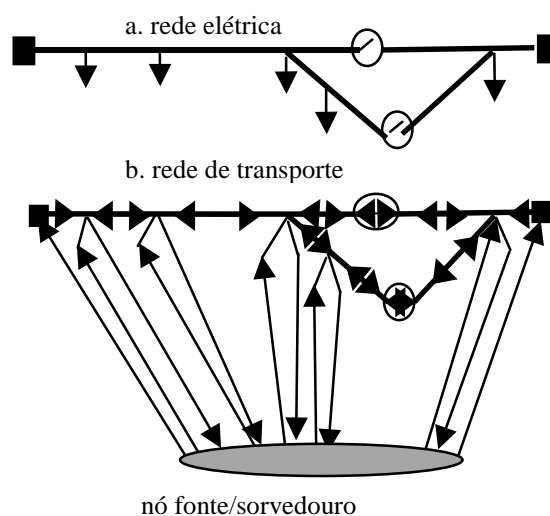


Figura 4-1- Rede de transporte para determinação de áreas carentes

Do que foi exposto, nota-se que resultarão fluxos nos arcos adicionais (do nó fonte aos nós de carga) somente quando não houver outro meio, isto é, mesmo utilizando-se de possíveis reconfigurações da rede. Os nós da rede que recebem fluxos dos arcos adicionais determinam as áreas carentes de reforços; ou seja, são regiões que devem receber fornecimento de energia adicional, através de comissionamento de reforços, como por exemplo novas subestações, novos alimentadores, etc.

A grande vantagem deste enfoque corresponde à determinação das áreas carentes levando-se em consideração as disponibilidades de reconfiguração da rede, que são de enorme relevância para a proposição de reforços candidatos a serem instalados no sistema. A solução da formulação 4.1 é determinada de forma bastante eficiente pelo método de transporte, *out-of-kilter*, descrito sucintamente no capítulo 3.

A partir da definição das áreas carentes de reforços, conforme descrito no item anterior, para auxiliar o planejador na proposição de subestações novas, candidatas a serem instaladas no sistema, utiliza-se o método estatístico de classificação, chamado de “*cluster analysis – k-médias*”, que consiste num processo de agrupamento de indivíduos segundo certos atributos, conforme descrito no capítulo 3.

No caso de proposição automática de subestações, os indivíduos correspondem aos nós das áreas carentes, e o procedimento para agrupá-los baseia-se em distância Euclidiana da nova SE, que é iterativamente localizada no centro de gravidade dos nós de carga que lhe pertencem. São dados do problema também o número de subestações (máximo) que deseja-se propor. O processo, ilustrado na figura 4.2, pode ser descrito segundo os passos a seguir:

- 1) Inicializa-se o processo escolhendo-se aleatoriamente as localizações das subestações, conforme número máximo dado;
- 2) Determina-se, então, para cada nó de carga pertencente às áreas carentes, a SE que está mais próxima segundo a distância Euclidiana;
- 3) Definidos os grupos de nós de carga (*clusters*), localiza-se a SE correspondente no respectivo centro de carga do grupo (coordenadas x_{SEj}, y_{SEj}), cuja posição é avaliada por:

$$x_{SEj} = \frac{\sum_{i \in \Omega_{SEj}} x_i D_i}{\sum_{i \in \Omega_{SEj}} D_i} \quad y_{SEj} = \frac{\sum_{i \in \Omega_{SEj}} y_i D_i}{\sum_{i \in \Omega_{SEj}} D_i} \quad (4.2)$$

- 4) Repetem-se os passos 2 e 3 até que as coordenadas das subestações propostas não mais se alterem de uma iteração para a outra.
- 5) Uma vez localizadas as subestações novas, propõe-se a instalação dos novos alimentadores correspondentes aos nós de carga das áreas carentes, procurando-se um único ponto de conexão (o de mínima distância) a um dado alimentador existente.

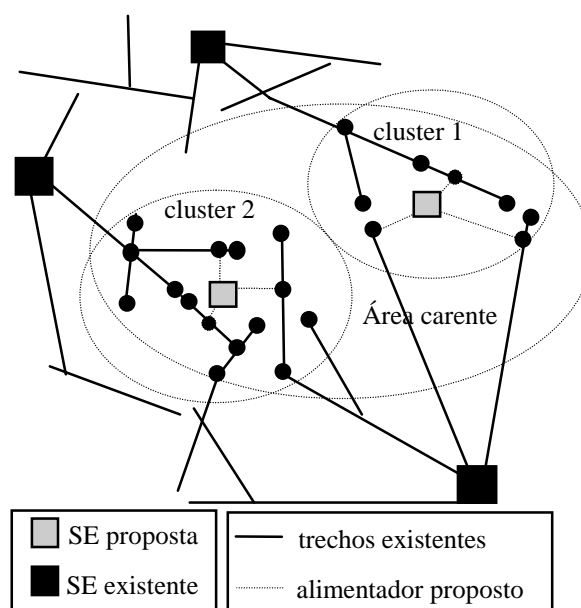


Figura 4-2- Procedimento de Proposição Automática de SEs

O diagrama de blocos da figura 4.3 ilustra os passos descritos de execução para encontrar os centros de carga de cada conjunto de pontos de reforço.

4.3 Modelagem de Rede Elétricas de Distribuição Primária Por AG

Na referência [7], Kagan (1999) utiliza o AG básico no problema de reconfiguração de redes de distribuição com tomada de decisão modelada com números *fuzzy*. Em relação ao AG, o trabalho descreve o algoritmo básico e apresenta a modelagem para configuração de redes, posteriormente utilizado por Bento [17], com objetivo de minimização de perdas com reconfiguração de chaves da rede empregando variantes do AG.

A modelagem proposta [7] mostrou-se extremamente eficiente na codificação e decodificação de indivíduos, ao utilizar-se o conceito de blocos de carga e famílias de blocos, reduzindo o esforço computacional e garantindo a radialidade e conectividade de barras do sistema ao impor restrições topológicas e específicas das redes de distribuição primária na codificação dos indivíduos. Nesta dissertação será utilizada a modelagem proposta em [7].

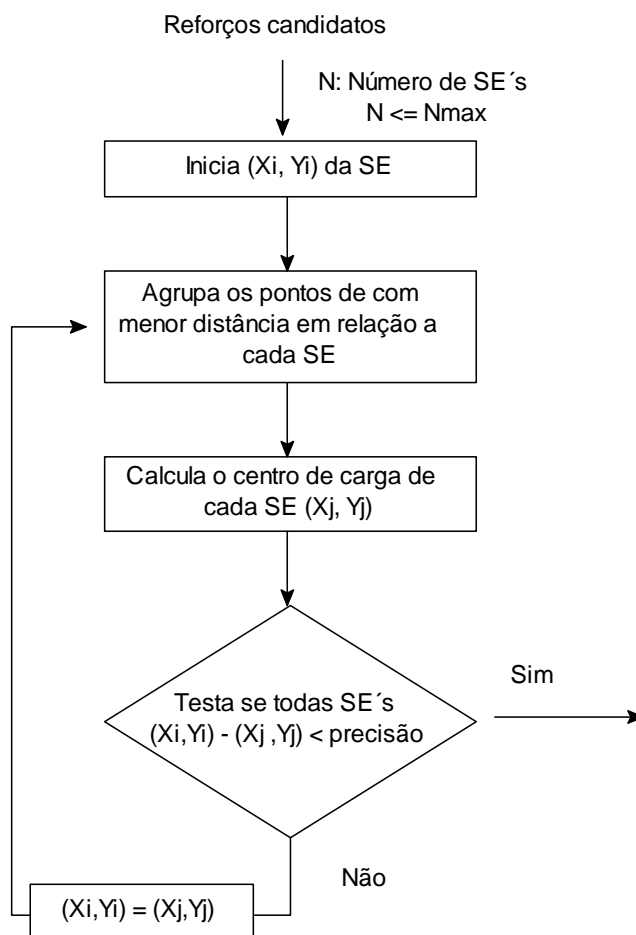


Figura 4-3- Diagrama de blocos do método de classificação

4.3.1 Codificação

A codificação parte do conceito de blocos de carga, os quais são definidos com base à rede inicial, o que corresponde a uma alternativa existente de topologia da rede em que deseja-se diminuir as perdas elétricas. Um bloco de carga é basicamente definido pela chave NF (normalmente fechada) que o supre nesta rede inicial. A figura 4.4 ilustra uma rede com 4 blocos de carga.

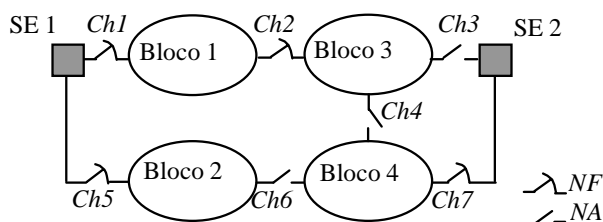


Figura 4-4 - Rede com divisão em blocos

A codificação utilizada tem como principal objetivo que cada *string* gerado corresponda a uma configuração radial e conexa, levando o AG a ser mais eficiente na resolução do problema. Numa rede radial, uma dada barra é ‘suprida’ por uma única ligação; o mesmo pode ser aplicado em relação aos blocos de carga e as chaves com estado fechado – cada bloco de carga deve ser suprido por uma única chave. A cada bloco é então associado um dado número de genes (ou *bits* do *string*), cujo valores binários definirão a chave que supre o bloco. A tabela 4.1 ilustra a codificação utilizada. Nota-se que para até 2 chaves incidindo no bloco necessita-se um só *bit* (0 corresponde à primeira chave e 1 à segunda chave), como é o caso dos blocos B1 e B2; para até 4 chaves incidindo num bloco necessita-se dois *bits* (00-primeira chave, 01-segunda chave, 10-terceira chave, 11-quarta chave), como é o caso dos blocos B3 e B4 (observar que tais blocos apresentam tão somente 3 chaves incidindo e, portanto, quando os bits correspondentes compõem 11 pode-se escolher uma das chaves qualquer, por exemplo a terceira). Genericamente, um número n de *bits* por bloco permite representar um máximo de 2^n chaves incidentes.

| Blocos | B1 | B2 | B3 | | B4 | |
|-----------------------------|-------------------|-------------------|--------------------------|---|--------------------------|---|
| Índice | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Bits do string | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| Chaves que incidem no bloco | <u>Ch1</u> Ch2 | <u>Ch5</u> Ch6 | <u>Ch2</u> Ch3 Ch4 | | Ch4 Ch6 <u>Ch7</u> | |

Tabela 4.1- Codificação utilizada

A simples escolha de chaves utilizando o método acima não necessariamente leva a uma configuração radial e conexa. O procedimento de associação da topologia da rede ao *string* é realizado de forma um pouco mais complexa, aqui denominado processo de decodificação. Analisa-se seqüencialmente cada bloco e vão sendo escolhidas, desde que possível, as chaves correspondentes em função dos valores dos *bits*. No entanto, se existe possibilidade de fechamento de malha (o que é controlado internamente no algoritmo de decodificação), a chave não é fechada - procura-se uma outra chave incidente no bloco que não provoca fechamento de malha. Ao final de percorrer todos os blocos e respectivos *bits*, verifica-se ainda se existe algum bloco que resultou não conexo ao resto do sistema – se isso ocorrer, uma das chaves de suprimento daquele bloco é fechada.

O processo de decodificação na [7], sucintamente descrito, é bastante rápido e, obviamente, deve ser realizado para todos indivíduos de cada população, assegurando que estes correspondam a possíveis soluções viáveis do problema, dado que o processo leva ao atendimento das restrições de radialidade e conectividade da rede.

4.3.2 Função de Avaliação

Este trabalho tem por objetivo avaliar a alternativa de configuração da rede, dada pelos estados das chaves e novos reforços a serem instalados, que leva ao mínimo valor de custo de perdas e investimentos anuais na rede. A função de avaliação para um dado indivíduo é determinada a partir de uma função que impõem valor unitário para custo de expansão e de perdas nulos e valor nulo da função de avaliação para um custo de expansão muito alto (por exemplo, este custo seria o relativo à instalação de todos os reforços no sistema e perdas superiores a 5% da demanda máxima). A função de avaliação de um dado indivíduo i , $f_{av}(i)$, é definida como sendo a seguinte:

$$f_{av}(i) = 1 - \frac{C(i)}{C_{\max}} \text{ para } C(i) < C_{\max}$$

$$f_{av}(i) = 0 \text{ para } C(i) \geq C_{\max}$$
(4.3)

O custo $C(i)$ é determinado a partir da solução da rede, ou seja, os reforços resultantes naquele indivíduo (string do AG), que definem o custo de investimento e um fluxo de potência para a configuração estabelecida pelo indivíduo, que define o custo de perdas na rede.

4.3.3 Consideração das Restrições do Problema

Em AGs, as restrições do problema real são consideradas indiretamente como uma penalização da função de avaliação. Desta forma, os indivíduos que apresentam violação de restrições resultarão pouco ajustados ao objetivo, tendo portanto menor probabilidade de serem selecionados para a geração posterior. Uma vez que as restrições de malha, de radialidade e conectividade da rede já são contempladas pelo processo de decodificação apresentado, estas não necessitam ser consideradas como penalização da função de avaliação. No entanto, as restrições de carregamento de componentes da rede e de limites máximos de níveis de tensão devem ser incorporadas nesta fase.

Uma primeira idéia para incorporar as restrições de carregamento e queda de tensão como penalização na função objetivo, seria a de inicialmente serem determinados os valores máximos de queda de tensão e de carregamento para um dado indivíduo, isto é, para uma dada configuração de rede. Desta forma, a função de avaliação (4.3) seria penalizada pela aplicação de dois fatores multiplicativos, que seriam tão menores quanto maior a violação dos correspondentes valores máximos de queda de tensão e carregamento. No entanto, tal enfoque não permite diferenciar duas alternativas que apresentam valores iguais de queda de tensão e carregamento máximos, porém com quantidade de barras com violação de tensão e quantidade de equipamentos com violação de carregamento completamente distintas. Neste trabalho, apresenta-se um método que permite considerar uma análise dos perfis de tensão e carregamento e, a partir destes, proceder a uma melhor penalização da

função de avaliação, permitindo-se desta forma eliminar o problema do enfoque anterior. A consideração destas restrições parte do conceito de notas (ou índices de mérito) associadas ao perfil de tensão (nota N_{dv}), e de carregamento (nota N_{car}). Tais notas são definidas conforme a seguir:

$$N_{dv} = \frac{\sum_i P_{i,1} \cdot N_1 + \sum_i P_{i,2} \cdot N_2 + \sum_i P_{i,3} \cdot N_3}{\sum_{i,k} P_{i,k}} \quad (4.4)$$

$$N_{car} = \frac{\sum_{ij} l_{ij,1} \cdot N'_1 + \sum_{ij} l_{ij,2} \cdot N'_2 + \sum_{ij} l_{ij,3} \cdot N'_3}{\sum_{ij,k} l_{ij,k}} \quad (4.5)$$

onde:

$P_{i,k}$ - carga da barra i na faixa de tensão k (por exemplo, faixa 1 entre 1,0 e 0,95 pu, faixa 2 entre 0,95 e 0,93 pu e faixa 3 abaixo de 0,93 pu);

$l_{ij,k}$ - comprimento do trecho ij na faixa de carregamento k (por exemplo, faixa 1 entre 0 e 0,70 pu, faixa 2 entre 0,70 e 1 pu e faixa 3 acima de 1 pu da capacidade admissível do trecho);

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

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

Com as definições (4.4) e (4.5) acima, pode-se dizer que o perfil de tensão (ou carregamento) de toda a rede estará melhor quanto mais próximo estiver da nota 1,0 e tanto pior quanto mais próximo da nota 0.

A função de avaliação de um dado indivíduo pode então ser dada pela seguinte expressão:

$$f'_{av}(i) = f_{av}(i) \cdot N_{dv} \cdot N_{car} \quad (4.6)$$

A partir da equação (4.6), aquelas configurações que não apresentam nenhum valor de violação de restrição e, ainda apresentam níveis de tensão e carregamento na faixa mais desejável possível, certamente não serão penalizadas e as correspondentes notas de carregamento e tensão serão unitárias.

4.3.4 Recondutoramento e Expansão de SEs

O modelo acima, baseado em Algoritmos Genéticos, permite a consideração automática de recondutoramento de condutores nos trechos da rede e da expansão de subestações de distribuição.

Para cada indivíduo (ou solução alternativa) analisado, o AG necessita determinar a função de avaliação, conforme mencionado no item anterior. Para determinar a função de avaliação, é necessária a simulação de um algoritmo de fluxo de potência para a avaliação das perdas na rede de distribuição, bem como os níveis de tensão nas barras da rede e os carregamentos em trechos da rede e subestações de distribuição. Ao serem determinados os resultados de carregamento, o procedimento pode propor e decidir automaticamente pela instalação dos seguintes reforços:

- **Recondutoramento de trechos de rede:** quando o carregamento de um determinado trecho da rede é superior a sua capacidade admissível, seria o caso de ser aplicada uma penalização, em função da nota de carregamento ser inferior a unidade. Porém, se o trecho de rede apresenta a possibilidade de ser recondutorado por um outro condutor de seção nominal maior, o algoritmo automaticamente procede a esta operação, sendo necessário em seguida o aumento da função custo (material e instalação de novos condutores em trecho existente) e novo fluxo de potência, pois a impedância do trecho é alterada e pode, principalmente, alterar os níveis de tensão na rede.
- **Expansão de subestações:** da mesma forma que o recondutoramento, quando é notada sobrecarga em determinada SE, o algoritmo pode automaticamente comandar a instalação de mais uma unidade transformadora (ou

eventualmente, a substituição da unidade existente) de modo a aumentar a capacidade da SE para que não ocorra sobrecarga. O custo de expansão da SE deve ser fornecido previamente à execução do algoritmo de otimização.

5. EXEMPLOS DE APLICAÇÕES

5.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos empregando a metodologia descrita no capítulo anterior, empregando o algoritmo de transporte para a identificação das áreas carentes de reforços, o Método das K-médias para a proposição automática de subestações e o Algoritmo Genético para a solução do problema de planejamento, contemplando ainda outros reforços, como é o caso do recondutoramento e expansão de subestações existentes.

Inicialmente esta metodologia será aplicada a uma subestação com apenas um de seus alimentadores representados. O caso de estudo será progressivamente aumentado em seu tamanho, com aumento do número de alimentadores representados, procurando analisar até que ponto a metodologia pode ser aplicada a redes de grande porte.

5.2 Caso Teste 1

A metodologia desenvolvida neste trabalho foi aplicada para um alimentador com demanda projetada no horizonte de estudo. A topologia da rede é apresentada na figura 5.1. O quantitativo dos dados, para se ter idéia da dimensão do sistema em estudo, é apresentado na tabela 5.1. A demanda do alimentador no ano horizonte é de 8,76 MVA, ultrapassando em muito a capacidade da SE existente, que é de 5MVA, e

a da maior parte do tronco do alimentador que é 314 A (7,5MVA, na tensão de 13,8kV).

Para a rede ilustrada na figura 5.1, executou-se o algoritmo de transporte para determinação das áreas carentes de reforços. A partir deste processamento, foi proposta uma única nova subestação, a ser localizada no centro de carga dos pontos de reforço. Obviamente, o método de classificação executa apenas uma iteração, pois todos os pontos são pertencentes a um único agrupamento.

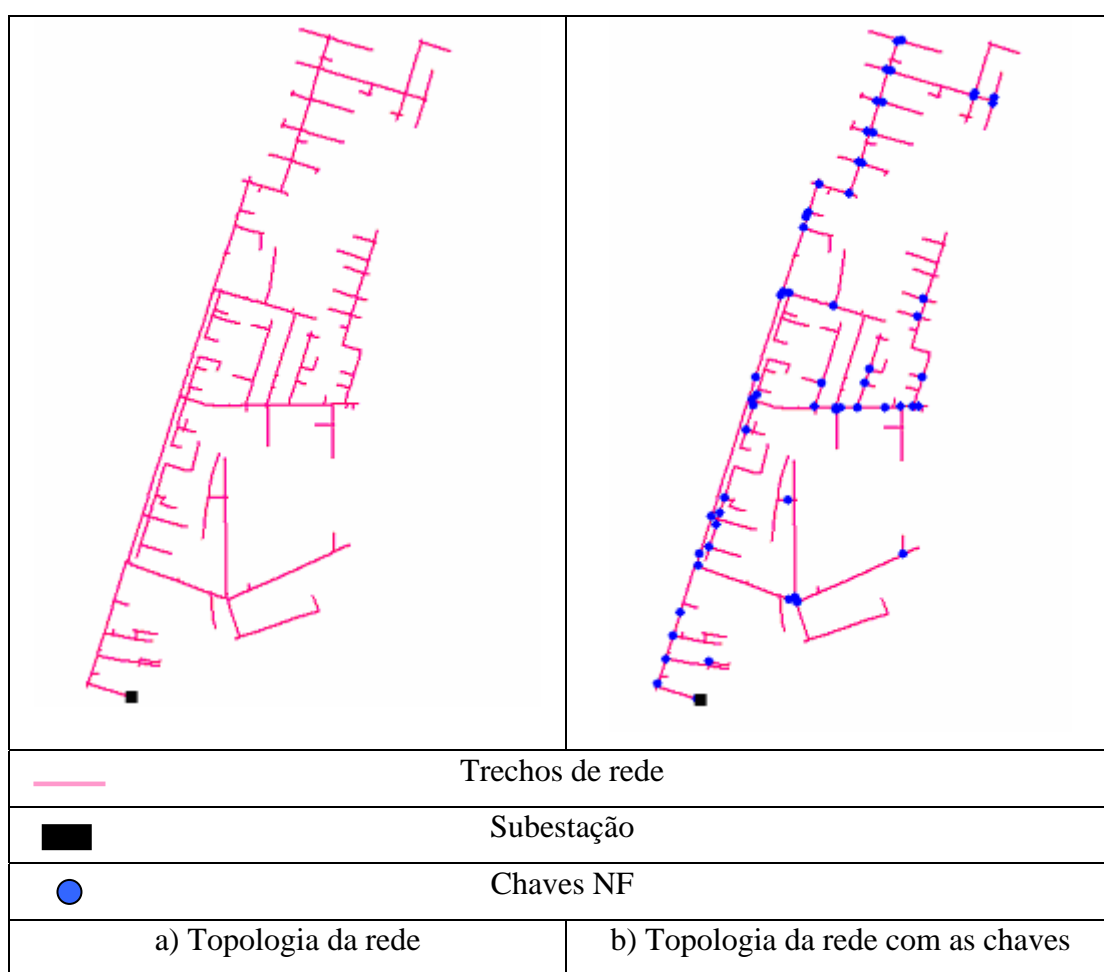


Figura 5-1-Topologia da Rede 1 do caso teste

| | |
|-------------|-----|
| SE | 1 |
| Alimentador | 1 |
| Barras | 488 |
| Chaves | 63 |
| Trechos | 424 |
| Cargas | 156 |

Tabela 5.1-Dados da Rede

A figura 5.2 mostra os pontos que necessitam de reforços do sistema. Nota-se que, em função do alto carregamento do sistema, o número de pontos carentes de reforços é elevado. A SE proposta é localizada no centro de carga do único conjunto de pontos.

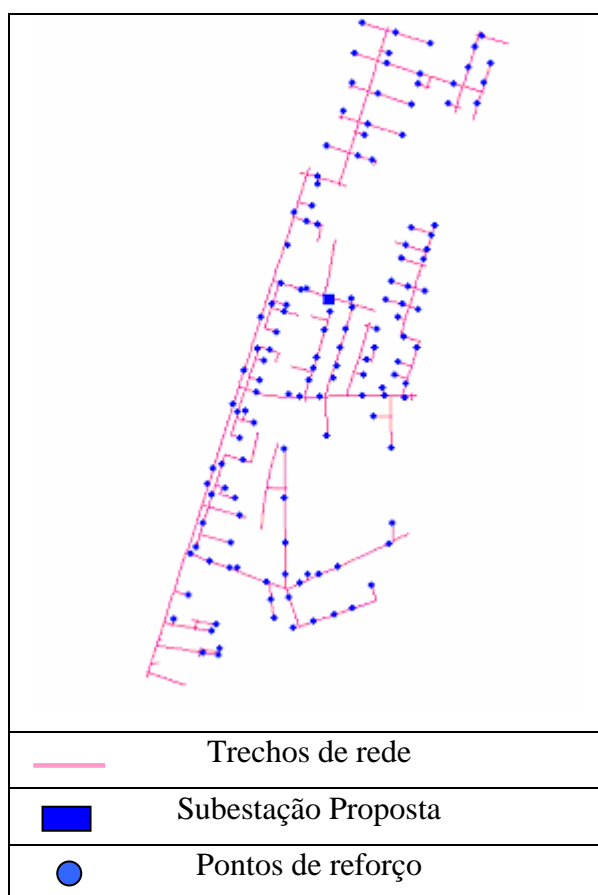


Figura 5-2-Identificação dos pontos de reforço da rede-1 e SE proposta

Com a SE proposta pelo modelo, pode-se definir a SE como sendo um reforço candidato para o AG. Destaca-se que o modelo propõe automaticamente também um alimentador na saída da SE proposta para cada alimentador existente e uma ligação conectando a barra mais próxima.

Os valores de custo utilizados neste trabalho são detalhados a seguir. A instalação de uma subestação nova requer os seguintes custos:

- Custo do transformador (20 MVA): R\$ 100 mil;
- Custo da conexão com alta tensão: R\$ 250 mil;
- Custo do Bay AT: R\$ 500 mil;
- Custo de cada Bay MT: R\$ 250 mil.

Não foi considerado o custo do terreno para instalação da SE, porém o custo pode ser incorporado como custo fixo na formulação do problema. O valor anualizado para investimentos é calculado pela equação (5.1):

$$FRC = \frac{(1+j)^n \cdot j}{(1+j)^n - 1}$$

onde:

FRC: fator de recuperação do capital;

j: taxa de juros ao ano de 12%;

n: tempo de recuperação do capital, 20 anos.

Para efeito de comparação e avaliação, inicialmente é calculado o fluxo de potência usando [25] que mostra o diagnóstico da rede com relação a tensão das barras e o carregamento dos trechos, sem a presença dos reforços propostos. Os parâmetros utilizados para visualização do fluxo estão apresentados na figura 5.3. Ao longo dos casos simulados, são utilizados os mesmos parâmetros para diagnóstico da rede. Pode-se observar que a tensão das barras estão abaixo de 0,95 pu na parte final do alimentador e na saída do alimentador o carregamento do trecho está maior que 100% de sua capacidade nominal.

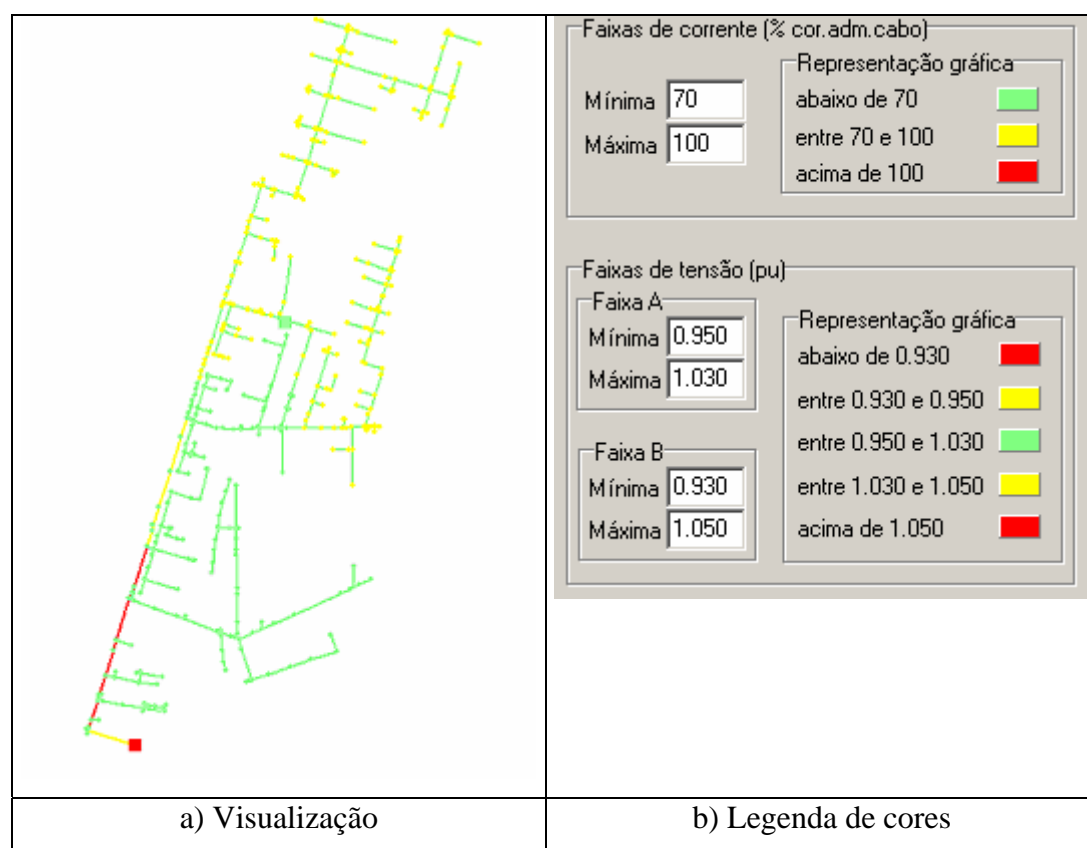


Figura 5-3-Diagnóstico da rede (sem reforços instalados)

O AG é executado, em seguida, com os parâmetros utilizados descritos na tabela 5.2. O resultado da otimização por AG é ilustrado na figura 5.4, onde pode-se observar que a SE foi instalada para atender aos critérios técnicos e a reconfiguração do sistema eliminou a sobrecarga dos trechos e queda de tensão fora da faixa admissível no final do alimentador. A figura 5.4a apresenta a nova configuração da rede (duas SEs e dois circuitos primários, nas cores verde e vermelho) e a figura 5.4b demonstra que os critérios técnicos foram atendidos com os reforços instalados.

| Dados gerais | |
|--------------------------------------|------|
| Número de gerações | 50 |
| Número de indivíduos | 10 |
| Probabilidade de mutação | 0.01 |
| Prob. de cruzamento uniforme | 0.85 |
| Função objetivo | |
| Custo total (investimento + perdas) | 0.5 |
| Carregamento | 0.4 |
| Tensão | 0.1 |
| Opção selecionada | |
| Recondutoramento | sim |
| Critério de parada (após n gerações) | não |

Tabela 5.2- Parâmetros utilizados no AG

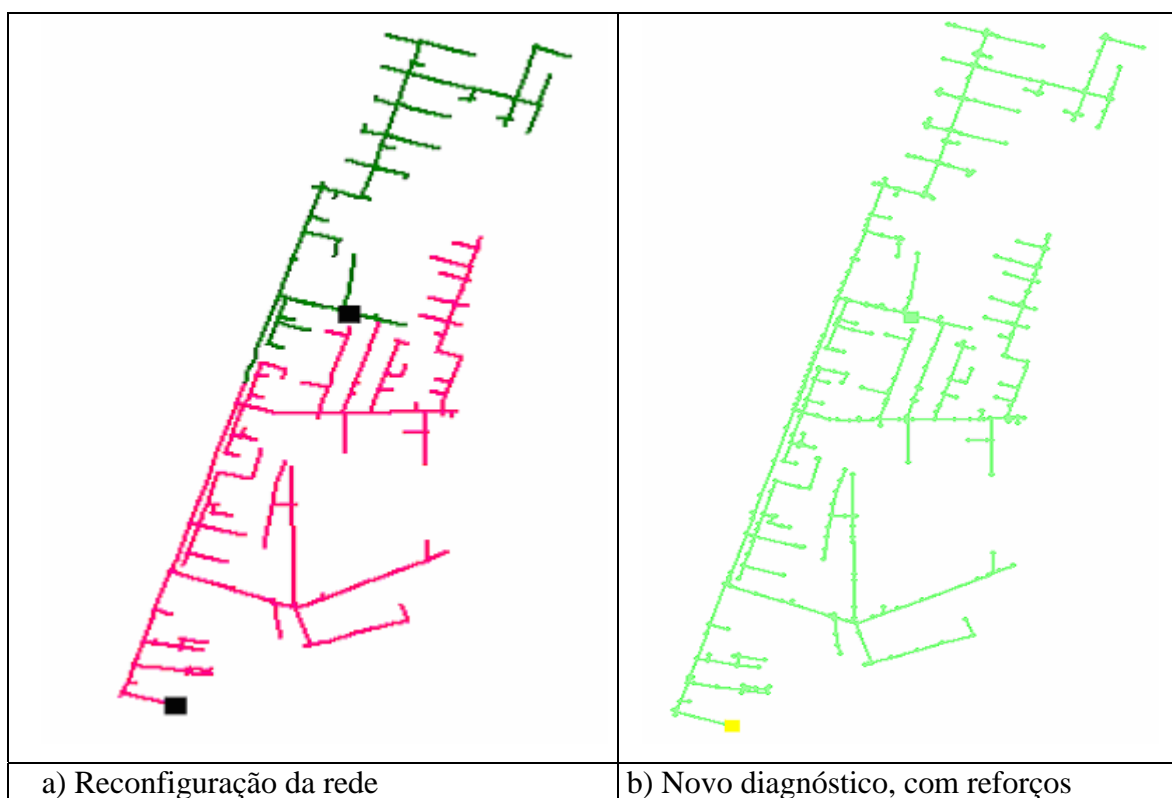


Figura 5-4-Otimização da rede-1 por AG

O gráfico da figura 5.5 ilustra a evolução das avaliações dos indivíduos para o Caso Teste 1, representando o valor da avaliação do melhor indivíduo a cada geração. A tabela 5.3 exibe as notas obtidas e o custo final anualizado da entrada da subestação.

| | |
|---------------------------------|----------------|
| Nota objetivo | 0,45 |
| Nota investimento | 0,00 |
| Nota perdas | 0,85 |
| Nota tensões | 1,00 |
| Nota de carregamento de trechos | 0,39 |
| Nota de carregamento da SE | 1,00 |
| Custo total | R\$ 147.266,66 |

Tabela 5.3-Notas de avaliação do AG e custo final para rede-1 alocada com uma SE

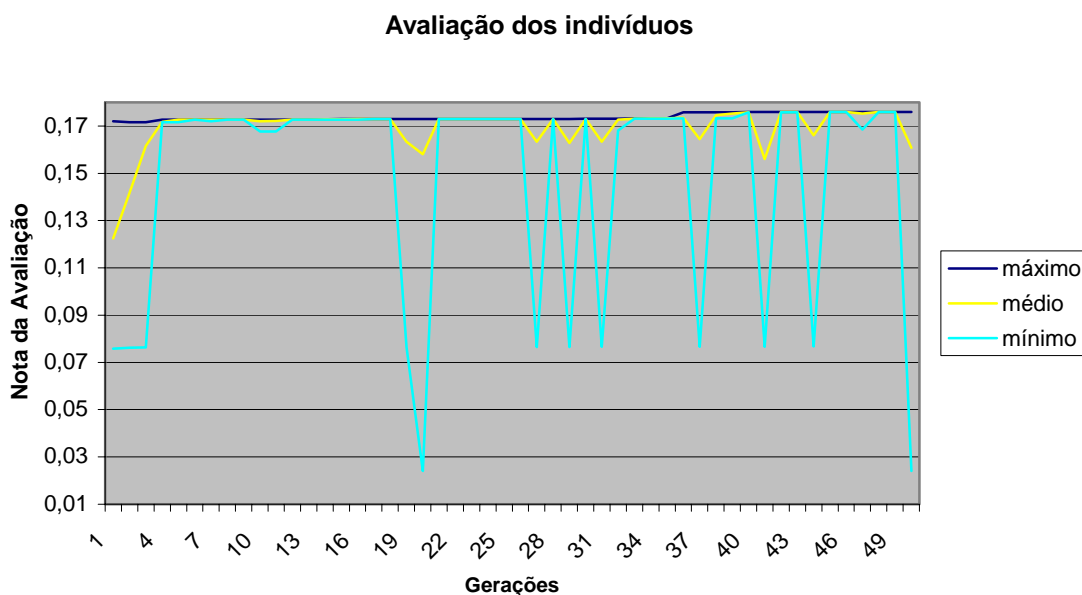


Figura 5-5-Avaliação dos indivíduos, a cada geração, na otimização da rede-1

5.3 Caso Teste 2

Neste exemplo a seguir tem a finalidade de testar a metodologia de alocação de SEs, pois no exemplo foi proposta uma única SE, simplesmente calculando o centro de carga dos pontos onde há injeção de fluxo do nó-fonte para a carga.

Considerando a mesma rede anterior, definiu-se neste Caso Teste 2 duas subestações para serem agrupadas. Os resultados mostram que não há uma solução fixa para o problema, pois o processamento do método das K-médias depende das sementes iniciais, que no caso são as posições iniciais das SEs propostas. A tabela 5.4 mostra as coordenadas (X1,Y1) e (X2,Y2) das SEs novas para dez casos realizados.

| Ensaio | X1 | Y1 | X2 | Y2 | n-iteração |
|--------|---------|----------|---------|----------|------------|
| 1 | 7453910 | 77311129 | 7448632 | 77295927 | 6 |
| 2 | 7444358 | 77279113 | 7448632 | 77295927 | 5 |
| 3 | 7453910 | 77311129 | 7448632 | 77295927 | 5 |
| 4 | 7453910 | 77311129 | 7448632 | 77295927 | 7 |
| 5 | 7444358 | 77279113 | 7448632 | 77295927 | 6 |
| 6 | 7453910 | 77311129 | 7448632 | 77295927 | 7 |
| 7 | 7444358 | 77279113 | 7448632 | 77295927 | 5 |
| 8 | 7453910 | 77311129 | 7448632 | 77295927 | 7 |
| 9 | 7444358 | 77279113 | 7448632 | 77295927 | 5 |
| 10 | 7444358 | 77279113 | 7448632 | 77295927 | 5 |

Tabela 5.4-Ensaio realizados para alocação de duas SE's para rede

Observa-se que o sistema converge rapidamente para no máximo em sete iterações, com precisão considerada na distância de $1E-10$ m, valor bastante pequeno. Nos ensaios obtidos, nota-se que a SE2, coordenadas (X2, Y2), sempre aparece como o centro do aglomerado, que justamente é a mesma SE alocada com coordenadas (7448632, 77295927) do Caso Teste 1. Já a SE1 é localizada em dois pontos distintos, conforme o ensaio executado (sementes iniciais), como mostrado na figura 5.6.

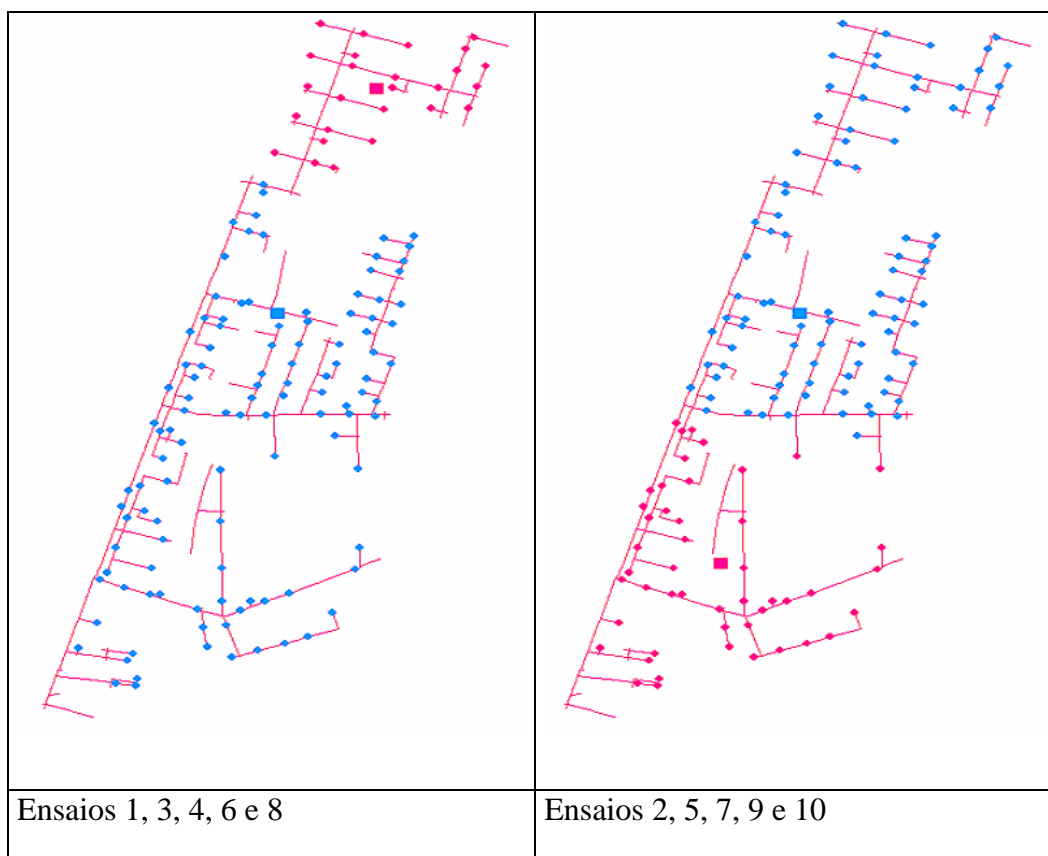


Figura 5-6-Resultados de alocação de duas SEs para a rede

Utilizando o primeiro ensaio, com alocação de duas SEs, a figura 5.7 ilustra a reconfiguração obtida no AG. O gráfico da figura 5.8 mostra a evolução das notas de avaliação dos melhores indivíduos de cada geração. Observa-se que o custo dobrou devido à instalação de duas SE's, porém a nota da avaliação final aumentou consideravelmente.

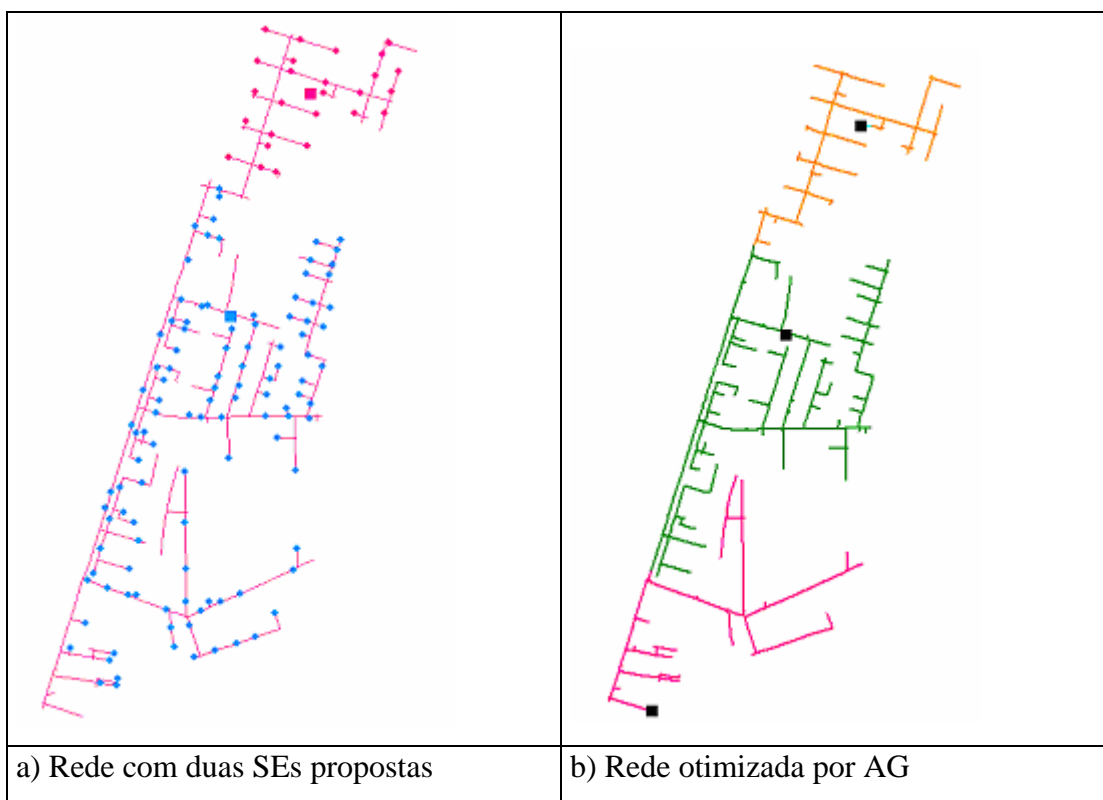


Figura 5-7- Reconfiguração da rede com proposição automática de duas novas SEs

Avaliação dos indivíduos

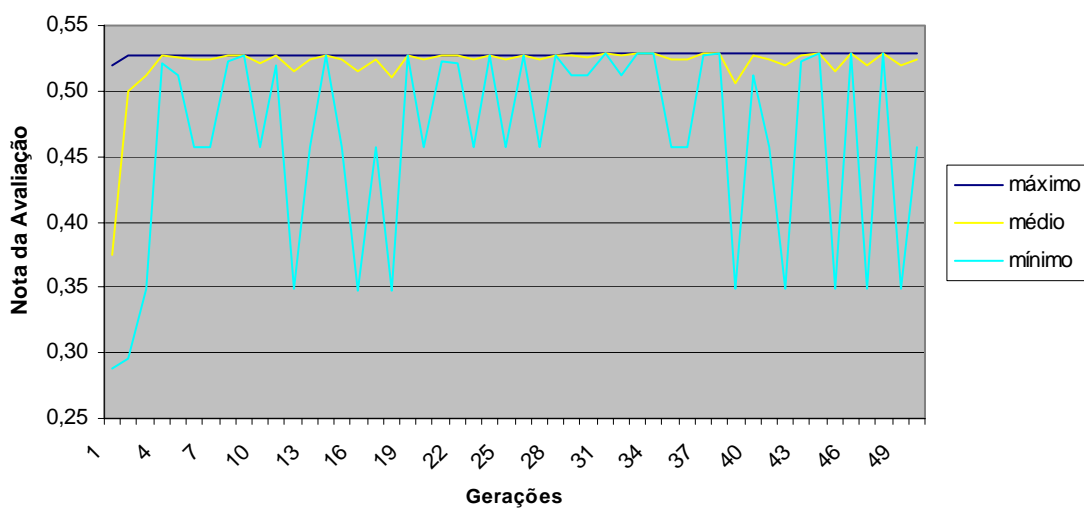


Figura 5-8- Avaliação dos indivíduos, a cada geração, na otimização da rede com duas SEs propostas

| | |
|---------------------------------|----------------|
| Nota objetivo | 0,37 |
| Nota investimento | 0,00 |
| Nota perdas | 0,90 |
| nota tensões | 1,00 |
| Nota de carregamento de trechos | 0,40 |
| Nota de carregamento da SE | 1,00 |
| Custo total | R\$ 227.722,11 |

Tabela 5.5 Notas de avaliação do AG e custo final para rede com proposição de 2 SEs

5.4 Caso Teste 3

Neste terceiro caso teste, a subestação é constituída de dois alimentadores, duplicando a dimensão da rede estudada. Nesta simulação, são mantidos os parâmetros do AG da tabela 5.2, e os quantitativos da rede são apresentados na tabela 5.6.

| | |
|-------------|------|
| SE | 1 |
| Alimentador | 2 |
| Barras | 1047 |
| Chaves | 123 |
| Trechos | 924 |
| Cargas | 337 |

Tabela 5.6-Dados da Rede

Na figura 5.9, temos um diagnóstico prévio do fluxo de potência da rede estudada. A demanda dos alimentadores é, respectivamente, de 8,76MVA e 7,70MVA e a subestação existente, com capacidade de 10MVA, apresenta carregamento de 16,46MVA. Além dos problemas de carregamento de subestação e de trechos dos alimentadores, observa-se que há queda tensão fora da faixa admissível no final dos alimentadores.

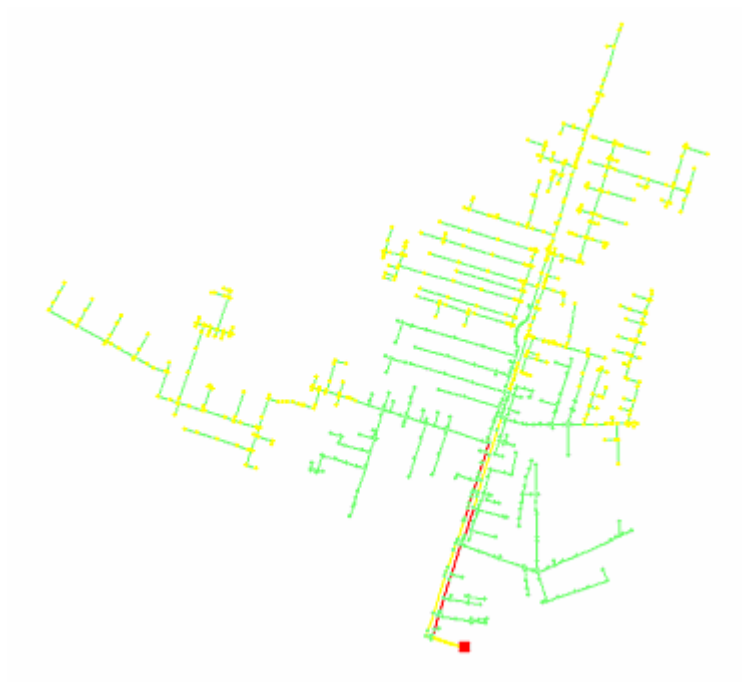


Figura 5-9- Diagnóstico da rede-2 pelo fluxo de potência

A metodologia foi aplicada para definição da área carente de reforços com utilização do algoritmo de transporte. A partir da definição dos pontos que devem ter injeção de potência, foram simulados dois casos, o primeiro com a proposição de 2 subestações novas e o segundo com proposição de 3 subestações novas, conforme coordenadas resultantes por ensaio apresentadas nas tabelas 5.7 e 5.8, respectivamente.

| Ensaio | X1 | Y1 | X2 | Y2 | n-iteração |
|--------|---------|----------|---------|----------|------------|
| 1 | 7443068 | 77297937 | 7450253 | 77312696 | 9 |
| 2 | 7443068 | 77297937 | 7450253 | 77312696 | 8 |
| 3 | 7443068 | 77297937 | 7432909 | 77285994 | 5 |
| 4 | 7443068 | 77297937 | 7432909 | 77285994 | 5 |
| 5 | 7443068 | 77297937 | 7450253 | 77312696 | 8 |

Tabela 5.7- Ensaio de alocação de duas SE's

| Ensaio | X1 | Y1 | X2 | Y2 | X3 | Y3 | n-iteração |
|--------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|------------|
| 1 | 7416575 | 77291640 | 7432909 | 77285994 | 7443068 | 77297937 | 12 |
| 2 | 7448127 | 77284875 | 7437376 | 77287150 | 7443068 | 77297937 | 20 |
| 3 | 7416575 | 77291640 | 7432909 | 77285994 | 7443068 | 77297937 | 15 |
| 4 | 7451453 | 77321239 | 7450253 | 77312696 | 7443068 | 77297937 | 11 |
| 5 | 7448127 | 77284875 | 7437376 | 77287150 | 7443068 | 77297937 | 19 |

Tabela 5.8-Ensaio de alocação de três SE's

Os ensaios realizados de classificação (*cluster analysis*) mostram novamente que os resultados podem variar a localização dos centros de carga, devido a influência do sorteio inicial do indivíduo que desloca os pontos em torno.

Tomando o primeiro ensaio da tabela 5.7, a otimização da expansão da rede por AG será considerada com a proposição de duas novas SE's na rede, ambas com potência nominal de 20 MVA e custos descritos no item 5.1 deste capítulo. Na SE existente, foi definida a possibilidade de ampliação com mais uma unidade transformadora de 20 MVA, servindo de base para efeito de comparação. A figura 5.11 apresenta a rede existente, com as 2 novas SEs propostas.

Como pode verificar no resultado de obras comandadas pelo AG, apresentado na tabela 5.9, não foi realizada a expansão da SE existente. É interessante observar também que foi instalada apenas uma SE proposta e um alimentador suficiente para atender o bloco de carga transferido da SE existente, visto que a instalação de mais um alimentador representaria um custo a mais que é o Bay MT. A tabela 5.9 apresenta, além da instalação da SE proposta, um conjunto de cabos reconduzidos para não transgredir o sobrecarga do alimentador. Neste caso teste, os resultados apresentados pelo AG, com evolução apresentada na figura 5.13, que podem ser visualizados na nova configuração obtida (figura 5.12) foram satisfatórios, conforme diagnóstico gráfico apresentado na figura 5.14. As tabelas 5.10 e 5.11 mostram, respectivamente, resumo das obras realizadas e resultados das notas de avaliação dos critérios.

| Eqpto/Ação | Codigo | Custo (\$/ano) | Obs |
|------------------|--------|----------------|---|
| SE | se.1 | 113796.96 | |
| Alimentador | cir.1 | | |
| Barra | bar.1 | 0.00 | |
| Barra | bar.2 | 0.00 | |
| Barra | bar.3 | 0.00 | |
| Trecho | tre.3 | 0.00 | Comp: 0 m (cabo: U35) |
| Chave | chv.1 | 33469.70 | |
| Chave | chv.2 | 0.00 | |
| Recondutoramento | 323 | 314.67 | Comp: 47 m / Cabo de fase original: A40 - Cabo de fase final: U20 |
| Recondutoramento | 325 | 348.14 | Comp: 52 m / Cabo de fase original: A40 - Cabo de fase final: U20 |
| Recondutoramento | 326 | 542.30 | Comp: 81 m / Cabo de fase original: A40 - Cabo de fase final: U20 |
| Recondutoramento | 327 | 609.24 | Comp: 91 m / Cabo de fase original: A40 - Cabo de fase final: U20 |

Tabela 5.9-Obras realizados na rede-2



Figura 5-10-Rede-2 com duas SE's propostas automaticamente

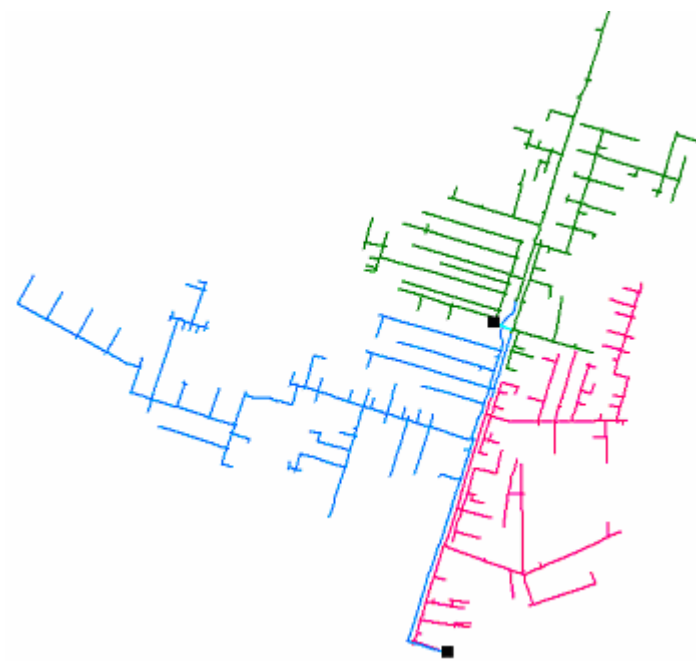


Figura 5-11-Otimização da rede-2 pelo AG

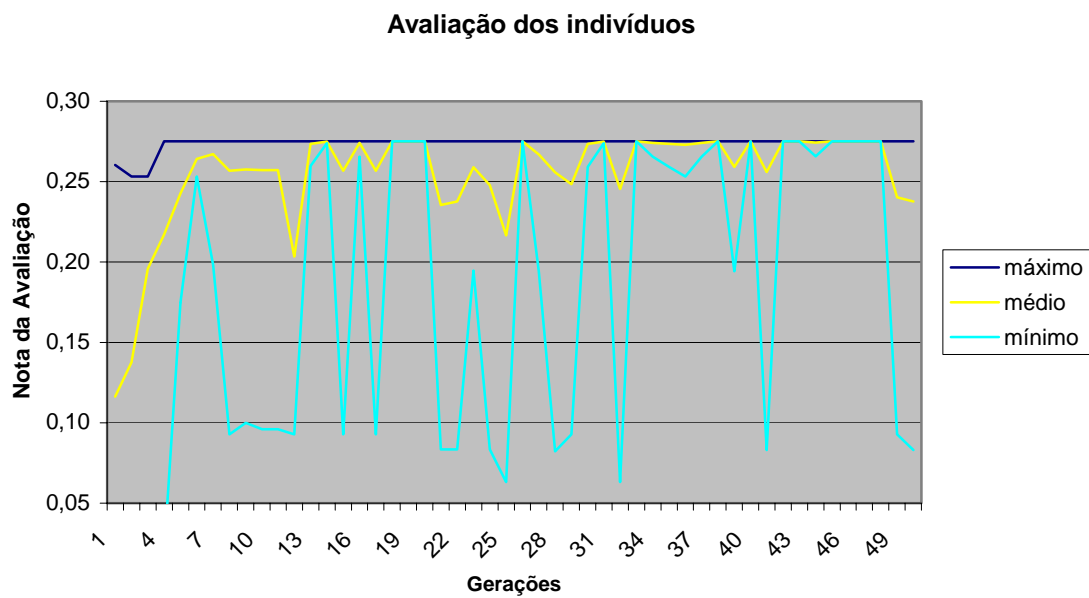


Figura 5-12-Evolução da avaliação dos indivíduos da rede-2

| Eqpto/Ação | Qtde | Custo (\$/ano) |
|------------------|------|----------------|
| SE | 1 | 113796.96 |
| Alimentador | 1 | 0.00 |
| Barra | 3 | 0.00 |
| Trecho | 1 | 0.00 |
| Chave | 2 | 33469.70 |
| Recondutoramento | 4 | 1814.35 |

Tabela 5.10-Quadro resumo das obras realizadas

| | |
|---------------------------------|----------------|
| Nota objetivo | 0,69 |
| Nota investimento | 0,60 |
| Nota perdas | 0,80 |
| nota tensões | 1,00 |
| Nota de carregamento de trechos | 0,40 |
| Nota de carregamento da SE | 1,00 |
| Custo total | R\$ 149.081,01 |

Tabela 5.11 Notas de avaliação do AG e custo final para rede-2 com duas SE's propostas

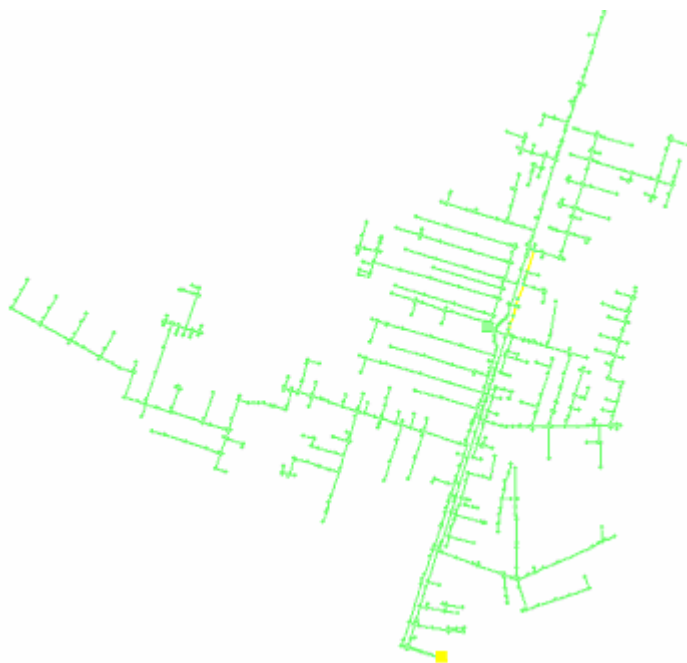


Figura 5-134-Diagnóstico da rede-2 após instalação da SE nova

5.5 Caso Teste 4

Neste caso teste, a SE estudada nos casos anteriores supre 4 alimentadores primários. A tabela 5.12 resume os quantitativos da rede estudada, denominada aqui por rede-3. Os alimentadores apresentam demanda no horizonte de estudo iguais a 8,76MVA, 7,70MVA, 8,13MVA e 7,47MVA, o que representam um alto carregamento da rede primária. A SE existente, com capacidade de 25MVA, apresenta carregamento de 32MVA.

| | |
|-------------------|------------|
| SE | 1 |
| Alimentador | 4 |
| Barras | 2335 |
| Chaves | 287 |
| Trechos | 2057 |
| Cargas | 748 |
| Comprimento total | 162,632 km |

Tabela 5.12- Características da rede-3

Pela metodologia utilizada, foi inicialmente determinada a área carente de reforços pela utilização do algoritmo de transporte. Em seguida, pela utilização do método das K-médias, foram solicitadas duas SE's propostas. Foram realizados novamente cinco ensaios para agrupamento de reforços. A tabela 5.13 ilustra os ensaios obtidos: nota-se que os ensaios 2, 3 e 4 resultam em mesmas coordenadas das duas SEs propostas, sendo definidos como SE's propostas para serem analisadas pelo AG. As SEs propostas são visualizadas, junto com as áreas carentes de reforços, na figura 5.15.

| Ensaio | X1 | Y1 | X2 | Y2 | n-iteração |
|--------|---------|----------|---------|----------|------------|
| 1 | 7471271 | 77281104 | 7455634 | 77290561 | 3 |
| 2 | 7441627 | 77300950 | 7455634 | 77290561 | 6 |
| 3 | 7441627 | 77300950 | 7455634 | 77290561 | 9 |
| 4 | 7471271 | 77281104 | 7455634 | 77290561 | 10 |
| 5 | 7441627 | 77300950 | 7455634 | 77290561 | 6 |

Tabela 5.13- Ensaios realizados com proposição de duas SE's para rede-3



Figura 5-14- Classificação dos reforços da rede-3

O estudo de otimização da expansão da rede de distribuição foi então analisado, considerando as duas subestações, automaticamente propostas pela metodologia deste trabalho.

A figura 5.16 apresenta a evolução do AG ao longo de suas iterações e a figura 5.17 os resultados das obras selecionadas pelo método de otimização.

Pela visualização do fluxo de potência na rede-3, apresentado na figura 5.18, pode-se deduzir que o AG resultou na instalação de apenas um alimentador, visto que a obra de Bay MT é bem mais cara que a de recondutoramento, o que decorre da formulação da função objetivo com peso maior para custo de investimento. Pode-se dizer que este resultado não é o mais satisfatório do ponto de vista técnico, pois permanecem quedas de tensão ainda em alguns pontos, porém o problema de carregamento foi devidamente solucionado pelo AG. Este possível inconveniente no perfil de tensão poderia ser solucionado pela alteração da função de avaliação do

AG, dando-se maior peso para o critério de queda de tensão, ou, como é o caso mais usual nas empresas, deixar o problema de suporte reativo para uma etapa pós-otimização a ser realizada por controles de regulação de tensão (reguladores de tensão de linha ou na SE) ou ainda por bancos de capacitores.

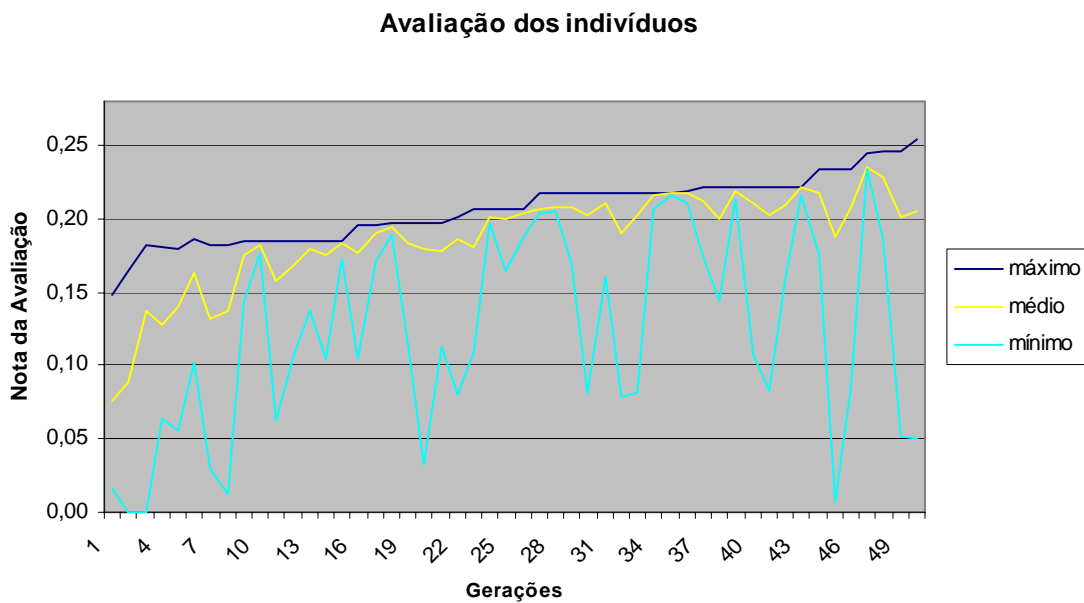


Figura 5.16-Avaliação dos indivíduos da rede-3

| Eqpto/Ação | Código | Custo (\$/ano) | Obs |
|------------------|--------|----------------|--|
| SE | se.1 | 113796.96 | |
| Alimentador | cir.3 | | |
| Barra | bar.7 | 0.00 | |
| Barra | bar.8 | 0.00 | |
| Barra | bar.9 | 0.00 | |
| Trecho | tre.9 | 0.00 | Comp: 0 m (cabo: U35) |
| Chave | chv.5 | 33469.70 | |
| Chave | chv.6 | 0.00 | |
| Recondutoramento | 573 | 107.12 | Comp: 16 m / Cabo de fase original: A40 - Cabo de fase final: U20 |
| Recondutoramento | 575 | 723.06 | Comp: 108 m / Cabo de fase original: A40 - Cabo de fase final: U20 |
| Recondutoramento | 576 | 254.41 | Comp: 38 m / Cabo de fase original: A40 - Cabo de fase final: U20 |
| Recondutoramento | 577 | 461.96 | Comp: 69 m / Cabo de fase original: A40 - Cabo de fase final: U20 |
| Recondutoramento | 578 | 247.71 | Comp: 37 m / Cabo de fase original: A40 - Cabo de fase final: U20 |
| Recondutoramento | 579 | 153.98 | Comp: 23 m / Cabo de fase original: A40 - Cabo de fase final: U20 |
| Recondutoramento | 580 | 622.64 | Comp: 93 m / Cabo de fase original: A40 - Cabo de fase final: U20 |
| Recondutoramento | 581 | 261.10 | Comp: 39 m / Cabo de fase original: A40 - Cabo de fase final: U20 |
| Recondutoramento | 582 | 227.63 | Comp: 34 m / Cabo de fase original: A40 - Cabo de fase final: U20 |
| Recondutoramento | 583 | 662.80 | Comp: 99 m / Cabo de fase original: A40 - Cabo de fase final: U20 |
| Recondutoramento | 584 | 682.89 | Comp: 102 m / Cabo de fase original: A40 - Cabo de fase final: U20 |
| Recondutoramento | 586 | 615.94 | Comp: 92 m / Cabo de fase original: A40 - Cabo de fase final: U20 |
| Recondutoramento | 591 | 301.27 | Comp: 45 m / Cabo de fase original: A40 - Cabo de fase final: U20 |
| Recondutoramento | 2239 | 519.53 | Comp: 97 m / Cabo de fase original: A02 - Cabo de fase final: A10 |
| Recondutoramento | 2240 | 326.72 | Comp: 61 m / Cabo de fase original: A02 - Cabo de fase final: A10 |
| Recondutoramento | 2241 | 48.20 | Comp: 9 m / Cabo de fase original: A02 - Cabo de fase final: A10 |
| Recondutoramento | 2244 | 1097.98 | Comp: 205 m / Cabo de fase original: A02 - Cabo de fase final: A10 |
| Recondutoramento | 2245 | 187.46 | Comp: 35 m / Cabo de fase original: A02 - Cabo de fase final: A10 |
| Recondutoramento | 2246 | 385.63 | Comp: 72 m / Cabo de fase original: A02 - Cabo de fase final: A10 |
| Recondutoramento | 2272 | 96.41 | Comp: 18 m / Cabo de fase original: A02 - Cabo de fase final: A10 |
| Recondutoramento | 2273 | 241.02 | Comp: 45 m / Cabo de fase original: A02 - Cabo de fase final: A10 |
| Recondutoramento | 2276 | 637.36 | Comp: 119 m / Cabo de fase original: A02 - Cabo de fase final: A10 |
| Recondutoramento | 2278 | 862.32 | Comp: 161 m / Cabo de fase original: A02 - Cabo de fase final: A10 |
| Recondutoramento | 2280 | 203.53 | Comp: 38 m / Cabo de fase original: A02 - Cabo de fase final: A10 |
| Recondutoramento | 2283 | 380.28 | Comp: 71 m / Cabo de fase original: A02 - Cabo de fase final: A10 |
| Recondutoramento | 2284 | 271.82 | Comp: 58 m / Cabo de fase original: A02 - Cabo de fase final: U04 |
| Recondutoramento | 2286 | 257.76 | Comp: 55 m / Cabo de fase original: A02 - Cabo de fase final: U04 |
| Recondutoramento | 2288 | 93.73 | Comp: 20 m / Cabo de fase original: A02 - Cabo de fase final: U04 |
| Recondutoramento | 2290 | 159.34 | Comp: 34 m / Cabo de fase original: A02 - Cabo de fase final: S02 |

Figura 5-15-Obras propostas pelo AG na rede-3



Figura 5-16-Visualização de fluxo na rede-3 reconfigurada por AG

6. CONCLUSÕES

6.1 Considerações Finais

Esta dissertação relata os resultados obtidos com a aplicação do algoritmo do transporte junto com o algoritmo genético na proposição automática de reforços no planejamento dos sistemas de distribuição de energia elétrica.

Embora o método de classificação pelo método k-médias não garanta resultados idênticos ao longo dos ensaios (função das sementes iniciais), a repetição dos ensaios fornece ao planejador as localizações mais prováveis, que podem ser analisadas posteriormente pelo método de otimização (AG). No caso teste 2, por exemplo, 50% dos ensaios resultaram com uma proposição de subestações candidatas e outros 50% com uma outra proposição. Assim, o planejador, pode simular as duas proposições com o método de otimização, e escolher pela de melhor resultado quanto aos objetivos atingidos.

O algoritmo de transporte desenvolvido neste trabalho mostrou-se extremamente rápido na solução de fluxo ótimo do sistema nos casos estudados até então. Uma dificuldade encontrada neste trabalho em relação ao modelo é que quando a rede de distribuição é muito grande, não é possível encontrar a solução. Porém, esta é uma limitação da implementação do software (por exemplo, dimensão de matrizes, etc.), que deverá ser contornada em versões posteriores.

Quanto ao algoritmo genético, este mostrou-se extremamente eficiente na codificação das redes de distribuição pelo conceito de bloco de cargas e família de

blocos, proposto por Kagan [7], evitando dessa forma o surgimento de malhas no sistema, garantindo desde o começo a radialidade da rede, uma característica peculiar das redes de distribuição, de difícil tratamento por métodos convencionais de otimização (por exemplo, PLIM).

Outra vantagem do algoritmo genético é a possibilidade de incorporar inúmeras restrições na sua função de avaliação. Além disso, todos os casos testados neste trabalho mostraram a eficiência desta modelagem e a rapidez na convergência.

Sobre os casos simulados neste trabalho, a metodologia mostra que é uma ferramenta útil para o planejamento de redes onde, a priori, não é possível saber onde é o melhor local para efetuar obras no sistema. A metodologia fornece a indicação da localização de novos reforços e o AG permite a otimização das obras propostas juntamente com as do planejador.

6.2 Pesquisas Para Ulterior Desenvolvimento

A partir dos resultados obtidos nesta dissertação, surgem algumas possibilidades para novos desenvolvimentos:

- Aplicar outras técnicas de classificação, como alternativas ao método utilizado (k-médias), para a definição das novas SEs candidatas, como o método das nuvens dinâmicas junto com o método de Ward para eliminar a dependência do sorteio inicial dos indivíduos (SE's). Estes métodos de classificação podem melhorar a etapa de localização das SEs.
- Estudar uma alternativa para redução da rede de distribuição, para adequar ao modelo de transporte. Como foi visto, devido ao crescimento elevado de variáveis, o algoritmo de transporte pode não determinar solução. Uma opção seria concentrar as cargas no tronco do alimentador ou divisão de pequenas regiões em quadrículas com carga concentrada no centro.

- Considerar a modelagem de geração distribuída como alternativa para melhorar a qualidade dos serviços e postergar os investimentos na rede. Os pontos que necessitam injeção de potência, avaliados pelo algoritmo de transporte, são candidatos à instalação de novas unidades de geração distribuída. Esta nova possibilidade de expansão da rede pode ser uma alternativa a ser considerada, juntamente com os reforços propostos nesta dissertação, de forma a trazer vantagens para a otimização da expansão do sistema de distribuição.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BURANI, G F. Aplicação de técnicas de transporte no planejamento da distribuição de energia elétrica. São Paulo, 1985. 1v. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- [2] GALVÃO, L C R. Utilização de modelo linear no planejamento da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica. São Paulo, 1985. 146p. Tese (Livre-Docência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- [3] GÖNEN, T.; FOOTE, B.L. Distribution system planning using mixed integer programming. Proc. IEE, v.128, Part C, n.2, p.70-9, Mar. 1981.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Gönen, T. and Ramirez-Rosado, I. J., Pseudo-dynamic planning for expansion of power distribution systems, **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol. PWR6-6, n° 1, February 1991, pp. 245-254.
- [7] KAGAN, N. Configuração de Redes de Distribuição Através de Algoritmos Genéticos e Tomada de Decisão Fuzzy. São Paulo, 1999. Tese (Livre-Docência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- [8] OLIVEIRA, C.C.B. Configuração de redes de distribuição de energia elétrica com múltiplos objetivos e incertezas através de procedimentos heurísticos. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas, Universidade de São Paulo, 1997.

- [9] 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.
- [10] CRAWFORD, D.M.; HOLD, S.B. A mathematical optimization technique for location and sizing distribution substations and deriving their optimal service areas. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Vol.PAS.94, No2, p230-235, Apr. 1975.
- [11] MASUD, E., An interactive procedure for sizing and timing distribution substation using optimization techniques. **IEEE PES Winter Meeting**, p1281-1286, Feb. 1974.
- [12] BOUCHARD, D.E.; SALAMA, M.M.A.; CHIKHANI, A.Y. Optimal distribution feeder routing and optimal substation sizing and placement using evolutionary strategies. In: CANADIAN CONFERENCE ON ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING, New Scotia, 1994. Proceedings. New Scotia, 1994, p.661-4.
- [13] 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 TRANS. POWER APPAR. AND SYS.** Vol. PAS-101, no. 3, pp. 602-609. 1982.
- [14] KAGAN, N. Electrical Power Distribution Systems Planning Using Multiobjective and Fuzzy Mathematical Programming. Londres, 1992. 215p. Tese (Ph. D.) - Queen Mary & Westfield College, University of London.
- [15] KAGAN, N.; BOVOLATO, M. C. Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição Utilizando Programação Matemática Probabilística. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA - CBA, 11, 1996. Anais do CBA.
- [16] F. S. El Hage, N. Kagan, Algoritmos Evolutivos Aplicados ao Problema do Despacho de Potência em Sistemas de Distribuição com Geração Distribuída, **IEEE T&D Latin América**, São Paulo, 2004.
- [17] Eduardo P Bento. Algoritmos Genéticos e variantes na solução de problemas de configuração de Redes de Distribuição. 2004. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade de São Paulo.
- [18] Rakesh Ranjan, B. Venkatesh, D. Das., A new algorithm for power distribution system planning, *International Journal of Electric Power Systems Research*, Vol. 62, No. 1 May 2002, pp. 55 - 65,
- [19] M.-R. Haghifam, M. shahabi : Optimal location and sizing of HV/MV substations in uncertainty load environment using genetic algorithm. In: *Electric Power Systems Research*. 63, 2002, p. 37 – 50.

- [20] Dai Hongwei et al., Optimal Planning of Distribution Substation Locations and Size-Model and Algorithm. *Electric & Energy Systems*, 18, 353-357, 1996.
- [21] Zhou Quan; Sun Caixin; Chen Guoqing; Deng Qun; Liao Ruijin, GIS based distribution system spatial load forecasting and the optimal planning of substation location and capacity, *Power System Technology*, 2002. *IEEE Proceedings. PowerCon 2002. International Conference on* Volume 2, 13-17 Oct. 2002, pp.885 - 889 vol.2.
- [22] KAGAN, N. ; OLIVEIRA, C.c.b. ; SCHIMIT, H. P. ; KAGAN, Henrique . *Aplicação de técnicas de otimização em sistemas elétricos de potência*. 1. ed. São Paulo: , 2005. v. 1.
- [23] Fulkerson D.R. The out of kilter method for minimal cost flow problems. *J. of Appl. Maths.*, 9(1), Mar. 1961.
- [24] MEFFE A., de OLIVEIRA C.C.B., *CLASSIFICATION TECHNIQUES APPLIED TO ELECTRICAL ENERGY DISTRIBUTION SYSTEMS*, Cired 18th International Conference on Electricity Distribution, June 2005.
- [25] Kagan, N. et al - *INTERPLAN – Uma Ferramenta para o Planejamento Integrado de Sistemas de Distribuição de Alta, Média e Baixa Tensão*, **IEEE T&D Latin America**, São Paulo, 2004.
- [26] Goldberg, D E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc. USA, 1989.
- [27] OLIVEIRA, C C B; SCHMIDT, H P; KAGAN, N; ROBBA E J. *Introdução a Sistemas de Potência*, Editora Edgard Blücher Ltda, 1996.
- [28] MONTICELLI, A. *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*, Editora Edgard Blücher Ltda, 1983.
- [29] HAIR, Joseph et al. *Multivariate Data Analysis*. Editora Prentice Hall, New Jersey, 1998.
- [30] MOORI, Roberto, MARCONDES, Reynaldo e AVILA, Ricardo. *Qualidade de Serviços aos Clientes: Estabelecimento de prioridades com a utilização da cluster analysis*. **Anais do XXIV ENANPAD**, Florianópolis, 2000.
- [31] MALHOTRA, Naresh K. *Pesquisa de Marketing: uma orientação aplicada*. Editora Bookman, Porto Alegre, 2001.
- [32] CIA, Josilmar, GUARITA, Celeste e PEDOTE, Cristiane. *Mercado Acionário Brasileiro: Um estudo de comportamento das ações com o uso de cluster analysis*. **Anais do XXIII ENANPAD**, Foz de Iguaçu, 1999.