

**XIV SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

**PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO  
UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS**

MARCELO ROCHA NEVES  
LIGHT- SERVIÇOS DE ELETRICIDADE S/A

**Palavras-chave:** sistemas de distribuição, expansão, algoritmos genéticos, planejamento

**Foz do Iguaçu, 19 a 23 de novembro de 2000**

# 1.INTRODUÇÃO

O planejamento da expansão de redes de distribuição vem aumentando sua importância para as empresas distribuidoras de energia elétrica bem como para os consumidores. A qualidade e confiabilidade dos serviços tornou-se de muita importância para as partes. Esse planejamento visa atingir, principalmente, os seguintes objetivos: redução de perdas, menor custo de distribuição e confiabilidade do sistema.

Tendo em conta que grande parte dos custos globais da eletricidade derivam dos custos de distribuição, torna-se óbvio que, mesmo uma pequena melhoria na eficiência através de melhores métodos de planejamento da expansão, terá uma influência econômica considerável.

O Problema do Planejamento da Distribuição (PPD) tem-se revelado um problema de resolução extremamente complexa especialmente devido às suas características multiobjetivo.

Muitos modelos destinados à solução deste problema foram propostos ao longo dos últimos anos. Grande parte baseia-se em uma abordagem estática, obtendo-se uma solução para um conjunto fixo de dados. Estudos em planejamento dinâmico, considerando a evolução das cargas ao longo do tempo e conseqüentes alterações topológicas nas redes, não têm tido muito sucesso quando aplicados a redes de tamanho real. Os modelos matemáticos em que se baseiam estas técnicas são muito pesados ou ocultam determinados aspectos de projeto que os engenheiros de planejamento consideram importantes nos sistemas de distribuição.

Atualmente, vem sendo desenvolvida uma nova técnica algorítmico-matemática baseada na evolução natural dos organismos, conhecida como Algoritmos Genéticos(AG). Esta técnica, já com algumas aplicações conhecidas em diversas áreas de considerável relevância em sistemas de energia, possui características inovadoras não compartilhada pelas metodologias clássicas até o momento propostas.

Este trabalho procura verificar a eficácia dessa nova ferramenta no planejamento de sistemas de distribuição, visando testar o seu uso na resolução dos seguintes problemas:

- Modelagem adequada pelo algoritmo genético para os problemas de planejamento da distribuição.
- Desenvolvimento de algoritmo para redes de tamanho real.
- Manter as configurações típicas de sistemas de distribuição.
- Verificação de vantagens do novo método sobre os existentes.

No desenvolvimento desse trabalho iremos confirmar que o AG atende as condições acima. Verificaremos que o método proposto permitirá a análise de problemas multiobjetivos e, ao contrário de muitas das abordagens propostas anteriormente, é suficientemente flexível para as diversas características e condições de ordem prática, tais como:

- A possibilidade de desclassificação de uma linha num determinado estágio, permitindo o seu uso num estágio posterior.
- A possibilidade de um novo nó ser abastecido por um outro, também novo.
- Consideração de fatores de qualidade de serviço como, por exemplo, quedas de tensão nos nós.

## 2.TEXTO

### 2.1. INTRODUÇÃO

Com o rápido aumento do consumo de energia elétrica, o problema do planejamento da expansão dos sistemas de distribuição tem-se revelado como um dos mais importantes para as companhias distribuidoras, tendo em conta os importantes investimentos que são necessários nessa área.

Os estudos de expansão são baseados no sistema existente, em previsões de consumos futuros, extensos cálculos econômicos e elétricos e na experiência do profissional que planeja. No entanto, o desenvolvimento de estudos mais elaborados com um número maior de projetos alternativos e o uso de modelos matemáticos e técnicas de otimização podem melhorar significativamente as soluções tradicionais adotadas pelo projetista. Para um determinado sistema de distribuição, os níveis de consumo presentes são conhecidos e os níveis futuros podem ser previstos para um estágio (um ano) ou para vários

estágios usando-se geralmente taxas de crescimento estatísticas do sistema. Consequentemente, a aplicação dos AG's consiste em planejar a expansão do sistema de distribuição (para um ou mais estágios), de acordo com a disponibilidade de dados e com o interesse da companhia distribuidora. Os itens que deverão ser satisfeitos são:

a) Economia

Encontrar o menor custo de construção das novas linhas/ramais possível.

b) Finalidade

Procura-se melhorar a confiabilidade do sistema de distribuição de energia, minimizando o corte de carga, traduzido em índices como DEC e FEC.

c) Radiabilidade

Os sistemas de distribuição geralmente possuem configuração radial.

e) Qualidade de Serviço

Além dos aspectos relacionados com a qualidade do sistema, existem outros fatores de qualidade importantes no planejamento dentre os quais se destacam:

- Impacto ambiental;

- Desvios de frequência;

- Presença de harmônicos e outros tipos de poluição na forma de onda;

- Flutuações no valor da tensão no consumidor.

Apesar de todos estes fatores desempenharem um papel importante no planejamento de redes de distribuição, uma atenção especial será dada ao problema referente às quedas de tensão.

O objetivo econômico é, em geral, conflitual com queda de tensão e seletividade. De fato, um melhor desempenho do sistema é geralmente atingido através de investimentos elevados. Por outro lado, investimentos baixos conduzem a uma fraca eficiência do sistema e, eventualmente, elevados valores de corte de carga.

Não é difícil, então, compreender que nos encontramos diante de um problema de elevada complexidade que deriva, fundamentalmente, de três fatores:

a) Trata-se de um problema multiobjetivo.

b) Muitas das variáveis a considerar são discretas .

c) Há a necessidade do período de planejamento ser dividido em várias fases .

## **2.2. DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS**

Como consequência desta complexidade, o problema do planejamento da distribuição (PPD) é um problema de grandes dimensões mesmo para sistemas de médio porte. Por este motivo e, tendo em conta as limitações em termos de tempo e de velocidade dos atuais processadores, a resolução direta e completa dos problemas do planejamento da distribuição torna-se lenta para sistemas de dimensão real.

No sentido de ultrapassar esta limitação diversas abordagens ao problema estão sendo propostas nos últimos anos. Estas abordagens, distinguem-se entre si, pelas metodologias e algoritmos utilizados e simplificações introduzidas no método.

### **2.2.1. Horizonte de Planejamento**

O horizonte de planejamento pode ser dividido em um ou vários estágios. Em geral, um estágio corresponde a um ano no plano de expansão. Nosso estudo visa o planejamento acumulado para 5 estágios ,ou seja, um horizonte de 5 anos de planejamento.

### **2.2.2. Perdas de Energia Ativa**

O custo relacionado com perdas de energia ativa constitui a maior parcela dos chamados custos variáveis de operação. Muitas vezes, e de acordo com o custo capitalizado das perdas, é possível que a capacidade ótima da linha seja determinada por condições econômicas (de operação) ao invés de limites técnicos.

Este custo é modelizado de várias maneiras e graus de precisão pelos diversos autores. Basicamente, os modelos podem ser divididos em três grupos de acordo com a maneira de encarar este fator:

a) Os modelos que ignoram os custos relacionados com as perdas de energia [23] .

b) O grupo mais geral de modelos, que encaram o custo das perdas de energia como um custo adicional nas linhas de distribuição e subestações ([7], [6] e [4]).

c)Os modelos que não incluem os custos das perdas na formulação mas, no entanto, calculam este custo a posteriori, na obtenção do custo global do sistema[23].

### **2.2.3. Radiabilidade**

O planejador pode estar interessado em encontrar uma solução que possua características radiais dependendo da localização geográfica da rede e dos critérios da companhia distribuidora, normalmente relacionados com a segurança do serviço. Por questões de confiabilidade é comum as redes de distribuição (especialmente urbanas) apresentarem estruturas radiais. Assim são permitidas reconfigurações do sistema em caso de contingência (por exemplo, a saída de serviço de uma linha ou transformador). A introdução de restrições relacionadas com a radiabilidade na formulação do PPD aumenta consideravelmente a complexidade do mesmo. Em nosso estudo achamos melhor impor a condição de radiabilidade do sistema através da sua topologia existente, fornecendo como opções linhas que obrigatoriamente sejam radiais. Na prática, um novo nó será ligado aos nós mais próximos.

### **2.2.4. Queda de Tensão**

O nível de tensão no consumidor é determinado pela tensão na subestação e pelas quedas de tensão nas linhas e transformadores, variando com flutuações nos níveis de consumo. Normalmente, dividem-se as flutuações na tensão em dois grupos: flutuações rápidas e lentas. Do ponto de vista de planejamento de sistemas de distribuição estaremos apenas interessados nas flutuações lentas. As flutuações lentas não podem ser notadas imediatamente, sendo causadas, principalmente, por variações graduais nos consumos e por flutuações na tensão nas subestações. Este tipo de flutuação tem um efeito considerável na eficiência e tempo de vida útil dos equipamentos dos consumidores.

Normalmente é imposto um limite máximo de desvio em relação à tensão nominal (1 pu) nas flutuações de tensão das redes de distribuição.

A flutuação lenta de tensão têm, então, uma grande influência na qualidade de serviço e, conseqüentemente, é um fator a considerar no planejamento e na operação dos sistemas de distribuição.

### **2.2.5. Conectividade**

Obrigatoriamente todo sistema elétrico deve ser conexo. Em nosso estudo colocamos a condição de conectividade vinculada ao valor singular mínimo da matriz Jacobiana.

### **2.2.6. Construção de Novos Ramais**

A construção dos novos ramais deve obedecer a um critério previamente estabelecido. Esse critério geralmente depende de muitas variáveis, tais como: melhores rotas, queda de tensão, confiabilidade, perdas de energia e outros.

### **2.2.7. Outras Considerações**

Para o nosso estudo procuramos colocar as soluções vinculadas ao arruamento existente a fim de possibilitar acesso para manutenção e reparo das novas linhas.

### **2.2.8. Análise Multiobjetivo**

A grande maioria dos modelos revistos ignora implícita ou explicitamente as características multiobjetivas do PPD. Modelos mais recentes [6], correspondendo a uma evolução no sentido da aceitação dos princípios da análise multiobjetiva no planejamento de sistemas de distribuição, procuram incluir explicitamente determinados aspectos (economia, confiabilidade, impacto ambiental) simultaneamente no processo de otimização.

### **2.2.9. Incertezas**

Determinados fatores que influenciam no planejamento dos problemas de distribuição possuem uma natureza incerta, como exemplo podemos citar a carga. Essas incertezas podem ser tratadas por técnicas probabilísticas ou lógica fuzzy.

Nos estudos de planejamento em longo prazo de sistemas de distribuição, fatores ligados à incerteza são extremamente relevantes principalmente quando referenciados ao crescimento de carga.

### **2.2.10. Confiabilidade**

Uma das principais preocupações no planejamento de um sistema de distribuição é a sua confiabilidade. Índices de confiabilidade baixos resultarão em valores elevados de cortes de carga,

conduzindo a elevados custos indiretos de operação. A fiscalização procura penalizar as empresas que não cumprirem seus compromissos junto aos clientes.

Alguns autores têm proposto modelos de planejamento, onde são integradas considerações relacionadas com a confiabilidade dos sistemas. Alguns modelos [18] sugerem, depois de obtida uma solução radial ótima, a construção de linhas para o fechamento de anéis (de acordo com determinados critérios técnicos e econômicos) com vista a permitir reconfigurações da rede em caso de contingência, aumentando-se assim a confiabilidade da rede. No entanto, este procedimento não conduzirá necessariamente à estrutura malhada ótima.

### **2.3.REVISÃO DA LITERATURA**

Um dos primeiros métodos de planejamento de sistemas de distribuição foi o critério das quadrículas e que até pouco tempo ainda era utilizado tanto nas empresas como no âmbito universitário.

Adams em 1973[23], apresenta um modelo dinâmico para o planejamento de subestações utilizando programação dinâmica e algoritmos de fluxo de cargas e no ano seguinte para expansão de redes. No mesmo ano Masud[23] apresenta um modelo estático para o planejamento da localização de subestações. Em 1978 expande o modelo para o universo multitemporal. Ambos os modelos consideram o sistema das linhas apenas em termos de transferência de cargas entre subestações que, como já foi referido, constitui uma representação demasiadamente simplista da rede de distribuição. Em 1977 Hindi e Brameller propõe um modelo estático onde as condições de radialidade são impostas através de um interessante procedimento heurístico de abertura de anéis. Este modelo inclui um conjunto de opções de modernização bastante complexo e resolve simultaneamente o problema do planejamento de subestações e o problema do planejamento das linhas de distribuição. Em 1979, Backlund e Bubenko [1] apresentam um dos modelos estáticos mais importantes desenvolvidos até hoje, aplicado com bastante sucesso na planificação de sistemas reais. O objetivo do modelo é determinar, com o auxílio do computador, a estrutura ótima hierárquica de um sistema de distribuição. Este modelo compreende duas fases:

- 1 – Uma planificação geral do abastecimento de energia a uma determinada área;
- 2 – Uma planificação detalhada da rede, baseada nos consumos dos utilizadores. Este modelo, utilizando metodologias heurísticas de otimização, possui as opções de modelização básicas tais como; quedas de tensão, radiabilidade, perdas de energia, etc. No mesmo ano Oliveira e Miranda [2] introduzem, pela primeira vez nos modelos de planejamento de sistemas de distribuição, aspectos relacionados com confiabilidade diretamente na formulação da função objetivo.

Gonem e Foote em 1981 desenvolvem um modelo estático muito completo. Este modelo inclui a maior parte das opções de modelização básicas. No entanto, considerações relacionadas com radialidade e quedas de tensão não são incluídas neste modelo. Como exemplo de uma metodologia pseudo-dinâmica refere-se o trabalho de 1982 de Sun Farris que apresenta um modelo onde o planejamento global é dividido em duas fases: na primeira fase, um modelo estático é aplicado no sentido de se obter uma solução que satisfaça as condições correspondentes ao final do horizonte de planejamento, considerando o conjunto completo de componentes da rede (linhas, subestações, etc...) que seriam construídos durante o período do estudo. Nesta fase o período do estudo é utilizado com um estágio único. Na segunda fase, o modelo estático é aplicado a cada rede intermediária expandida do estágio precedente, sendo escolhidos componentes da rede do conjunto que foi selecionado na primeira fase. Em 1983 Fawzi Ali desenvolve um método estático para a otimização do sistema global, onde são incluídas todas as opções de modelização básica exceto o cálculo da dimensão ótima para as subestações. As condições de radialidade são impostas no processo computacional em si. Por seu lado, as quedas de tensão não são modelizadas diretamente, mas, são verificadas no decorrer do algoritmo. Gonem e Ramitez Rosado apresentam em 1986 [4] um modelo multitemporal bastante completo, que resolve simultaneamente o problema da localização, dimensão e altura de construção de subestações de distribuição e o problema da expansão da rede. Este modelo inclui várias opções de modelização, tais como: perdas de energia e custo fixo e variável das linhas e subestações. Permite também inclusão na formulação de restrições relacionadas com radialidade e quedas de tensão. No entanto a inclusão destas restrições parece limitar a utilização deste modelo a sistemas de pequenas dimensões.

Em 1990 Kagan e Adams apresentam um método baseado na técnica de decomposição de Benders e algumas das suas variantes, no entanto não são apresentados exemplos práticos de aplicação do método em sistemas de dimensão real. Em 1991 K.Nara [7] propõem um método aproximado multiestágio baseado numa metodologia de decomposição pseudo-dinâmica destinado a resolver problemas de grande dimensão. O problema global (n estágios) é dividido em n problemas de um estágio

que são resolvidos através de um algoritmo de otimização referido num trabalho anterior [5]. Em 1993 Kagan e Adams [6] procuram resolver o problema de planeamento da distribuição estendendo a capacidade de modelos existentes a uma análise multiobjetiva, incluindo incertezas. Neste trabalho o problema é formulado num enquadramento de programação matemática; lógica fuzzy. Este modelo permite representar objetivos múltiplos, dados imprecisos e várias opções de modernização incluídas em modelos anteriores.

Outros métodos foram apresentados [19], [20], [21] e [22] nos últimos anos, porém sempre utilizando a mesma linha de pesquisa desenvolvida dos métodos já descritos.

## 2.4. CONCLUSÕES

Neste capítulo apresentou-se os estudos do planeamento da expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica e uma revisão da literatura existente sobre o assunto.

Ficou claro que este problema envolve uma elevada complexidade, quer ao nível da formulação, quer ao nível da resolução. Esta complexidade deriva fundamentalmente da sua característica multiobjetiva e do fato de envolver um número elevado de variáveis (na maioria discretas). Surge ainda a necessidade de se efetuar uma análise multitemporal, onde as decisões tomadas num determinado estágio se repercutem nos estágios posteriores. Por outro lado, a inclusão, na formulação, de diversas opções de modelação (radialidade, quedas de tensão, etc...) aumenta consideravelmente a complexidade matemática do problema, introduzindo-se características normalmente consideradas indesejadas do ponto de vista de resolução, designadamente: não linearidade, descontinuidade, e não conectividade. Estas características, aliadas às limitações de capacidade de memória e processamento dos computadores, tornam este problema quase intratável usando metodologias e algoritmos de otimização tradicionais (programação dinâmica, programação inteira mista, decomposição, etc.).

## 2.5. APLICAÇÃO DE ALGORITMO GENÉTICO NO PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO (PESD).

Neste item apresentaremos as adaptações necessárias à aplicação de AG no PESD bem como será formulada, a hipótese e simplificação de maior relevância. As equações necessárias ao seu desenvolvimento, também serão apresentadas neste capítulo.

### 2.5.1. Linhas e Barras Existentes

A configuração inicial da rede é conhecida e, por hipótese permanece invariante durante a solução do problema. O fluxo de cargas nas linhas é permitido em qualquer direção exceto para a barra swing cujo fluxo é unidirecional e sempre no sentido da barra swing para o sistema.

### 2.5.2. Novas Barras

As novas barras do sistema serão determinadas pelos seguintes critérios:

1. Número de novas barras.

Para determinação do número de barras a serem acrescentadas, será utilizada a taxa de crescimento da região em que o sistema está localizado. Esta taxa possui duas componentes a considerar:

- Crescimento do número de consumidores por atividade.
- Crescimento do consumo dos consumidores existentes.

As atividades foram divididas em: Industrial, Comercial, Residencial e Clientes de Média Tensão. A taxa de crescimento utilizada foi à ponderação dessas taxas dada pela seguinte formulação:

$$T = \frac{I * CI + C * CC + R * CR + MT * CMT}{I + C + R + MT} \quad (2.1)$$

Onde,

- I: Crescimento percentual do nº de unidades industriais.  
 CI: Crescimento percentual do consumo das unidades industriais instaladas.  
 C: Crescimento percentual do nº de unidades comerciais.  
 CC: Crescimento percentual do consumo das unidades comerciais instaladas.  
 R: Crescimento percentual do nº de unidades residenciais.  
 CR: Crescimento percentual do consumo das unidades residenciais instaladas.  
 MT: Crescimento percentual do nº de unidades de média tensão.

CMT: Crescimento percentual do consumo das unidades de média tensão instaladas.

Taxa acumulada:

$$TAA = \left( \frac{TAT}{100} + 1 \right) * TANT \quad (2.2)$$

Onde,

TAA: Taxa acumulada de crescimento do ano em estudo.

TAT: Taxa do ano em estudo.

TANT: Taxa acumulada do ano anterior ao ano de estudo.

Esta nova taxa foi aplicada sobre o número de barras existentes do sistema inicial, encontrando-se o novo número de barras. A diferença entre o número de barras novas e barras existentes determinou o acréscimo de barras por circuitos.

Onde,

$$BN = \left[ BE * \left( \frac{TAA - TAANT}{100} + 1 \right) \right] - BE \quad (2.3)$$

BN: Número de barras novas.

BE: Número de barras existentes por circuito.

TAANT: Taxa acumulada do ano referência para o acúmulo

## 2. Carga das Novas Barras (CNB)

As cargas dessas barras foram encontradas calculando-se a média aritmética das cargas referente às barras existentes (BE) e que são dadas como possíveis caminhos de ligação.

$$CNB = \left( \frac{\sum_{i=1}^n P, Q}{n} \right) \quad (2.4)$$

Onde,

P: Potência ativa da barra

Q: Potência reativa da barra

A tabela referente às taxas de crescimento de um sistema possui projeção para alguns anos. Procuramos formular essas taxas e encontrar uma função que a projete para anos posteriores com um erro aceitável. Utilizamos o critério de regressão linear para encontrar a nova reta ajustada. A escolha do critério foi devido à alta linearidade existente nas taxas estatísticas de crescimento do sistema

### 2.5.3. Linhas Potenciais

As linhas potenciais são as linhas que podem ligar as novas barras ao sistema existente. Essas Linhas são determinadas pelos seguintes critérios:

-Número de Linhas Novas.

Para este item adotamos a hipótese de que cada barra nova terá o mesmo número de linhas potenciais.

-Comprimento das Linhas Novas

Neste item foi adotado o mesmo critério do item 2.5.2, calculando-se o acréscimo de quilômetros por circuito da seguinte forma:

$$AKm = \left[ KmTC * \left( \frac{TAA - TAANT}{100} + 1 \right) \right] - KmTC \quad (2.5)$$

Onde,

Akm: Acréscimo de quilômetros por circuito

KmTC: Comprimento total das linhas de cada circuito dada pela seguinte formulação:

LiC: Comprimento de cada ramal da linha.

$$KmTC = \sum_{i=1}^n LiC \quad (2.6)$$

O acréscimo de comprimento por ponto( $akmp$ ) foi obtido pela seguinte relação:

$$Akmp = Akm / BN \quad (2.7)$$

Os comprimentos das novas linhas são calculados atribuindo primeiramente um fator de comprimento. A cada linha potencial é atribuído um fator de proporção que depende da proximidade do novo ponto aos pontos existentes que potencialmente poderá ser ligado. As linhas recebem os seguintes fatores( $f$ ): X(Muito próxima), 2X(Próxima), 3X(Distante) e 4X(Muito distante)

Somam-se os fatores das linhas potenciais e encontra-se uma constante por ponto( $Kc$ ). O fator de proporção( $Fp$ ) é encontrado pela formulação :

$$Fp = Akmp / Kc \quad (2.8)$$

O comprimento de cada linha é obtido da seguinte forma:

$$CL = Fp * f \quad (2.9)$$

Onde,

CL: Comprimento de cada linha

#### 2.5.4. Horizonte de Planejamento

O horizonte de planejamento significa a quantidade de anos que queremos projetar o crescimento do circuito. Geralmente utiliza-se 5, 10 ou 15 anos. Nosso estudo não fará simulações anuais e sim diretas para o período de 5 anos.

#### 2.6. ELEMENTOS DO AG

A utilização de AG's na solução de um problema real exige a definição de uma série de elementos os quais definem a particularização do algoritmo para a aplicação em questão. No caso do PESD, a abordagem do trabalho, utilizou as seguintes definições:

##### 2.6.1. Codificação da Solução

O método utilizado foi o de codificação binária. A relação entre a cadeia binária e as variáveis do problema foram estabelecidas da seguinte maneira:

- A cada nó da rede existente, no qual podem se conectar novas linhas ou subestações foi atribuído um número de “bits” representando as possíveis novas linhas a serem incluídas na expansão(linhas potenciais).
- O número de “bits” associado a cada nó foi definido como o menor possível necessário para representar as diversas opções de expansão a partir daquele nó.

Para ilustrar o método de codificação apresentamos a seguir o cromossomo relativo ao exemplo ilustrativo da figura 2.1:

Nó:	2	3	4	6	7	8
	0	1	0	0	1	1
		0		1	0	0
					0	1

##### 2.6.2. Função Aptidão

A função aptidão desse trabalho levou em consideração parcelas relativas a:

- Custo dos Novos Ramais

O custo dos novos ramais ( $C_R$ ) é obtido pela seguinte formulação:

$$C_R = CL * V_R \quad (2.10)$$

Onde,

CL= Comprimento do ramal.

$V_R$ = Custo final por quilômetro construído.

- Perdas de energia ativa

As perdas de energia ativa devem obedecer às tolerâncias estabelecidas por lei ou critério da Companhia distribuidora e serão calculadas pelo fluxo de potência.

- Queda de tensão

Os limites de queda de tensão também devem respeitar os limites estabelecidos por lei ou pela



Companhia distribuidora e serão calculados pelo fluxo de potência.

A função aptidão utilizada é constituída do somatório ponderado de parcelas correspondentes aos itens acima referidos:

$$F = \lambda C_R^{-1} + \alpha P_L^{-1} + \beta \Delta V^{-1} \quad (2.11)$$

Onde,

$C_R$  = Soma dos custos de novos ramais (R\$)

$P_L$  = Perdas ativas totais (pu)

$\Delta V = |V_K^{esp} - V_K|$  onde  $V_K^{esp}$  e  $V_K$  são os valores especificados e calculados nas barras da rede, respectivamente (pu).

$\lambda$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  = ponderações estabelecidas experimentalmente com a finalidade de manter todos os membros na mesma ordem de grandeza, influenciando igualmente na função objetivo ou direcionando a influência para um determinado termo.

### 2.6.3. Operadores Genéticos

Os operadores genéticos utilizados neste trabalho são:

- Seleção: proporcional utilizando a “regra da roleta”;
- Cruzamento: uniforme;
- Mutação: taxa de mutação fixa.

### 2.6.4. Critério de Parada

O critério de parada utilizado, foi pelo número de gerações.

## 2.7. IMPLEMENTAÇÃO

O método para o PESD descrito neste trabalho foi implementado em dois módulos: algoritmo genético e avaliação da função aptidão. O módulo correspondente ao AG tem uma estrutura semelhante aquela descrita [10] para implementação do AG canônico. O módulo relativo à aplicação da função aptidão está baseado na solução de um caso de fluxo de potência pelo método de Newton Raphson para cada solução proposta pelo AG. A conectividade da solução proposta pelo AG é verificada calculando-se o valor singular mínimo da Matriz Jacobiana da 1ª iteração: caso esse valor seja menor que uma tolerância previamente definida, assume-se que a rede é desconexa e, portanto, essa solução é descartada pela atribuição de um valor adequado à função aptidão. Na figura 2.2 é apresentado um fluxograma do método utilizado.

## 2.8. SISTEMAS DE POTÊNCIA EM TESTES

O método proposto foi aplicado em um dos sistemas da Empresa Concessionária de Energia Elétrica LIGHT S.E.S.A, em particular a Subestação (SE) de Itapeba, situada no Recreio dos Bandeirantes, Rio de Janeiro, Brasil. A SE Itapeba foi escolhida pelo fato de suprir uma região que possui muito espaço físico para crescimento do sistema bem como ser possuidora do maior crescimento de carga atualmente de todo o sistema Light. A SE Itapeba possui 7 (SETE) circuitos do tipo: residencial, industrial, misto, aéreo e subterrâneo. Os circuitos são: Arena (1), Nápoles (2), Benvindo (3), Martins (4), Américas (5), Gilka (6) e Sernambi (7).

### 2.8.1 Valores Considerados

a) Coeficientes da Função Aptidão:

Os coeficientes da função aptidão são mostrados na tabela 2.1, neste caso possui os coeficientes referentes ao custo de novos ramais, queda de tensão e perda de energia.

b) Parâmetros Genéticos Utilizados:

Os parâmetros genéticos utilizados são mostrados na tabela 2.2

c) O gráfico evolutivo é mostrado na figura 2.3

### 2.8.2. Resultados Obtidos:

a) Novas linhas obtidas:

Os custos referentes às linhas selecionadas pelo AG (novas linhas), encontram-se na tabela 2.3.

b) Custo Total do investimento: R\$ 153.155,87 (Novas linhas)

c) Queda de Tensão

A queda de tensão percentual do novo sistema, já acrescido das novas linhas, encontra-se na tabela 2.4.

d) Perdas de Energia Ativa

A perda de energia percentual do novo sistema ,já acrescido das novas linhas, encontra-se na tabela 2.5

Observação: Vale ressaltar que os valores encontrados para o sistema novo, já são com a inclusão dos novos ramais e cargas.Sem a utilização do AG, os valores encontrados foram, em média, 30% maior.

## **2.9. OUTRAS SIMULAÇÕES**

Outras simulações foram realizadas no intuito de testar a sensibilidade da função objetivo quando existir uma maior variação nos parâmetros genéticos. Os novos parâmetros genéticos utilizados, encontram-se na tabela 2.6 e os novos resultados obtidos para a queda de tensão, perda de energia e custo de construção dos novos ramais, encontram-se nas tabelas 2.7, 2.8 e 2.9, respectivamente.

## **2.10. ANÁLISE DOS RESULTADOS**

Na simulação realizada ,quando o número de elementos da população inicial e o número de gerações foram de 30, atingimos a melhor performance possível, obtendo o arranjo de melhor otimização. Quanto ao custo de construção dos ramais foi obtido uma redução de aproximadamente 8% em relação a simulações sem a utilização de AG e os demais parâmetros também tiveram uma considerável redução. O tempo de computação gasto foi de aproximadamente 20 horas.

Com o objetivo de confirmar os resultados obtidos, foram feitas mais cinco simulações alterando-se os parâmetros genéticos. Os resultados obtidos não foram melhores que os apresentados, confirmando assim que os valores dos parâmetros utilizados foram os melhores ajustados.

As simulações efetuadas mostraram que o AG possui uma excelente performance para a resolução do PPD. As curvas de evolução dos valores médios e máximos de adequabilidade mostram a ótima evolução do algoritmo, atingindo desta forma os valores esperados. Podemos considerar que o trabalho satisfaz na íntegra as expectativas da LIGHT e servirá de objeto para outros estudos.

## **3.CONCLUSÕES E SUGESTÕES**

Neste trabalho foram apresentados os resultados obtidos com a implementação de um método de solução do problema de expansão de sistemas de distribuição baseado em Algoritmo Genético(AG). Tendo em vista as dificuldades relatadas na literatura com relação à aplicação de técnicas convencionais de programação matemática a este problema, a utilização de AG abre um novo campo de investigação na área de métodos de planejamento de sistemas de distribuição.

O trabalho foi orientado no sentido de resolver problemas reais de expansão de redes de distribuição. Por esta razão foram utilizados dados de redes de distribuição primária da Light S.E.S.A. A utilização dessas redes exigiu um longo levantamento de dados, pois os dados disponíveis não se encontravam na forma adequada para o estudo.

Os métodos de solução propostos foram implementado no ambiente Matlab visando um menor tempo de desenvolvimento. Os resultados obtidos indicaram que essa ferramenta apresenta limitações com relação ao tempo de computação para o caso de redes de grande porte. Foi observado que, na implementação realizada nesse trabalho, o desempenho é adequado para redes de até 70 barras. Deve-se ressaltar que uma das razões do tempo de computação elevado está na forma de verificação da conectividade da rede.

Os resultados obtidos nos testes com sistemas reais indicaram que a metodologia apresenta grande potencial para a solução do problema de expansão de sistemas de distribuição. Nos vários testes efetuados com diferentes redes hipotéticas e reais, o método produziu soluções com redução substancial do custo de instalação de novos alimentadores e subestações em relação a soluções tentativas baseadas em critérios qualitativos. Devido à não disponibilidade de ferramentas baseadas em outras técnicas de otimização, não foi possível efetuar uma comparação das soluções obtidas pelo método proposto nesta tese com outros métodos existentes na literatura.

O AG permite a obtenção de um conjunto de boas soluções (em vez de uma solução única) , permitindo ao planejador executar um conjunto de valiosos exercícios de comparações e análises.

Como sugestão para trabalhos futuros, são sugeridos os seguintes tópicos em relação aos quais o método proposto neste trabalho pode ser aperfeiçoado:

- Uma forma mais eficiente para testar a conectividade da rede baseada em técnicas de busca em

grafos.

- Inclusão da incerteza na previsão do crescimento da carga baseada em conceitos de conjunto "fuzzy".
- Utilização de técnicas de otimização multiobjetivo incorporadas aos AGs para melhor tratamento dos múltiplos objetivos do problema.

## 4.ANEXOS

### 4.1.ANEXOS- FIGURAS

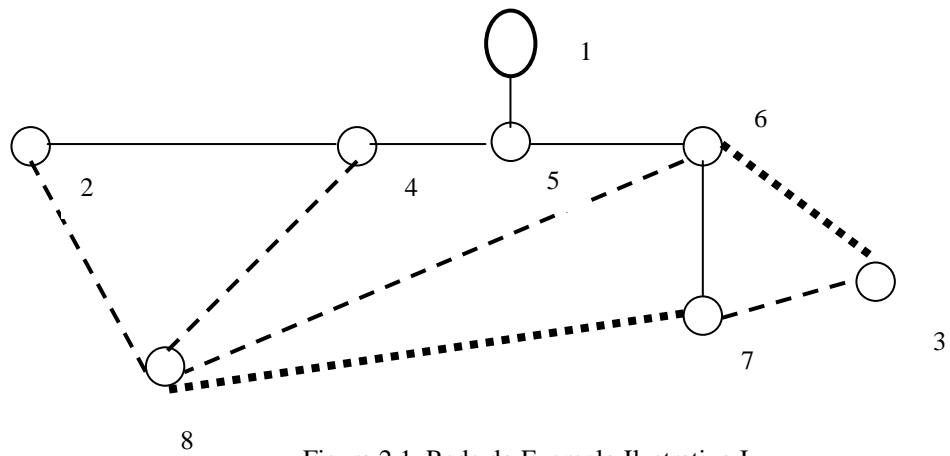


Figura 2.1. Rede do Exemplo Ilustrativo I

Legenda fig.2.1

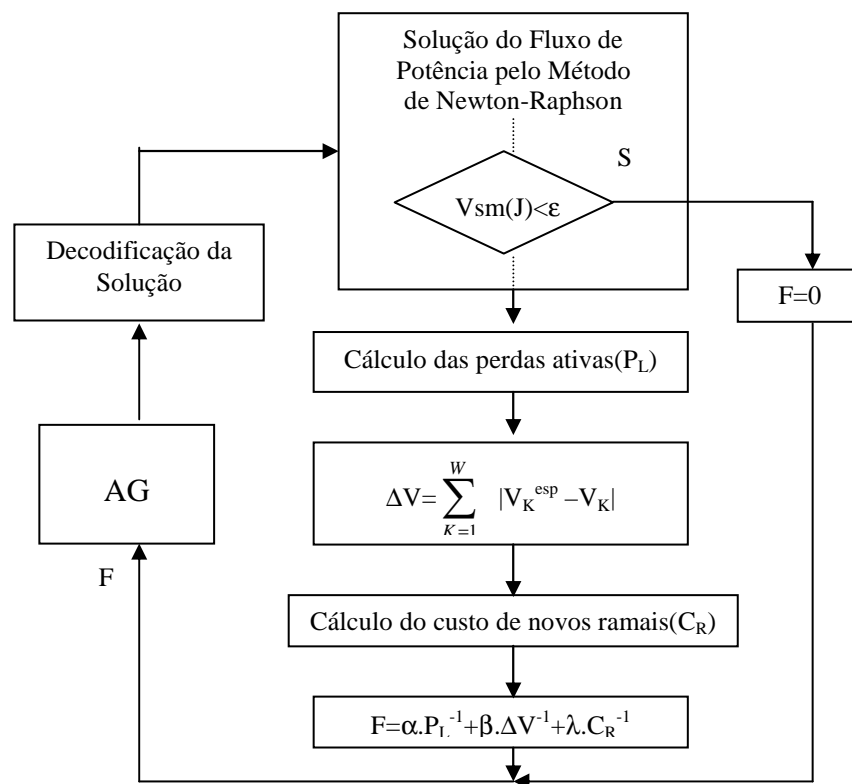
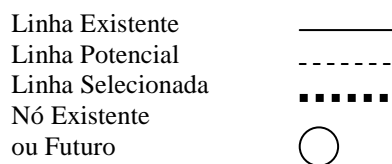


Figura 2.2- Fluxograma do Método de PESD

Legenda fig. 2.2:

$V_{sm}(J)$ =Valor singular mínimo,  $V_K^{esp}$ (1,0 pu),  $\epsilon$ (Tolerância referencial),  $V_K$ (tensão em pu no barramento),  $P_L$ ( Perdas Ativas Totais),  $C_R$ (Custos novos ramais),  $\Delta V(| V_K^{esp}-V_K |)$ .

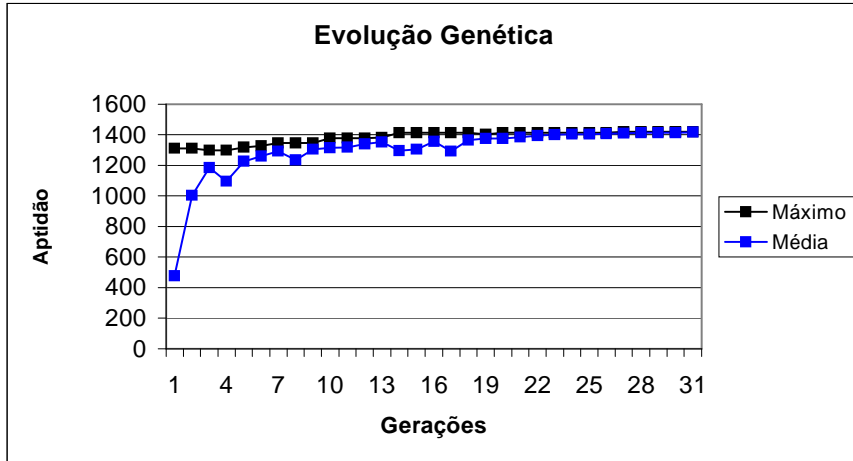


Figura 2.3-Evolução Genética

#### 4.2.ANEXOS- TABELAS

Tabela 2.1- Coeficientes da Função Aptidão

$\lambda$	$\alpha$	$\beta$
$1*10^8$	$1*10^1$	$1*10^1$

Tabela 2.2- Parâmetros Genéticos

Codificação(Valor)		Bits	Tamanho População	Prob. Cruzamento	Prob. Mutação	Número Gerações
Mínimo	Máximo					
1	4	2	30	90%	0,1%	30

Tabela 2.3-Custo das Novas Linhas

DE	PARA	CUSTO(R\$)
5	221	3.092,35
11	222	1.825,15
12	223	3.650,30
24	224	5.730,79
225	226	3.820,52
28	226	3.820,52
41	227	5.254,16
40	228	5.254,16
44	229	4.378,47
49	230	5.254,16
231	232	11.206,24
80	232	12.451,38
232	233	6.225,69
234	235	6.225,69
99	235	10.672,61
236	237	5.095,83
237	238	5.945,14
160	238	4.458,85
164	239	3.567,08
157	240	4.458,85
241	242	3.603,02
242	243	5.147,17
206	243	7.206,04
195	244	13.101,89
190	245	7.206,04
176	246	4.503,77

Tabela 2.4-Quedas de Tensão

	<b>PERMITIDA</b>	<b>ENCONTRADA</b>
<b>SISTEMA EXISTENTE</b>	7,5 %	2,52%
<b>SISTEMA NOVO</b>	7,5 %	2,70%

Tabela 2.5-Perdas de Energia

	<b>PERMITIDA</b>	<b>ENCONTRADA</b>
<b>SISTEMA EXISTENTE</b>	7 %	1,12%
<b>SISTEMA NOVO</b>	7 %	1,25%

Tabela 2.6 –Outros Parâmetros Genéticos

<b>Simulação</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Bits</b>	<b>Tam.Pop</b>	<b>Prob.Cruz</b>	<b>Prob.Mut.</b>	<b>Nº Ger.</b>
I	1	4	2	30	90%	<b>1,0%</b>	30
II	1	4	2	30	90%	<b>0,5%</b>	30
III	1	4	2	30	<b>70%</b>	0,1%	18*
IV	1	4	2	30	<b>80%</b>	0,1%	30
V	1	4	2	<b>40</b>	90%	0,1%	<b>40</b>

\* : O algoritmo convergiu prematuramente por estagnação (baixa taxa de cruzamento)

Tabela 2.7 –Queda de Tensão Percentual

<b>Simulação</b>	<b>Existente</b>	<b>Novo</b>
I	2,52	3,16
II	2,52	2,85
III	2,52	2,86
IV	2,52	2,90
V	2,52	2,79

Tabela 2.8 –Perda de Energia Percentual

<b>Simulação</b>	<b>Existente</b>	<b>Novo</b>
I	1,12	1,31
II	1,12	1,28
III	1,12	1,28
IV	1,12	1,31
V	1,12	1,25

Tabela 2.9 –Custo do Investimento em Reais

<b>Simulação</b>	<b>Custo</b>
I	181.290,70
II	176.194,75
III	168.628,21
IV	150.306,37
V	153.483,40

## 5.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Y. BAKLUND, J. A. BUBENKO, "Computer-aided distribution system planning", *Electrical Power & Systems*, vol. I, no I, Apr 1979.
- [2] M. F. OLIVEIRA, V. MIRANDA, "Etudes d'optimisation dans les réseaux de distribution comprenant des calculs de fiabilité", *Proceedings of CIRED'79*, s.6, Liège, Belgium, Apr 1979.
- [3] T. BURKHARDT., ET. AL., "Decision making including forecast uncertainties and optimal routing in distribution networks", *Proceedings of CIRED'85*, s.6, Brighton, U.K., Apr 1985.
- [4] T. GÖNEN, I.J.RAMIREZ-ROSADO, "Review of distribution planning models: a model of optimal multistage planning", *IEEE Proceedings*, Vol. 133, Pt. C. No. 7, Nov. 1986.
- [5] K. AOKI., ET. AL., "New approximate optimization method for distribution system planning", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol 5, no. I, Feb 1990.
- [6] N. KAGAN., R. N. ADAMS, "Application of Benders decomposition technique to the distribution planning problem", *Proceedings of the 10<sup>th</sup>. PSCC*, Graz, Austria, Aug 1990, ed. Butterworths, London.
- [7] K. NARA., ET. AL., "Multi-year expansion planning for distribution systems", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol 6, no. 3, Aug 1991.
- [8] D.E. GOLDBERG, "Genetic algorithms in search, optimization and machine learning", 1989 Addison-Wesley.
- [9] J. GREFFENSTETTE, "Conditions for implicit parallelism", Navy Center for Applied Research in Artificial Intelligence, Internal Report, 1991 Washington.
- [10] J. H. HOLLAND, "Adaption in Natural and Artificial Systems", The University of Michigan Press, 1975 Ann Arbor.
- [11] H. DING. ET. AL., "Optimal clustering of power networks using genetic algorithms", *Proc. 3<sup>rd</sup> Biennial Symp, Indust. Elecct. Applications*, Ruston, LA, USA, LA Tech, Univ. 1992.
- [12] V. AJJARAPU. ET. AL., "Application of genetic based algorithms optimal capacitor placement", *Proc. First International Forum on Applications of Neural Networks to Power Systems*, New York, NY, USA,IEEE 1991.
- [13] T. HAIDA. ET. AL., "Genetic algorithms approach to voltage optimization", *Proc. First International Forum on Applications of Neural Networks to Power Systems*, New York, NY, USA, IEEE 1991.
- [14] H. YANG, "Worst case analysis of distribution system harmonics using genetic algorithms", *Proc. IEEE SOUTHEASTCON 92* New York, NY, USA, IEEE 1992.
- [15] H. MORI, "A genetic approach to power system topological observability", *Proc. IEEE International Symp. On Circuits and System*, New York, NY, USA, IEEE 1991.
- [16] K. IBA., "Reactive power optimization by genetic algorithms", *PICA 93*, Phoenix, AR, USA, May 1993.
- [17] X. YIN, N. GERMANY., "Investigations on solving the load flow problem by genetic algorithms", *Electric Power Systems Research*, 22 (1991), 1991 Elsevier.
- [18] V. MIRANDA, "Using fuzzy reliability indices in a decision aid environment for establishing interconnection and switching location policies", *Proc. CIRED'91*, s.6, Liège, Belgium, Apr 1991.
- [19]NARA, K. ET. AL., "Algorithm for expansion planning in distribution systems taking faults into consideration",*IEEE Trans. on Power System*,vol 9, no.1,Feb 1994.
- [20]V. MIRANDA, RANTO, J.V. PROENÇA,L.M., ET. AL.,"Genetic algorithm in optimal multistage distribution network planning ",*IEEE Trans. on Power Systems*,vol. 9,no. 4,Nov 1994.
- [21] I.J.RAMIREZ-ROSADO, R.N.ADAMS," Otimization of the power distribution network design by applications of genetic algorithms",*International Journal of Power and Energy Systems*,vol 15,no. 3,Jun 1995.
- [22] RAMIREZ-ROSADO,I.J,L.AUGUSTÍN, ET. AL.,"Genetic algorithms applied to the design of large power distribution system",*IEEE Trans. on Power Systems*,vol 13,no. 2,May 98.
- [23] PROENÇA.L.M, *Algoritmos genéticos no planeamento da expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica*. M.Sc. dissertação,Universidade do Porto / INESC, Porto, PORTUGAL,1993.

## 6.ENDEREÇO

Engº Marcelo Rocha Neves-M.Sc.COPPE-UFRJ  
LIGHT SERVIÇOS DE ELETRICIDADE S/A  
MARECHAL FLORIANO 168-RIO DE JANEIRO- RJ  
E-mail: [marcelo.neves@lightrio.com.br](mailto:marcelo.neves@lightrio.com.br) ou [mrneves@domain.com.br](mailto:mrneves@domain.com.br)