

# Redução de Perdas Técnicas em Redes de Distribuição Através da Reconfiguração de Redes e Compensação de Potência Reativa

M. A. B. Amora, NESC/UFPA; A. C. Nascimento, NESC/UFPA; U. H. Bezerra, NESC/UFPA; J. N. Garcez, NESC/UFPA; E. M. Amazonas Filho, NESC/UFPA; A. A. Tupiassú, REDE CELPA, G. A. C. Jucá Filho, REDE CELPA, V. Miranda, INESC/PT, M. C. Matos, INESC/PT, J.L.Pinto, INESC/PT

## RESUMO

Este artigo descreve as metodologias implementadas em um ambiente computacional para o planejamento ótimo de redes de distribuição. As metodologias de reconfiguração de redes e a otimização dos valores de capacitores serão utilizadas a fim de reduzir as perdas técnicas do sistema através do uso de uma ferramenta de otimização denominada *Simulated Annealing*. Serão apresentados os resultados das simulações realizadas em alguns alimentadores da rede de distribuição da região metropolitana de Belém, operada pela concessionária CELPA-Centrais Elétricas do Pará visando demonstrar a utilidade e a viabilidade dos programas desenvolvidos.

## PALAVRAS-CHAVE

Redução de perdas ativas; Reconfiguração de redes; Sistemas de distribuição; Otimização; Simulated Annealing.

## I. INTRODUÇÃO

Frente à privatização das empresas de distribuição do setor elétrico brasileiro, a redução de perdas tanto técnicas como comerciais passou a ter uma maior importância para as empresas envolvidas. O surgimento dos DMS – *Distribution Management Systems* também proporcionou às empresas de distribuição a possibilidade de obter uma melhor supervisão e controle da rede de distribuição a partir de algumas funções que antes só existiam no nível de sistemas de transmissão.

Diante desse contexto, as chaves de interconexão (NA -normalmente aberta) que antes só eram operadas em um processo de operação restaurativo do sistema, agora passam a ser chaveadas em uma condição de operação normal com a finalidade de obter a configuração que apresente menor perda técnica do sistema. Os bancos de capacitores

podem ter seus valores de injeção de reativos ajustados, de forma discreta, a fim de reduzir as perdas técnicas e melhorar o perfil de tensão do alimentador para os diversos cenários de carga.

Este trabalho, desenvolvido dentro do programa de pesquisa e desenvolvimento da distribuidora de energia elétrica do Pará (CELPA), apresenta o desenvolvimento de um ambiente computacional para realizar estudos de planejamento de redes de distribuição contendo essencialmente duas rotinas distintas, sendo uma para a reconfiguração de redes e a outra para o cálculo da compensação de potência reativa através de banco de capacitores, ambas visando à redução de perdas ativas.

Devido à natureza combinatória do problema no que diz respeito às diversas opções de configuração da rede e valores de capacitores, métodos denominados meta-heurísticos como *Simulated Annealing* e Algoritmos Genéticos têm apresentados melhores resultados quando comparados aos métodos analíticos.

A minimização de perdas ativas através da reconfiguração de redes vem sendo estudada desde 1975 por Merlin e Back. Pissarra *et al.* [1] desenvolveram um amplo estudo bibliográfico sobre o assunto, destacando desde técnicas que envolviam métodos clássicos como: abertura seqüencial de chaves, troca de ramos até a aplicação de técnicas atuais como: *Simulated Annealing* (SA), computação evolutiva, Redes Neurais, Sistemas Especialistas, entre outras.

Quanto ao estudo da compensação reativa diversos autores podem ser destacados. Ng *et al.* [2] resumiram diversos métodos, podendo ser divididos em: métodos analíticos, métodos matemáticos e métodos baseados em inteligência artificial.

## II. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

A definição do problema de minimização de perdas ativas pode ser resumida por:

$$\min f(x) = \text{Perdas} = \sum_{NR} g_{km} \cdot (V_k^2 + V_m^2 - 2 \cdot V_k \cdot V_m \cdot \cos \theta_{km}) \quad (1)$$

Este trabalho foi apoiado pela CELPA – Centrais Elétricas do Pará, como parte do seu programa anual de P&D, do ciclo 2001-2002.

U. H. Bezerra; J. N. Garcez; A. C. Nascimento; M. A. B. Amora; E. M. A. Filho – São pesquisadores do NESC/UFPA – Núcleo de Energia, Sistemas e Comunicação do Departamento de Engenharia Elétrica e Computação da Universidade Federal do Pará. ([www.ufpa.br/nesc](http://www.ufpa.br/nesc))

V. H. B. P. Miranda; M. A. C. C. Matos, J. L. Pinto – São pesquisadores do INESC-PORTO([www.inescn.pt](http://www.inescn.pt))

A. A. A. Tupiassú; G. A. C. J. Filho – São engenheiros da CELPA-Centrais Elétricas do Pará.

s.a

1. Radialidade.
2.  $V^{\min} \leq V \leq V^{\max}$ , para cada barra.
3.  $I_{km} \leq I_{km}^{\max}$ , para cada ramo.

sendo:

- $f(x)$  Função Objetivo
- $V$  e  $\theta$  o módulo e a fase da tensão nas barras da rede, obtidos a partir do fluxo de carga AC
- $I$  corrente nos ramos da rede
- $g$  a condutância dos ramos da rede
- $NR$  número de ramos da rede

Observar-se na equação 1 a necessidade de um estudo de fluxo de carga para calcular as perdas obtidas em cada nova configuração de chaves e taps de capacitores. Além das perdas, verifica-se com a ajuda do fluxo de carga, se na configuração atual existe alguma violação das restrições de tensão em cada barra e de carregamento nos ramos dos alimentadores. Em se tratando de reconfiguração de redes, há a necessidade de um configurador de redes, cuja função é determinar a topologia da rede conforme os estados das chaves elétricas, portanto terá a capacidade de detectar ilhas ou malhas nas configurações propostas pelo SA. Tal procedimento é necessário, pois as configurações com ilhas e/ou malhas não são soluções viáveis para o problema de reconfiguração de redes elétricas de distribuição por violarem a restrição de radialidade.

### III. METODOLOGIA ADOTADA

A metodologia do *Simulated Annealing* advém dos estudos termodinâmicos da metalurgia. Quando um metal é aquecido a altas temperaturas e é resfriado lentamente, o mesmo tende a solidificar-se em uma estrutura ótima. No processo de metalurgia os átomos dos metais, quando em altas temperaturas, possuem uma alta liberdade de movimentos, mas posteriormente tal metal sofrerá um resfriamento lento, conseqüentemente apresenta uma baixa liberdade de movimento dos átomos, e que conduzirá a uma estrutura perfeita. O SA faz analogia a este processo, portanto em altas temperaturas praticamente todas as possibilidades de soluções são aceitas, mesmo aquelas que não apresentam menor energia que a energia atual do sistema. Isto é feito para varrer o espaço de soluções o máximo possível a fim de escapar de soluções ótimas locais e buscar soluções que são eventualmente melhores. Com o decaimento da temperatura, o método passa a ser mais seletivo, aceitando somente soluções que apresentem uma energia menor do que a energia atual. Fazendo-se analogia com as redes elétricas, no início do processo quase todas as possibilidades de configurações de rede e de taps de banco de capacitores são avaliadas e com o decaimento da temperatura somente as configurações de chaves e taps com maiores reduções de perdas técnicas são aceitas.

O algoritmo de Metropolis [3] aplicado ao problema de redução de perdas técnicas pode ser formulado da seguinte forma:

- Cálculo da perda inicial do sistema ( $P_i$ );
- Definição de uma nova configuração;
- Cálculo da perda da nova configuração ( $P_j$ );
- Se  $P_j < P_i$  a nova configuração é aceita;
- Se  $P_j > P_i$  a nova configuração será aceita se a probabilidade de aceitação da configuração for maior que um número randômico entre 0 e 1. Caso contrário a configuração não será aceita e buscar-se-á uma nova configuração.

O pseudoprograma abaixo descreve como uma rotina de simulated annealing pode ser implementada:

```

Inicializa ( $i$ , perdas( $i$ ),  $T_0$ )
 $T = T_0$ 
Faça
  De  $I=1$  até  $L$ 
    Gera_Configuração ( $j$  a partir de  $i$ )
    Perdas( $j$ )
    Aceita =  $e^{(perdas(i) - perdas(j)) / T}$ 
    Se ( $perdas(j) < perdas(i)$  ou  $Aceita > \text{rand}[0;1]$ )
      Então
        Aceita_nova_configuração ( $j$ )
         $i = j$ 
      Senão
        Rejeita_nova_configuração ( $j$ )
  Próximo  $I$ 
   $T = \alpha T$ 
Enquanto (critério de parada não é alcançado)
Fim

```

Sendo:

 $T_0$  - temperatura inicial do processo $T$  - temperatura do processo $\alpha$  - taxa de decaimento da temperatura $L$  - número de iterações por nível de temperatura

O valor da função *Aceita* mostrado no pseudoprograma possui valores próximos de 1 quando a temperatura é elevada. A medida que a temperatura decresce com a evolução do programa, o valor da função *Aceita* passa a aproximar-se de zero. Isto permite que no início do programa quando a temperatura é elevada várias configurações sejam aceitas pois a possibilidade da função *Aceita* ser maior que um número randômico entre 0 e 1 é maior [4].

O método pode adotar os seguintes critérios de convergência:

- Tempo de execução excedeu um determinado valor;
- A perda ótima não decaiu  $\epsilon\%$  da perda encontrada nas  $n$  iterações passadas.

Com relação a geração de uma configuração vizinha em relação a configuração atual, no caso da reconfiguração de redes, fecha-se uma chave de interconexão entre alimentadores que cria uma malha no sistema e abre-se outra chave desta malha que restaura o sistema para uma configuração radial. No caso da variação de taps de capacitores, inicialmente todos os capacitores são desligados, depois os taps dos capacitores são variados aleatoriamente a fim de

alcançar uma solução com perdas mínimas [4].

Além do cálculo das perdas ativas obtidas a partir do estudo de fluxo de carga, outras funções são adicionadas a estas perdas obtendo-se uma equação das perdas gerais que é aplicada no pseudoprograma. Esta equação é da seguinte forma para uma configuração  $i$  qualquer:

$$\text{Perdas (i)} = \text{Perdas\_Fluxo\_Cargas} + \sum_{\text{todos os nós}} (|V_i| - |V_i^{\max}|) \cdot f1 + \sum_{\text{todos os nós}} (|V_i^{\min}| - |V_i|) \cdot f2 + \sum_{\text{todos os ramos}} \left( \frac{|I_i| - |I_i^{\max}|}{|I_i^{\max}|} \right) \cdot f3 \quad (2)$$

$$f1 = \begin{cases} 0 & , \text{ se } |V_i| \leq |V_i^{\max}| \\ \text{Perdas Ativas} & , \text{ se } |V_i| > |V_i^{\max}| \end{cases}$$

$$f2 = \begin{cases} 0 & , \text{ se } |V_i| \geq |V_i^{\min}| \\ \text{Perdas Ativas} & , \text{ se } |V_i| < |V_i^{\min}| \end{cases}$$

$$f3 = \begin{cases} 0 & , \text{ se } |i_i| \leq |i_i^{\max}| \\ \text{Perdas Ativas} & , \text{ se } |i_i| > |i_i^{\max}| \end{cases}$$

De acordo com a equação 2, a avaliação da qualidade de uma solução é realizada calculando o valor global das perdas ativas na rede e integrando parcelas representando penalidades associadas a violações da gama de valores admitidos para o módulo das tensões e a violação de limites de intensidades de corrente em ramos da rede. Em qualquer destas duas situações, assume-se que os valores do módulo das tensões e da intensidade de corrente se encontram em p.u. [5].

#### IV. CARACTERÍSTICAS DO PROGRAMA

O programa foi construído nas linguagens de programação C/C++ e JAVA, sendo as rotinas de cálculo desenvolvidas em C++ e a interface gráfica em JAVA, mais precisamente no ambiente de programação ECLIPSE [6]. A base de dados que contém todas as informações referentes aos alimentadores da rede de distribuição em estudo foi desenvolvida em Microsoft® Access. Esta base possui várias tabelas de descrição de dados dos elementos da rede como: linhas, capacitores, cargas, etc. A figura 1 mostra a estrutura da base de dados desenvolvida com as respectivas tabelas.

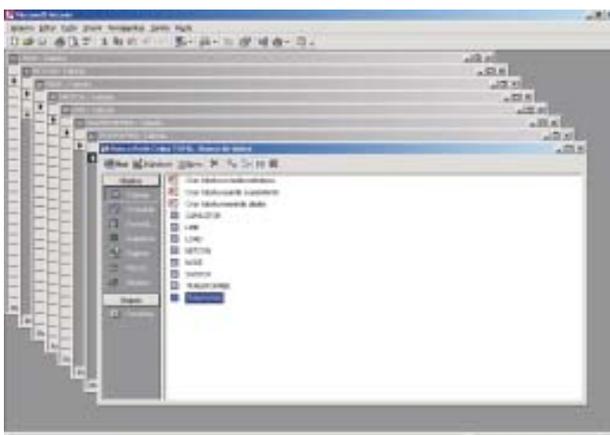
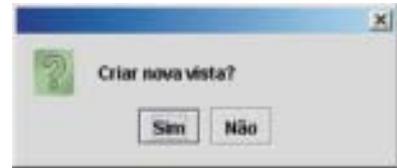
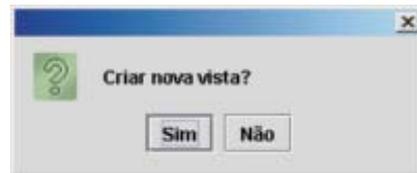


FIGURA 1- Base de dados desenvolvida

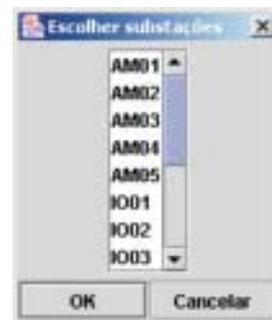
A fim de preservar a base de dados original, já que essa base constitui-se o fiel modelo do sistema elétrico implantado, foi desenvolvida uma rotina que cria uma vista da base de dados original somente das subestações e/ou alimentadores para os quais deseja-se executar um estudo específico. A figura 2 mostra o processo de criação da vista.



(a)



(b)



(c)

FIGURA 2- Criação da vista da base de dados original.

A figura 3 mostra a tela principal do programa desenvolvido. Os dados da vista da base de dados podem ser editados, possibilitando ao operador do programa ajustar valores como: carregamento de transformadores, taps de banco de capacitores, estado das chaves etc. A modificação ou inclusão de outros dados mais complexos, como a inserção de um novo ramo de um alimentador, só serão permitidas na base de dados original. No menu *Executar* constam as funções principais do programa denominadas de reconfiguração e capacitores.

	NÓS	Linhas	Capacitores	Subestações
Reconfiguração	NODEID	DREALPOW	DREACTPOW	
Capacitores	AM01_NC16516466	0.00855	0.002810249	
	AM01_NC16514286	0.00855	0.002810249	
Partes de Tensões	AM01_0043798900	0.012825	0.004215374	
Sair	AM01_0316268035	0.012825	0.004215374	
	AM01_0004561	AM01_NC16516014	0.00855	0.002810249
	AM01_0004881	AM01_NC16516004	0.021375	0.007025624
	AM01_0004881	AM01_NC16516000	0.038475	0.012646122
	AM01_0005071	AM01_NC16514287	0.012825	0.004215374
	AM01_0005072	AM01_NC16516012	0.012825	0.004215374
	AM01_0005074	AM01_NC16516789	0.021375	0.007025624
	AM01_0005075	AM01_0044273000	0.021375	0.007025624
	AM01_0005076	AM01_0044273600	0.0320625	0.010538435
	AM01_0005077	AM01_0044688795	0.0320625	0.010538435

FIGURA 3 – Tela principal do programa

Ao ativar a opção *Reconfiguração*, são executadas as rotinas de reconfiguração da rede de distribuição na busca da configuração topológica da perda mínima. A opção *Capacitores* roda as rotinas de compensação de potência

reativa, para a redução de perdas e regulação de tensão, inserindo ou retirando estágios de banco de capacitores.

A figura 4 mostra uma tela de saída do programa para um estudo de reconfiguração. Observa-se na mesma as perdas iniciais (kW), finais (kW), o ganho da reconfiguração (kW) e o código das chaves que devem ser operadas a fim de alcançar a redução de perdas apresentada no estudo.

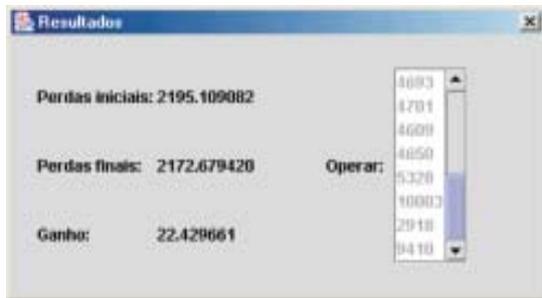


FIGURA 4 – Interface de saída para um estudo de reconfiguração de rede.

## V. RESULTADOS OBTIDOS

Com a finalidade de avaliar o programa desenvolvido foram escolhidas, em comum acordo com os engenheiros da empresa, duas subestações da região metropolitana de Belém denominadas de SE-Icoaraci e SE-Augusto Montenegro. A primeira possui 10 alimentadores e a segunda 5. A tabela 1 mostra alguns dados relativos as duas subestações.

TABELA 1  
Dados relativos as subestações de agosto montenegro e icoaraci

Subestação	Chaves	Capacitores	Transformadores
Icoaraci	120	22	928
Augusto Montenegro	33	9	417

Como o programa desenvolvido verifica a redução de perdas técnicas para vários cenários de carga, obteve-se com a empresa o carregamento dos alimentadores no horário de ponta.

Primeiramente foi feito um estudo em separado para as duas subestações. De acordo com o resultado do programa obtido somente para a subestação Augusto Montenegro com relação a reconfiguração de redes, a mesma apresentou uma perda inicial de 250 kW que foi reduzida para 242 kW, reduzindo em aproximadamente 3.2% as perdas da subestação, com a operação de somente duas chaves.

Para a subestação de Icoaraci a perda inicial de 2.008 kW caiu para 1.986 kW, representando uma diminuição de 1,1%, sendo 6 o número de chaves envolvidas no processo.

Trabalhando com as duas subestações, a perda ativa do sistema caiu de 2.195 kW para 2.160 kW, representando uma diminuição de aproximadamente 1,6%. A tabela 2 resume os resultados alcançados.

TABELA 2  
Resultados obtidos com a reconfiguração

Estudo	Perda Inicial (kW)	Perda Final (kW)	Nº de Chaves Envolvidas
Augusto Montenegro	250	242	2
Icoaraci	2.008	1.986	6
Augusto Montenegro e Icoaraci	2.195	2.160	12

Com relação ao estudo de compensação reativa por banco de capacitores, o programa indicou o desligamento de três bancos de capacitores existentes nos alimentadores da subestação de Augusto Montenegro. A tabela 3 mostra o resultado de saída do programa.

TABELA 3  
Resultados obtidos com a compensação reativa na subestação de agosto montenegro

TimeIndex	ID	InitialVAR(Mvar)	FinalVAR(Mvar)
7/5/2002 11:55:38	AM02_9592	0,6	0,6
7/5/2002 11:55:38	AM02_9632	0,6	0,6
7/5/2002 11:55:38	AM02_9636	0,6	0
7/5/2002 11:55:38	AM03_8030	0,3	0,3
7/5/2002 11:55:38	AM03_8031	0,6	0
7/5/2002 11:55:38	AM04_10915	0,3	0,3
7/5/2002 11:55:38	AM04_3067	0,6	0
7/5/2002 11:55:38	AM05_10905	0,6	0,6
7/5/2002 11:55:38	AM05_10942	0,3	0,3

Nesta tabela *TimeIndex* significa o dia e a hora que foi feita a simulação, *ID* representa a identificação do banco de capacitores, *InitialVar* o valor inicial da potência reativa do banco em MVAR e *FinalVar* significa o quanto cada banco deve gerar em MVAR após o estudo.

De acordo com a tabela de saída do programa, realizando-se a operação de desligamento dos três bancos de capacitores, a redução de perdas alcançada é de aproximadamente 5 kW. A tabela 4 mostra os resultados de saída do programa com relação a redução de perdas.

TABELA 4  
Redução de perdas obtida com a compensação reativa na subestação de agosto montenegro

TimeIndex	resultID	resultValue
7/5/2002 11:55:38	ActiveLossGain	4,819966
7/5/2002 11:55:38	FinalActiveLoss	245,933260
7/5/2002 11:55:38	FinalReactiveLoss	429,152531
7/5/2002 11:55:38	InitialActiveLoss	250,753225
7/5/2002 11:55:38	InitialReactiveLoss	434,747026
7/5/2002 11:55:38	MaxVoltDev	1,036232
7/5/2002 11:55:38	MinVoltDev	1,002520
7/5/2002 11:55:38	ReactiveLossGain	5,594495

Esta tabela mostra os ganhos de potências ativa e reativa, as perdas iniciais e finais de potências ativa e reativa e o desvio máximo e mínimo obtido para tensões em p.u.

Uma vez executada a rotina de ajuste de compensação reativa, será possível analisar o perfil de tensão ao longo dos alimentadores, conforme observado na figura 5.



FIGURA 5 - Resultados de tensões ao longo do alimentador

Com relação a figura 5, no eixo Y estão representadas as tensões (V) das barras do alimentador (normalmente são definidas como barras os transformadores, bancos de capacitores e pontos de derivação da rede).

No eixo X representam-se as próprias barras elétricas. Esta figura é apresentada em terminal de vídeo e a consulta sobre a tensão de uma barra específica é obtida navegando-se com o *mouse* sobre a linha que representa as tensões. A tensão do nó elétrico é evidenciada como mostrado na figura 5, informando a designação do componente e a sua respectiva tensão em Volts.

## VI. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou o desenvolvimento de um ambiente computacional para o planejamento de redes de distribuição visando a redução de perdas ativas.

O programa desenvolvido executa as rotinas de reconfiguração de redes e alocação de bancos de capacitores, utilizando a técnica de otimização denominada *Simulated Annealing*. Esta técnica foi utilizada devido a sua capacidade de trabalhar com problemas combinatórios e complexos, tais quais o problema de reconfiguração e alocação de bancos de capacitores apresentados neste artigo.

A disponibilidade desta ferramenta computacional para a distribuidora de energia elétrica, no caso específico a CELPA, permitirá que a mesma avalie novas possibilidades de configuração de redes e valores de banco de capacitores adequados para promover a redução de perdas ativas e melhorar os perfis de tensão, sob vários cenários de operação.

A reconfiguração de redes e dimensionamento de bancos de capacitores produzem soluções bastante adequadas quando se visa uma alternativa rápida e de baixo custo para a redução das perdas ativas do sistema de distribuição. A consequência óbvia com a redução das perdas ativas é a economia com a compra dos equipamentos da rede de distribuição como: cabos, transformadores, banco de capacitores etc., ou seja, é um ganho que se estende desde o curto-prazo, com a compra de equipamentos de menor dimensão e conseqüentemente mais baratos, até o longo-prazo, com o adiamento na compra de novos equipamentos.

Testes mais exaustivos ainda precisam ser executados variando-se os parâmetros do *Simulated Annealing*, o que poderá resultar em novas combinações de chaves NA e NF que reduzam ainda mais as perdas ativas nos ramos.

## VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PISSARRA. "Redução de Perdas em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica". In: XII Congresso Brasileiro de Automática, BR.
- [2] H. N. NG, *et al.* "Classification of Capacitor Allocation Techniques". *IEEE Trans. on Power Delivery*, v.5, n.1, jan, 2000.
- [3] H. D. Chiang, and R. M. Jean-Jumeau, "Optimal Network Reconfiguration in Distribution Systems Part1: A New Formulation and a Solution Methodology," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 5, pp. 1902-1909, Apr. 1990.
- [4] H. D. Chiang, and R. M. Jean-Jumeau, "Optimal Network Reconfiguration in Distribution Systems Part 2: Solution Algorithms and Numerical Results" *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 5, pp. 1568-1574, July. 1990.
- [5] J. Pereira, J. T. Saraiva, M. T. Ponce de Leão, "Identificação de Estratégias de Exploração de Redes de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando Simulated Annealing" *ELAB 99*, pp. 409-418.
- [6] Software disponível no site: <http://www.eclipse.org>.
- [7] Edgar M. A. Filho, Ubiratan H. Bezerra, Eurípides P. Santos, Roberto C. L. Oliveira, Márcio A. B. Amora, André N. Cavalcante. "Um Algoritmo Genético Modificado Aplicado no Problema de Minimização de Perdas Ativas em Redes de Distribuição de Energia", *XIV Congresso Brasileiro de Automática*, Natal-RN, set. 2002.