

# Aplicativo para a Alocação de Bancos de Capacitores em alimentadores de 13.8kV Integrado a Banco de Dados

Marco A Coelho, Pablo Cuervo, *Senior Member IEEE*, Cid Macedo, Roberto Aguiar, Kenneth Sampaio,  
Departamento de Engenharia Elétrica – ENE, Universidade de Brasília.  
Campus Universitário Darcy Ribeiro, 70910-900 Brasília, DF, BRASIL.  
E-mails: [pablo@ene.unb.br](mailto:pablo@ene.unb.br), [egito@ene.unb.br](mailto:egito@ene.unb.br)

Maria Amelia Biagio  
Departamento de Estatística – EST, Universidade de Brasília.  
Campus Universitário Darcy Ribeiro, 70910-900 Brasília, DF, BRASIL.  
E-mail: [mamelia@unb.br](mailto:mamelia@unb.br)

**Resumo**—Este artigo apresenta um aplicativo computacional desenvolvido para alocações de bancos de capacitores em alimentadores de 13.8kV interagindo com banco de dados existente. O aplicativo é capaz de ler no banco de dados da empresa distribuidora de energia os dados do alimentador como: topologia, impedâncias das linhas e curvas de carga de cada transformador ligado ao alimentador.

Os resultados dos cálculos de alocação são retornados ao usuário por rotina gráfica.

O aplicativo foi implantado na Companhia Energética de Brasília – CEB e utiliza dois métodos para a alocação dos bancos de capacitores: 1) Procedimento heurístico baseado no consumo de reativos das cargas e 2) Aproximação Linear do problema no ponto de operação e resolução com programação linear inteira-mista. A função objetivo para a otimização de alocação dos bancos de capacitores, considera a economia de energia com a diminuição das perdas no alimentador e introduz uma penalização quando a tensão em alguma barra sai fora dos limites especificados.

O desempenho destes métodos é testado em um problema fornecido na literatura com 69 trechos e um outro, referente a um alimentador real da empresa com 802 trechos. Os resultados mostram que a empresa pode ter ganhos econômicos de 6% a 14%.

**Palavras Chave**—compensação de reativos, Perdas de transmissão, Alocação de Capacitores, Rede de distribuição.

## I. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas têm sido propostas muitas técnicas para a alocação de capacitores em redes de distribuição de energia elétrica. Os procedimentos são cada vez mais sofisticados dada a crescente disponibilidade de facilidades computacionais. Historicamente vêm sendo aplicados métodos do seguinte tipo: métodos analíticos, métodos baseados na programação matemática, métodos heurísticos, e métodos baseados na inteligência artificial.

*Métodos de programação matemática :*

Duran [18] com modelagem baseada na programação dinâmica e considerando somente capacitores fixos. Baran et al [12,13] utilizando técnicas de decomposição para tratar o problema inteiro misto, contempla o uso de capacitores fixos e variáveis.

*Métodos heurísticos :*

(década de 80) Grainger and Lee [17], Grainger et al. [16], e Kaplan [15]. Estes métodos se baseiam na intuição e

experiência. São criados conjuntos de regras para obter soluções rápidas e práticas que são de fácil entendimento e implementação. As soluções obtidas por estas técnicas podem eventualmente se aproximar da solução mais econômica.

*Métodos de Inteligência Artificial :*

Nas últimas décadas o aparecimento de técnicas como algoritmos genéticos, simulated annealing, lógica fuzzy, sistemas especialistas, e redes neurais artificiais permitiram a concepção de modelos para a alocação de capacitores como problemas de otimização combinatória. Chiang et al. [9] utilizaram a técnica de simulated annealing baseada em processos de cristalização térmicos de sistemas físicos. Considera restrições de carga e de tensão. Boone e Chiang [10] utilizaram algoritmos genéticos para determinar localizações ótimas de capacitores fixos. Kagan e Oliveira [5] utilizaram algoritmos genéticos para minimizar perdas analisando as melhores configurações de redes considerando abertura de interruptores. Ferreira e Souza [2] utilizaram também algoritmo genético para a alocação de capacitores levando em consideração capacitores fixos e variáveis. Os algoritmos genéticos se baseiam na determinação de uma população a ser estudada através de regras de processos de seleção aleatórios visando o melhoramento de um critério de desempenho.

*Métodos baseados em Meta-heurísticas :*

A técnica de Busca Tabú é uma meta-heurística (técnicas de otimização de funções multi-modais) foi utilizada por Huang et al [7], e Miu et al [6] e se baseia no uso flexível de memória computacional para reduzir o esforço no processo de enumeração visando encontrar uma solução perto do ótimo.

*Métodos Híbridos :*

Recentes trabalhos têm-se concentrado em metodologias híbridas que utilizam duas técnicas em conjunto. Por exemplo, Miu et al [6] utilizaram procedimento heurístico em conjunto com o algoritmo genético. Inicialmente é aplicado o algoritmo genético para atingir a vizinhança de soluções de alta qualidade que servem de estimativas iniciais para a técnica heurística. Recentemente, Gallego e Monticelli [1] utilizaram em conjunto procedimentos de

algoritmos genéticos, heurísticos e de busca tabu. Nesta abordagem através do algoritmo genético é disponibilizada uma população de soluções iniciais as mais diversas possíveis que servem de base para a avaliação por parte da busca Tabu. É enfatizada a utilização do “path relinking” para a geração de novas populações.

Outras publicações recentes incorporam situações, como sistemas desequilibrados, restrições nas distorções harmônicas provocadas pela adição dos capacitores, como também a mudança na configuração da rede.

## II. MODELAGEM

Os métodos de otimização de alocação de capacitores normalmente utilizam a perda de energia nas linhas do alimentador como critério que norteia a localização e tamanho dos bancos a serem inseridos no sistema. Também as tensões nas barras devem ser controladas dentro de certos limites. Portanto, é necessário um método eficiente e rápido para o cálculo de perdas e tensões nas linhas.

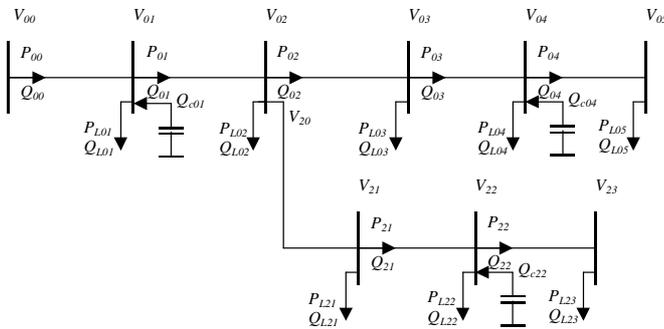


Figura 1. Alimentador com ramos laterais

Na figura acima temos um alimentador com um ramo lateral, para o qual, o cálculo da potência dissipada em uma linha de transmissão considerando barras  $i$  e  $i+1$ . Das leis das malhas elétricas e conservação de energia aplicadas à figura anterior, obtêm-se as equações do fluxo de carga radial para sistemas de distribuição:

$$\begin{aligned} P_{i+1} &= P_i - r_{i+1} \cdot \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} - P_{Li+1} \\ Q_{i+1} &= Q_i - x_{i+1} \cdot \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} - Q_{Li+1} + Q_{ci+1} \\ V_{i+1}^2 &= V_i^2 - 2(r_{i+1}P_i + x_{i+1}Q_i) + \frac{(r_{i+1}^2 + x_{i+1}^2)(P_i^2 + Q_i^2)}{V_i^2} \end{aligned} \quad (1)$$

Onde:

$r_{i+1}$  resistência da linha de transmissão entre as barras  $i$  e  $i+1$ ,

$x_{i+1}$  reatância da linha de transmissão entre as barras  $i$  e  $i+1$ ,

$V_i$  Voltagem efetiva (rms) na barra  $i$ ,

$P_i$  fluxo de potência ativa saindo da barra  $i$ ,

$Q_i$  fluxo de potência reativa saindo da barra  $i$ ,

$P_{Li+1}$  fluxo de potência ativa devido a uma carga na barra  $i+1$ ,

$Q_{Li+1}$  fluxo de potência reativa devido a uma carga na barra  $i+1$ ,

$Q_{ci+1}$  fluxo de potência reativa devido a um banco de capacitores na barra  $i+1$ ,

Com um ramo lateral saindo da barra  $i$  do alimentador principal é necessário acrescentar as seguintes condições de fronteira:

- Na barra  $i$  onde o lateral é conectado, inserir a variável artificial  $V_{0i}$  e fazer:  $V_{0i}^2 = V_i^2$  (2 a)

- No extremo do lateral, não há potência enviada a outros ramos:  $P_{in} = 0$  e  $Q_{in} = 0$  (2 b)

Considerando um alimentador com  $n$  trechos/barras,  $l$  laterais, o número de equações a serem consideradas é de  $3(n + l + 1)$ .

Uma forma geral de organizar as variáveis do problema é a seguinte: As variáveis do sistema podem ser expressas através do vetor:

$$\mathbf{x} = [\mathbf{x}_0^T \dots \mathbf{x}_l^T]^T$$

onde  $\mathbf{x}_k = [\mathbf{x}_{k0}^T \dots \mathbf{x}_{kkn}^T]^T$   $k=0, \dots, l$ ,

com,  $\mathbf{x}_{ki} = [P_{ki} \ Q_{ki} \ V_{ki}^2]^T$   $i = 1, \dots, nk$ .

Assim, as variáveis do alimentador principal ( $k=0$ ) são expressas através de,

$$\mathbf{x}_0 = [\mathbf{x}_{01}^T \dots \mathbf{x}_{0n}^T]^T$$

onde  $\mathbf{x}_{0i} = [P_{0i} \ Q_{0i} \ V_{0i}^2]^T$ , para  $i = 1, \dots, n0$

As equações (1) e (2) para uma configuração fixa de capacitores (sem levar em consideração ainda a possibilidade da existência ou não de capacitores a serem instalados) podem ser escritas na forma compacta:

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \quad (3)$$

A solução deste conjunto de equações deve atender também os limites de tensão especificados;

$$V_i^{\min^2} \leq V_i^2 \leq V_i^{\max^2} \quad (4)$$

ou seja, para  $i = 1, \dots, nt$ , isto é, todas as barras do alimentador. Este conjunto de desigualdades é um conjunto de restrições da forma:

$$\mathbf{H}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0} \quad (5)$$

Nesta formulação a capacitância ‘shunt’ dos alimentadores está sendo desprezada como é usual nos sistemas de distribuição.

*Problema de fluxo de carga em sistema de distribuição radial incluindo patamares de carga*

Considerando que o perfil da carga do sistema varia ao longo do dia, mês e ano, o conjunto de equações anterior deve atender patamares de carga do tipo:

$$P_L^j, Q_L^j \quad j = 0, 1, \dots, np.$$

No caso onde existem apenas os níveis leve ( $L_3$ ), médio ( $L_2$ ) e pesado ( $L_1$ ), teremos os tempos de permanência para cada patamar ( $T_3, T_2, T_1$ ), tais que,  $T_3 + T_2 + T_1 = 24$  horas em um dia típico de operação. Embora outros períodos de operação sejam possíveis, se são considerados apenas os níveis leve, médio e pesado, podemos considerar apenas três períodos onde cada um corresponde a soma de todos os períodos onde se tem carga leve, média ou pesada, o que significa multiplicar  $T_3, T_2$  e  $T_1$  pelo número de dias do período de estudo.

### Função de custo de capacitores

Com relação ao banco de capacitores inserido na barra  $i + 1$  da figura 1, se for o caso de um banco fixo, haverá uma função descontínua de custo com relação à potência reativa instalada. Na formulação do problema a ser resolvido, a variável  $Q_c$  (kVar) assume valores finitos, sendo, portanto, necessária a utilização de variáveis inteiras ao lado das variáveis contínuas já mencionadas (potências, tensões, etc...), o que formará um conjunto de equações a serem atendidas com características não lineares e possuindo variáveis contínuas e discretas.

### Horizonte de planejamento

A modelagem descrita acima permite facilmente considerar qualquer horizonte de planejamento; entretanto só fará sentido se existirem previsões razoáveis para o horizonte a ser considerado. O investimento em instalação de equipamento só se justifica se é considerada a perda de energia acumulada ao longo de no mínimo um período de um ano.

### Modelo do problema considerando localização e tamanho de bancos de capacitores

O problema de alocação de capacitores deve considerar, na equação de balanço de potência reativa, uma variável inteira  $u_i$ , para cada barra  $i$  candidata a receber capacitores. Dessa forma, denotando por  $bsh$  o tamanho padrão de um capacitor ( ex. 300 kVar/kV<sub>base</sub><sup>2</sup>),

$$Q_{c,i+1} = V_{i+1}^2 \cdot bsh \cdot u_{i+1} \quad \text{nas equações (1) :}$$

### Modelo para Capacitores Fixos

Para este modelo basta considerar fixa a variável inteira acima definida,  $u_{i+1}$ , independente do nível de carga, assumindo valores inteiros positivos incluindo o zero.

### Modelo para Capacitores Variáveis

Neste modelo a variável inteira deve incluir o índice  $j$  representando o patamar ou nível de carga ( $u_{i+1}^j$ ).

### Função objetivo do problema de alocação de capacitores

Este problema tem como objetivo minimizar os custos de investimentos de instalação de capacitores somados aos custos das perdas de energia, ou seja,

$$\text{Minimizar} \quad F_{obj} = C_e + C_{inv} + C_{volt} \quad (6)$$

$$\text{onde,} \quad C_e = \sum_{j=0}^L K_{ej} T_j \cdot P_{perdas j}$$

é o custo de perdas de energia, sendo  $T_j$  o período de duração da carga  $j$  em horas,  $P_{perdas j}$  é a potência ativa perdida em MW neste mesmo período, e  $K_{ej}$  o custo em R\$/MWh para cada patamar de carga ;

$$C_{inv} = \sum_{i=1}^{nt} f(Q_{ci})$$

é o custo do investimento para a instalação dos capacitores em R\$,  $f$  é a função de custo conforme a potência reativa instalada ,

$$C_{volt} = k_{inf} \sum_{i=1}^{nt} l_i (V_{inf}^2 - V_i^2) + k_{sup} \sum_{i=1}^{nt} h_i (V_i^2 - V_{sup}^2)$$

é uma penalização para barras com tensões acima ou abaixo dos limites estabelecidos.  $l_i$  e  $h_i$  são nulos se os correspondentes limites não forem ultrapassados na barra  $i$  e iguais a 1 em caso positivo.  $k_{inf}$  e  $k_{sup}$  são custos arbitrários estabelecidos para evitar soluções com tensões fora dos limites desejados  $V_{inf}$  e  $V_{sup}$ . Esta parcela é somente utilizada pelo procedimento heurístico o outro método incorpora dentro das restrições do problema.

Desta forma, o problema se resume a encontrar o vetor de variáveis inteiras  $u()$  que minimize a função objetivo acima e respeitando as restrições (4) e (5).

## III. ESTRUTURA DO APLICATIVO

A estrutura do aplicativo esta esquematizada na figura 2. O bloco da esquerda representa os dados existentes no banco de dados da empresa a serem utilizados pelos outros módulos de cálculo á direita. Numa primeira etapa os dados são trabalhados para a estimação da carga em bases anuais e para a síntese do circuito a ser analisado. Após esta etapa os métodos de otimização procuram soluções visando redução de perdas e melhoramento do perfil de tensão. De posse da solução são geradas telas dentro do banco de dados mostrando a posição geográfica e relatórios que incluem também a economia obtida.

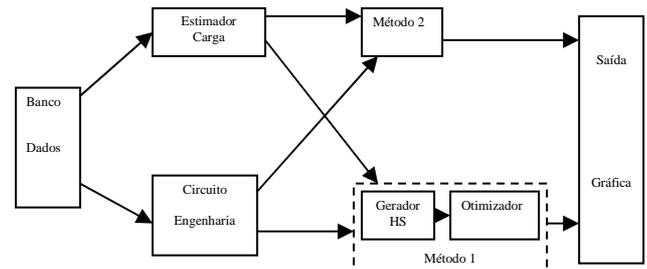


Figura2: Diagrama esquemático do aplicativo

Algumas etapas devem ser executadas antes da otimização propriamente dita.

1. A primeira etapa da execução corresponde à leitura dos dados do alimentador desejado no banco de dados da empresa. Surpreendentemente esta etapa pode ser mais demorada do que a execução das rotinas de otimização descritas adiante. Por este motivo os dados são armazenados em um arquivo de entrada para agilizar a execução sob diferentes condições.
2. Depois de lido o arquivo de entrada do item 1, há necessidade de verificar a consistência dos dados de topologia do alimentador e informar o usuário sobre linhas cadastradas em duplicata ou fechando anel no alimentador que deve ser radial, ou ainda descontinuidades no alimentador, isto é, podem existir ramais ou trechos sem ligação com o resto do alimentador.
3. Em seguida, deve ser feita uma simplificação do alimentador real onde apenas as barras com cargas e barras com bifurcações são mantidas. Isto pode ser feito somando as impedâncias de linhas adjacentes e eliminando a barra intermediária, pois cada trecho do alimentador entre duas barras é modelado como uma impedância complexa. Este procedimento pode reduzir substancialmente o número de barras do alimentador e,

portanto, acelerar a execução dos procedimentos a seguir. O alimentador reduzido desta forma é conhecido como “Circuito de Engenharia”.

4. Com o Circuito de Engenharia formado, os trechos entre duas barras são ordenados de maneira a fazer a heurística percorrer primeiro o tronco principal do alimentador até o final e em seguida os ramais laterais até o final de cada um segundo a ordem decrescente de fluxo de potência. Para isto, a decisão sobre quem é tronco principal e quem é ramal lateral se baseia apenas nos fluxos de potência em cada bifurcação. Portanto é necessário executar a rotina de fluxo de carga sem capacitores alocados antes da execução deste procedimento de ordenação.

#### IV. MÉTODO HEURÍSTICO

Neste artigo será proposta uma nova solução heurística com base na seguinte justificativa: Os bancos de capacitores, idealmente, devem ser alocados em quantidade/potência suficiente para suprir o consumo de reativos das cargas. Além disso, devem estar o mais próximo possível destas, de maneira a minimizar as perdas nas linhas.

Neste ponto inicia-se um procedimento que vai gerar uma solução que aloca muitos bancos de capacitores, porém de acordo com a carga. O objetivo básico é gerar localmente a potência reativa consumida pela carga em uma determinada barra, através dos capacitores. Entretanto, estes só podem variar em passos discretos e possivelmente grandes demais para a carga, portanto pode haver necessidade de juntar muitas barras para um único banco. O método se baseia em dois procedimentos descritos a seguir:

##### A. Procedimento 1

Percorrendo o alimentador barra após barra adjacente, seguindo primeiro pelo ramal principal e depois pelos ramais laterais, vai-se somando o consumo de reativos de cada barra e também de cada trecho em uma variável chamada acumulador (*acc*). No momento em que *acc* supera a potência reativa fornecida por um banco de capacitores, é alocado imediatamente 1 ou vários capacitores naquela barra.

Este procedimento tem o mérito de ser simples e de execução muito rápida, entretanto, a ordem com que as barras *k* (e correspondentes trechos do alimentador) são chamadas é fundamental para que o resultado seja razoável. Outro ponto importante é que o procedimento tenta minimizar apenas as perdas de energia, enquanto a função objetivo considera também custos dos capacitores e penalização para tensões fora dos limites estabelecidos.

##### B. Procedimento 2

Para compensar as desvantagens do procedimento 1, introduzimos um fator *frc* que multiplica os reativos acumulados durante o percorrer do circuito, ou equivalentemente, multiplica por *acc*. Se o fator *frc*, for feito menor do que 1, deve provocar a alocação de cada banco de capacitores além do ponto “correto” e também menos capacitores do que o necessário, enquanto que *frc* maior que 1 tem o efeito inverso. O procedimento 2 utiliza o procedimento 1 com *frc* e faz uma busca pelo melhor valor fazendo-o variar de zero até 2, inicialmente em passos de 0.2, em seguida refinando o passo para variações de 0.01. A solução obtida desta forma é suficientemente boa e rápida

para estudos preliminares ou mesmo pode ser considerada como solução final em alimentadores muito grandes onde outros procedimentos tem um processamento excessivamente lento.

#### C. Refinamento da Solução

Opcionalmente, pode ser executado um procedimento de busca em vizinhança que pode melhorar a solução obtida pelo procedimento 2, conforme descrito a seguir:

Cria-se um *loop* com um máximo de 20 iterações onde são executados os procedimentos A e B:

- *Procedimento A*- Número de capacitores constante  
Cada capacitor já alocado é removido e realocado seqüencialmente em todas as outras barras do alimentador. A cada tentativa *F\_obj* é recalculado e caso seja melhor que a solução mínima (*F\_min*), esta é atualizada.

- *Procedimento B*- Número de capacitores variável  
A cada barra do alimentador, o número de capacitores é incrementado e em seguida decrementado a partir do valor atual. A cada tentativa *F\_obj* é recalculado e caso seja melhor que a solução mínima (*F\_min*), esta é atualizada.  
A cada execução do *loop* verifica-se se houve alguma atualização de *F\_min*. Em caso negativo o *loop* é abortado.

#### V. MÉTODO DE LINEARIZAÇÃO

Um outro método [19] novo foi desenvolvido com características diferentes com a finalidade de dar mais flexibilidade ao usuário do aplicativo. Pode ser utilizado independente do método anterior ou de forma complementar. Esta baseado na demonstração de que é possível aproximar linearmente as perdas de potência ativa numa linha de transmissão em função das variáveis operativas e de que o produto de variáveis inteiras com contínuas pode ser representado por conjuntos de desigualdades lineares. O método permite formular um problema de otimização linear inteiro com variáveis binárias a partir da formulação clássica original descrita na seção II cuja solução pode ser obtida por métodos de otimização conhecidos. Uma das vantagens do método é que considera de forma rígida restrições operativas como por exemplo faixas de tensão toleráveis, e esta baseado unicamente em simulações de fluxos de carga não precisando de ajustes particulares de parâmetros ou fatores.

#### VI. ESTIMAÇÃO DA CARGA

Em alguns casos é possível obter as curvas de carga estimadas de cada transformador (carga na barra) a intervalos de poucos minutos. Para estes casos foi desenvolvido um método de otimização que é um algoritmo utilizado para discretizar as Curvas de Duração de Carga dos Transformadores em três níveis de potência: Leve, Médio e Pesado, ( $L_3, L_2, L_1$ ) como também determinar quais são os tempos de duração em cada nível de potência ( $T_3, T_2, T_1$ ). O algoritmo irá simular um alimentador principal somando todas as potências lidas nas curvas de duração dos transformadores, em seus respectivos horários. O próximo passo será calcular os níveis de potência e tempo discretos tendo como critério de ajuste minimizar a variável “erro total” que é uma comparação das áreas discretizadas  $L_3 T_3, L_2 T_2, L_1 T_1$  em relação às áreas originais das curvas de duração de carga de cada transformador.

## VII. RESULTADOS

### Método Heurístico

*Sistema com 69 barras* – Como validação do método descrito neste artigo, comparamos com o mesmo circuito utilizado em [1] e [5] e também com a mesma função objetivo utilizada:  $K_{e0} = 0.082$  US\$/kWh,  $K_{e1} = 0.049$  US\$/kWh,  $K_{e2} = 0.019$  US\$/kWh, são os custos da função objetivo.  $S_0 = 1.0$ ,  $S_1 = 0.8$ ,  $S_2 = 0.5$  são multiplicadores da carga para os três patamares e  $T_0 = 1000$ ,  $T_1 = 6760$ ,  $T_2 = 1000$  são tempos de permanência de carga. Foram considerados horizontes de 10 anos com crescimento anual uniforme da carga de 9.55% até o limite de 5000 kW que é atingido no quarto ano. Consideramos apenas capacitores fixos a um custo de US\$ 1564 por banco de 300kVAr. As penalizações para sobretensão e subtensão foram removidas da função objetivo.

Sem capacitores adicionados temos uma função objetivo de  $F_{obj} = 1074080$ , enquanto [1] tem  $F_{obj} = 1081890$  e [5] tem  $F_{obj} = 1078455$ . As pequenas diferenças podem ser explicadas pelas tolerâncias de convergência admitidas para cada fluxo de carga utilizado em cada patamar de carga em cada ano do horizonte de planejamento.

A execução das rotinas de otimização descritas (procedimento 2), alocam um total de 8 bancos de capacitores com 300 kVAr cada nas barras (Tabela 1):

Tabela 1 : Alocação de capacitores para o circuito de 69 barras

Barra	11	22	50	52	62	65
Caps	1	1	1	1	3	1

A função objetivo desta solução é de  $F_{obj} = 695532$ , que é melhor do que a solução dada em [5] ;  $F_{obj} = 711655$ , também com 8 bancos alocados, porém em barras diferentes. A execução da busca em vizinhança pode melhorar ainda mais a solução, no caso  $F_{obj} = 693462$ , com 11 bancos alocados.

### Sistema com 803 barras

Este é um alimentador real (0703 – Lago Norte – DF) cujos dados podem ser fornecidos pelos autores. Neste caso utilizaremos alguns dados reais do ano de 2004 e um horizonte de planejamento de 1825 dias, supondo carga e valores de custos constantes durante o período. Também utilizaremos o procedimento de Segmentação da Carga descrito no item VI. O custo da energia foi ajustado para R\$ 6,00 por MWh para os níveis de carga leve, média e pesada enquanto o custo dos bancos fixos de capacitores foi ajustado inicialmente para R\$ 6110,00 cada.

O item 1 dos preparativos para a execução foi executado dentro da empresa – CEB – pois há necessidade de consultar os bancos de dados desta. Depois de lido o arquivo de entradas, o item 2 dos preparativos identifica 6 trechos com linhas cadastradas em duplicata, ou fechando anel e elimina estas linhas reduzindo o alimentador a 796 linhas e 797 barras. O item 3 dos preparativos é executado duas vezes em seguida e forma o Circuito de Engenharia com 183 linhas e 184 barras. O item 4 dos preparativos executa a ordenação sem problemas e num tempo muito curto.

A função objetivo é de  $F_{obj} = 10718$  para a solução sem capacitores alocados. Na primeira execução do método nenhum capacitor foi alocado, o que é compreensível, pois

se o custo total das perdas foi de apenas R\$ 10.718,00 no período, certamente a adição de um único capacitor ao custo de R\$ 6.110,00 jamais compensaria a diminuição das perdas.

Para efeito de testes, consideramos a possibilidade de uma redução de custo por capacitor de R\$ 500,00. Executando novamente rotinas de otimização (sem a busca em vizinhança), obtivemos o seguinte resultado nas Tabelas 2, 3 e 4

Tabela 2 : Alocação de capacitores para o circuito de 803 barras

Capacitores alocados				
N. Cap.	1	1	1	1
PG Barra	2032106	5154357	2033095	2031972

Tabela 3 : Energia perdida e custos para o circuito de 803 barras

Nível	Energia Perdida (MWh)		Custo (R\$)	
	Inicial	Final	Inicial	Final
Leve	1468	1052	8810	6314
Media	238	161	1426	967
Pesada	80	54	481	325
Total	1786	1268	10718	7607

Tabela 4 : Custos globais para o circuito de 803 barras

Custos Globais	Inicial	Final
C. Energia Perd.	10718	7607
C. Capacitores	0	2000
C. Total ( $F_{obj}$ )	10718	9607
Economia (R\$)		1111

Todos os preparativos acima (exceto o numero 1) são executados em poucos segundos em um microcomputador Pentium 4 2.4 Ghz com código escrito em Visual Basic 5.0. A execução da busca em vizinhança leva cerca de 4 minutos e melhora a solução para  $F_{obj} = 9508$  com três bancos de capacitores alocados nas barras com Posição Geográfica, PG = 2032106, 2004274 e 2033095.

### Método de Aproximações Lineares

O circuito CN01, que atende a cidade satélite Ceilândia,-DF é composto por 34 transformadores distribuídos entre 260 trechos. Este circuito teve seus dados de linha (resistência e reatância) extraídos da base de dados do sistema interno da CEB ( GEOCEB). Para a construção da Tabela 5 foram utilizados os dados das medições realizadas no dia 19/03/2003. O perfil da carga obtido foi estendido para horizontes de planejamento de três a seis anos.

Tabela 5. Comportamento da carga do circuito CN01.

Carga	Leve	Média	Pesada
Tempo (h)	66%	20,1%	13,9%
$k$	0,47	0,73	0,99

Os custos de aquisição e instalação dos capacitores fixos, assim como da energia, listados na Tabela 6., foram extraídos do documento “Alocação de Bancos de Capacitores Fixos na Rede de Distribuição Primária da CEB”, submetido ao congresso SITEC 2003.

O critério de otimização leva em conta apenas os custos de investimento (aquisição e instalação) dos capacitores e os

custos das perdas de energia com preço fixo, independente do nível da carga.

Tabela 6.. Parâmetros de custo do circuito CN01.

	Custo
Energia	0,0614 R\$/kWh
Banco 300 kvar fixo	6110,00 R\$/banco
Banco 300 kvar variável	8130,00 R\$/banco

No aplicativo implementado neste caso foram utilizados 63 HS (63 fluxos de carga) e todas as barras do sistema são candidatas à alocação de capacitores.

Neste caso, não é levado em conta o crescimento da carga, e são considerados preços constantes ao longo dos horizontes de análise. Para o carregamento estimado na Tabela 5., o custo das perdas de energia neste sistema sem adição de capacitores é de R\$ 14.832,95 por ano. A Tabela 7 apresenta a economia obtida com a instalação de bancos de capacitores para horizontes de planejamento de 3 a 6 anos.

Tabela 7. Economia obtida com alocação de bancos de capacitores.

Ano	Custo Sem Capacitores (\$)	No. Cap	Custo Com Cap (\$)	Economia (%)
3	44.498,84	1	43.472,47	2,31
4	56.017,59	2	59.331,78	5,92
5	74.164,73	2	66.797,77	9,93
6	88.997,68	2	77.713,32	12,68

Por tratar-se de um circuito relativamente pouco carregado, o retorno do investimento só aparece a partir do terceiro ano. A solução para um horizonte de 6 anos mostra que foram instalados somente dois bancos de capacitores de tamanho fixo, um na barra 36 e outro na barra 45. A economia obtida foi de 12,7%. Para este mesmo sistema, se for aplicado o procedimento padrão da CEB seria alocado um capacitor fixo de 300 kvar na barra 10 do alimentador, a economia obtida neste caso é de somente 6,9 %.

Na figura 3 é ilustrada a saída gráfica do aplicativo mostrando um trecho do circuito de 803 barras.

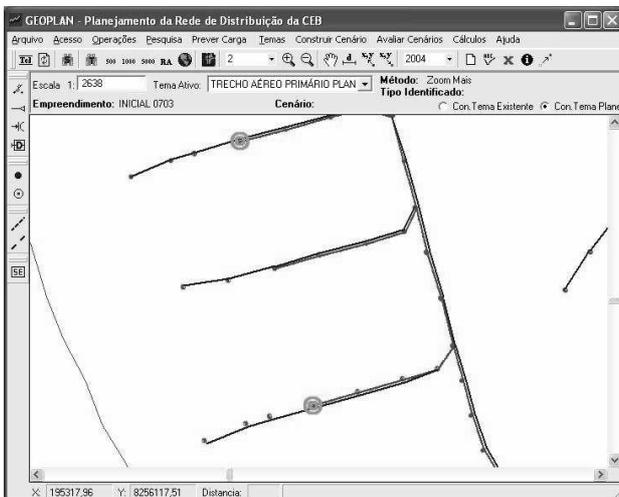


Figura 3: Saída gráfica do aplicativo

## VIII. CONCLUSÃO

Neste trabalho é apresentada a estrutura de um aplicativo de otimização inserido num banco de dados existente com a finalidade de facilitar a tomada de decisões no planejamento de redes de distribuição radiais visando diminuir custos de perdas de energia. A ferramenta utiliza como entrada os dados geo-referenciados, topologias, parâmetros elétricos de condutores e curvas de carga diária existentes no banco de dados. Um processo de verificação e síntese do circuito radial a ser analisado é realizado numa segunda etapa. Tomando como base as curvas de carga diária dos transformadores é utilizada uma função que faz a estimativa da carga em patamares para horizontes de até vários anos. O circuito sintetizado junto com a estimativa da carga em bases anuais ficam disponíveis para a utilização de dois módulos de otimização cuja função é fornecer soluções para reduzir as perdas de energia. Estes módulos têm características metodológicas diferentes e podem ser utilizados pelo usuário de forma independente. Um dos módulos é baseado na observação de que potência reativa indutiva é acumulada ao longo de alimentadores devido á presença de diversos tipos de cargas. O método consiste em tentar reduzir o acúmulo instalando capacitores na medida que seja necessário e levando em consideração o custo de investimento. O outro módulo é baseado na demonstração de que é possível obter aproximações lineares das perdas em função de variáveis operativas numa linha de transmissão. O método consiste em resolver um problema de otimização linear inteiro. Finalmente o aplicativo transfere as soluções obtidas pelo modulo de otimização para o ambiente do banco de dados da empresa onde existe uma representação gráfica e relatórios de saída incluindo análise econômica. Os resultados obtidos em simulações mostram que a empresa pode economizar energia e custos associados entre 6% e 14%. O aplicativo implementado e inserido para atuar conjuntamente com o banco de dados existente facilita o processo de planejamento da rede de distribuição. Dado que é uma ferramenta de fácil utilização, funcionários da empresa com pouco tempo de treinamento podem aproveitar a informação fornecida em telas gráficas para o auxílio na tomada de decisões.

## IX. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte dado pela Companhia de Energia de Brasília – CEB / Projeto Finatec: 550/2002.

## X. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Gallego, R.A., Monticelli, A., Romero, R., "Optimal Capacitor Placement in Radial Distribution Networks", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 16, No. 4, November 2001.
- [2] Ferreira, H., "Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica: Um algoritmo Genético para Alocação Ótima de Capacitores", Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Campina Grande, Tese de mestrado, Julho 2002.
- [3] Nietsch C., Povh D., "Optimizing Power Distribution Networks", IEEE Computer Applications in Power, vol. 14, No.2, April 2001.

- [4] H. Ng., Salama M., Chikhani A., "Classification of Capacitor Allocation Techniques", IEEE Transactions on power Delivery, Vol. 1, No. 4, January 2000.
- [5] Kagan, N., Oliveira, B., "Utilização de algoritmos genéticos para a minimização de perdas em redes de distribuição de energia elétrica", Anais 1998 III Congresso Latino Americano de Distribuição de Energia Elétrica, pp.587-591.
- [6] Miu, K., Chiang, H., Darling, G., "Capacitor placement, replacement and control in large scale distribution systems by a GA-based two-stage algorithm", IEEE Trans. Power Systems, vol. 12, No.3, pp. 1160-1166, Aug. 1997.
- [7] Huang Y., Yang H., Huang C., "Solving the Capacitor Placement Problem in Radial Distribution System using Tabu Search Approach", IEEE Transactions on power Systems, Vol. 11, No. 4, November 1996.
- [8] Sundhararajan S., Pahwa A., "Optimal Capacitor Placement on Radial Distribution Systems Using a Genetic Algorithm", IEEE Transactions on power Systems, Vol. 9, No. 3, Aug. 1994.
- [9] Chiang, H., Wang, C., Cockings, O., Shin, H., "Optimal capacitor placement in distribution systems, part I and part II ", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 5, pp. 634-649, Apr.1990.
- [10] Boone, G., Chiang, H., "Optimal capacitor placement in distribution systems by genetic algorithm", Electric power & Energy Systems, vol. 15, No.3, pp. 155-162, 1993.
- [11] Souza B., Penha F., "Efeito do Controle da Operação de Capacitores sobre a Redução Econômica das Perdas em Alimentadores Radiais", XI Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, Blumenau, Setembro, 1992.
- [12] Baran, M., Wu, F., "Optimal sizing of capacitors placed on a radial distribution system", IEEE Transactions on power Delivery, Vol.4 , No. 1, pp.735-743, Jan. 1989.
- [13] Baran, M., Wu, F., "Optimal capacitor placement on a radial distribution system", IEEE Transactions on power Delivery, Vol.4 , No. 1, pp.725-733, Jan. 1989.
- [14] Civanlar, S., Grainger, J., "Volt/var control on distribution system with lateral branches using shunt capacitors and voltage regulators, part II: the solution method", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol. 104, No.11, pp. 3284-3290, Nov. 1985.
- [15] Kaplan, M., "Optimisation of Number, Location, Size, Control Type, and Control Setting of Shunt Capacitors on Radial Distribution Feeders", IEEE Transactions on power Systems, Vol. PAS-103, No. 9, Sept. 1984.
- [16] Grainger, J., Lee, S., "Capacity release by shunt capacitor placement on distribution feeders: a new voltage dependent model", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol. 101, pp. 1236-1244, May 1982.
- [17] Duran, H., " Optimum number, location, and size of shunt capacitors in radial distribution: a dynamic programming approach", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol., 87, pp. 1769-1774, Sep. 1968.
- [18] Deng, Y., Ren, X., Zhao, C., Zhao, D. , "A Heuristic and Algorithmic Approach for Reactive Power Optimization with time – varying Load Demand in Distribution Systems", IEEE Transactions on Power Systems, October 2002.
- [19] Aguiar, R., Cuervo, P., "Optimal Capacitor Placement in Radial Distribution Networks through a Binary Linear Deterministic Model", Power System Computation Conference - PSCC'05, Liege, Belgica, 22-26 Agosto 2005.