

Modelo multiobjectivo para apoio à localização de condensadores em redes radiais de distribuição

Dulce F. Pires * A. Gomes Martins † C. Henggeler Antunes †

* Escola Superior de Tecnologia de Setúbal
Instituto Politécnico de Setúbal
Portugal
dcosta@est.ips.pt

† Departamento de Engenharia Electrotécnica e Computadores
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Universidade de Coimbra
Portugal

† INESC Coimbra
Portugal
{amartins,ch}@deec.uc.pt

Abstract

The installation of shunt capacitors in electrical distribution networks can effectively reduce energy and peak power losses, while improving quality of service particularly promoting a better voltage profile. Economic and operational benefits depend mainly on the number, location and sizes of the capacitors installed.

In this problem, multiple and conflicting evaluation aspects are generally at stake, such as minimizing capacitor installation cost and reducing system losses. Multiple objective models explicitly address these distinct concerns, and they entail analyzing trade-offs between the different objectives to select a satisfactory compromise solution from the set of potentially non-dominated solutions which can be accepted as the output of the decision process.

In this paper, a tabu search based approach is presented, which provides decision support in the problem of capacitor location in radial distribution networks. The model explicitly considers two conflicting and incommensurate objective functions, related to cost and operation aspects of evaluation.

Resumo

A instalação de condensadores em redes eléctricas de distribuição reduz efectivamente as perdas de energia e a potência de pico, para além de contribuir para uma melhor

qualidade de serviço, nomeadamente na melhoria do perfil de tensões apresentado pela rede. Os benefícios económicos e operacionais obtidos com a colocação de condensadores estão intimamente ligados ao número, localização e dimensão dos dispositivos instalados.

Neste problema existem vários aspectos de avaliação de natureza conflituosa, tais como a redução de perdas e a minimização do custo de instalação das baterias de condensadores. Enveredou-se, por isso, por uma abordagem multiobjectivo, com o desenvolvimento de um modelo que contempla explicitamente os diferentes aspectos de avaliação e permite a selecção de uma solução de compromisso satisfatória, a partir do conjunto de soluções potencialmente não dominadas resultante do processo de pesquisa.

Nesta abordagem, baseada em pesquisa tabu, propõe-se um modelo multiobjectivo de apoio à decisão para o problema da colocação de condensadores em redes de distribuição. O modelo considera explicitamente duas funções objectivo, relacionadas com os aspectos de avaliação referentes ao custo e à redução de perdas.

Keywords: multiobjective models, tabu search, distribution electrical networks.

Title: A multiobjective model for the location of capacitors in radial distribution networks.

1 Introdução

O problema da colocação de condensadores em redes eléctricas de distribuição para compensação de energia reactiva envolve a determinação dos locais, dimensão e número de condensadores a instalar na rede, com o objectivo de atingir o máximo de benefícios, assegurando que as restrições operacionais do sistema, com níveis de carga diferentes, sejam satisfeitas.

Este problema tem sido objecto de estudo por parte de diversos autores, sendo alvo de abordagens diferentes conforme o tipo de metodologias de resolução e/ou simplificações utilizadas. As inúmeras abordagens que foram sendo propostas acompanharam a evolução dos métodos matemáticos existentes para o tratamento deste tipo de problemas.

Os primeiros trabalhos realizados para otimizar a colocação de condensadores usam métodos analíticos para calcular o extremo de uma “função custo” representativa do somatório dos custos a minimizar. Estes métodos permitem obter facilmente soluções para o problema. No entanto, os autores utilizam simplificações irrealistas, tais como a utilização de um único alimentador de secção e características idênticas em todo o seu comprimento, e a carga distribuída uniformemente ao longo do alimentador. Encontram-se neste tipo de abordagens os trabalhos [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7], entre outros.

Os trabalhos que utilizam métodos de programação matemática começaram a surgir quando a utilização de recursos computacionais se tornou mais generalizada. Dentro destes métodos, [8, 9, 10] entre outros, utilizam programação linear. Para tal linearizam o problema formulado, uma vez que este é intrinsecamente de programação matemática com função objectivo não linear, variáveis inteiras e contínuas, e restrições não lineares. [11, 12, 13], entre outros, utilizam programação inteira mista e, apesar de aproximarem o modelo matemático do problema por um modelo linear, consideram a natureza discreta de algumas variáveis.

O reconhecimento da natureza combinatória do problema de colocação de condensadores levou a que, mais recentemente, com o desenvolvimento e a generalização dos métodos

heurísticos, estes tenham vindo a ter uma aplicação crescente na sua resolução. Por exemplo, [14, 15, 16, 17] utilizam algoritmos genéticos na resolução do problema da localização de condensadores. [18, 19, 20, 21], entre outros, recorrem a abordagens baseadas em *Simulated Annealing*. A pesquisa tabu é utilizada por [22, 23, 24, 25], entre outros.

Os métodos baseados em técnicas oriundas da inteligência artificial são dos mais recentes, tendo começado a ser aplicados ao problema da colocação de condensadores apenas na última década. No entanto, existem na literatura científica diversos trabalhos, particularmente os que utilizam teoria dos conjuntos difusos, [26, 27], entre outros, e redes neuronais, [28, 29], entre outros.

2 Modelo Matemático

2.1 Descrição do Problema

O problema de optimização de energia reactiva em redes de distribuição pode formular-se, em linguagem corrente, da seguinte forma. Pretende-se, dada uma rede de distribuição, com um perfil de carga variável no tempo, obter a localização e dimensão adequadas das baterias de condensadores a colocar nos barramentos, com o objectivo de atingir as condições de exploração com menores perdas ao custo mais baixo.

Na formulação matemática do problema, é necessário considerar as características de operação da rede de distribuição e das baterias de condensadores a serem instaladas, que se referem brevemente a seguir.

A rede de distribuição radial pode ser modelada fisicamente com a estrutura que se apresenta na Figura 1 e pormenorizada na Figura 2. A rede tem o seu início na subestação (SE), da qual parte um alimentador principal. Ao longo desse alimentador há pontos de derivação (nós ou barramentos), nos quais se podem encontrar: cargas activas e reactivas alimentadas directamente, ramos laterais, postos de transformação e elementos de controlo da potência reactiva. Estes últimos caracterizam-se por fornecerem energia reactiva à rede (o caso dos condensadores), ou por consumirem energia reactiva da rede (o caso das indutâncias). Os ramos laterais têm a mesma estrutura do alimentador principal, com as modificações devidas à sua menor dimensão.

Neste trabalho consideraram-se as seguintes simplificações:

- A rede trifásica de distribuição é equilibrada e por isso pode ser representada pelo seu diagrama equivalente de uma só fase; todos os estudos feitos sobre uma fase se podem generalizar às outras duas.
- Com os comprimentos típicos dos alimentadores da rede de distribuição radial e com esta a operar aos níveis de tensão utilizados, considera-se que as capacidades *shunt* das linhas são desprezáveis.
- Na resolução do problema da colocação de condensadores optou-se por considerar o instante de tempo em que o trânsito de energia reactiva é mais desfavorável para a operação do sistema, com uma situação simulada de ponta do sistema.

Considera-se como condição do problema que as baterias de condensadores são unidades organizadas em escalões, controladas automaticamente por um relé varimétrico, colocadas no barramento de baixa tensão dos Postos de Transformação escolhidos. De notar que se op-

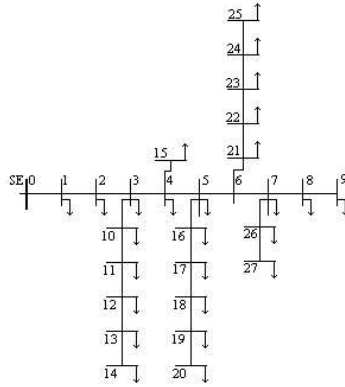


Figura 1: Exemplo de uma rede de distribuição radial, considerando a existência de ramos laterais.

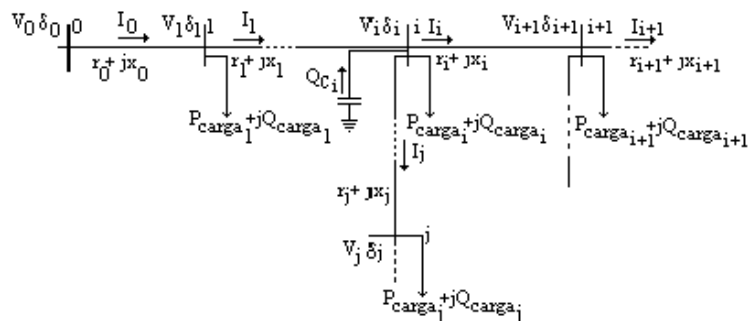


Figura 2: Pormenor da rede de distribuição com as grandezas associadas a cada troço.

Tabela 1: Relação entre a capacidade e custo das baterias de condensadores.

Dimensão das Baterias de Condensadores (Q_{Fi}) (em KVA)	Custo (c_i) (em unidades monetárias)
Q_{F0}	$c_0 = 0$
Q_{F1}	c_1
(...)	(...)
Q_{Fj}	c_j
(...)	(...)
Q_{FY}	c_Y

tou por colocar as baterias de condensadores no lado de baixa tensão, por vários motivos. Por razões económicas: o custo do equipamento a ser instalado para fazer a compensação é muito superior se se colocar a compensação do lado de média tensão. Por razões técnicas: não se encontraram, em nenhuma das marcas de fabricantes de material eléctrico, baterias de capacidade suficientemente baixa para fazer compensação em postos de transformação no lado de média tensão e a instalação de um relé varimétrico, do lado de baixa tensão, suprime a necessidade de telecontrolo, além de permitir controlar as baterias de condensadores por escalões.

A utilização de condensadores com escalões justifica-se para garantir que, em situações de carga diferentes da escolhida para otimizar a colocação de condensadores, não haja sobrecompensação, e as necessidades de potência reactiva se aproximem tanto quanto possível das exigidas pela rede.

Utilizaram-se condensadores de valor padrão para aproximar o mais possível os dados do problema das características dos equipamentos disponíveis no mercado.

Usa-se uma tabela, como por exemplo a Tabela 1, para relacionar o custo das baterias de condensadores com a sua dimensão.

No custo das baterias apenas está considerado o custo de aquisição.

2.2 Modelo Multiobjectivo

Na formulação matemática do problema recorreu-se à seguinte notação:

SE	–	Subestação.
m	–	Índice que referencia os barramentos dos ramos laterais.
n	–	Índice que referencia os ramos laterais.
k	–	Índice que referencia os barramentos do alimentador principal.
L	–	Índice que indica que a variável é de uma carga.
C	–	Índice que indica que a variável é de compensação.
F	–	Índice que indica que a variável é de um condensador padrão (tabela).
c_j	–	Custo associado ao condensador Q_{Fj} .
V_{nm}^k	–	Tensão no barramento m (lateral n que deriva do barramento principal k).
P_{Lnm}^k	–	Carga (potência activa) alimentada a partir do barramento m (lateral n que deriva do barramento principal k).
Q_{Lnm}^k	–	Carga (potência reactiva) alimentada a partir do barramento m (lateral n que deriva do barramento principal k).
P_{nm}^k	–	Potência activa que flui no troço m , i.e. sai do barramento m para o barramento $m + 1$ (lateral n que deriva do barramento principal k).
Q_{nm}^k	–	Potência reactiva que flui no troço m , i.e. sai do barramento m para o barramento $m + 1$ (lateral n que deriva do barramento principal k).
Q_{Cnm}^k	–	Potência reactiva de compensação existente no barramento m (lateral n que deriva do barramento principal k).
B_{nm}^k	–	Barramento m do lateral n , o qual tem origem no barramento principal k .
T_{nm}^k	–	Troço m do lateral n , o qual tem origem no barramento principal k , que liga o barramento B_{nm}^k ao barramento seguinte $B_{n(m+1)}^k$.
Q_{Fj}	–	Capacidade do condensador padrão j (tabela).
M_n^k	–	Número de barramentos do lateral n que deriva do barramento k do alimentador principal.
N^k	–	Número de laterais que derivam do barramento k do alimentador principal.
K	–	Número de barramentos do alimentador principal.
Y	–	Número de opções de baterias de condensadores consideradas para colocação.

O modelo multiobjectivo criado para o problema da localização de condensadores destina-se a apoiar a tomada de decisão no planeamento da compensação de energia reactiva. Este modelo multiobjectivo fornece ao decisor a possibilidade de escolher uma solução (não dominada) de compromisso entre dois objectivos:

- minimizar as perdas do sistema,
 - minimizar o custo da colocação dos condensadores,
- segundo as prioridades de planeamento.

Desta forma, o modelo respeita a natureza diferente de cada um dos objectivos, um de natureza operacional e outro de natureza económica.

As perdas resistivas de um troço T_{nm}^k da rede são dadas pela expressão (2.1). Verifica-se que alterações nas potências de compensação, variáveis Q_{Cnj}^k , ($j=m+1, \dots, M_n^k$) modificam o valor das perdas no troço.

$$r_{nm}^k \frac{P_{nm}^{k\ 2} + Q_{nm}^{k\ 2}}{V_{nm}^{k\ 2}} \tag{2.1}$$

Considerando todos os troços da rede de distribuição teremos a expressão (2.2).

$$\sum_{k=0}^K \sum_{n=0}^{N^k} \sum_{m=0}^{M_n^k} r_{nm}^k \frac{P_{nm}^{k\ 2} + Q_{nm}^{k\ 2}}{V_{nm}^{k\ 2}} \tag{2.2}$$

Esta expressão, correspondente às perdas resistivas do sistema, é a função objectivo a minimizar, apresentada em (2.3).

$$Min \sum_{k=0}^K \sum_{n=0}^{N^k} \sum_{m=0}^{M_n^k} r_{nm}^k \frac{P_{nm}^{k\ 2} + Q_{nm}^{k\ 2}}{V_{nm}^{k\ 2}} \tag{2.3}$$

Os custos de aquisição dos condensadores consideram-se dados por uma tabela tal como se exemplifica na Tabela 1. A opção de colocar o condensador Q_{Fj} no barramento B_{nm}^k incrementa o custo de compensação de c_j unidades. Assim, a função custo pode escrever-se através da expressão (2.4).

$$\sum_{k=0}^K \sum_{n=0}^{N^k} \sum_{m=0}^{M_n^k} \sum_{j=1}^Y j a_{nm}^k c_j \tag{2.4}$$

em que c_j é custo da bateria de condensadores Q_{Fj} ($j = 1, \dots, y$).

A variável inteira $j a_{nm}^k$ toma o valor 1 no caso de existir um condensador do tipo Q_{Fj} no barramento B_{nm}^k como se indica em (2.5).

$$j a_{nm}^k = \begin{cases} 1 & \text{se é colocado um condensador do tipo } Q_{Fj} \text{ em } B_{nm}^k \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \tag{2.5}$$

A expressão (2.6) é a função objectivo a minimizar, relativa ao custo.

$$Min \sum_{k=0}^K \sum_{n=0}^{N^k} \sum_{m=0}^{M_n^k} \sum_{j=1}^Y j a_{nm}^k c_j \tag{2.6}$$

Cada solução do problema tem que respeitar um conjunto de restrições que permitem garantir o funcionamento do sistema e asseguram que as condições, nomeadamente de carácter técnico, definidas previamente para o problema sejam respeitadas.

As restrições de igualdade, equações (2.7) a (2.11), garantem a operação do sistema, e correspondem ao conjunto de equações relativas ao trânsito de potência na rede radial.

As equações (2.7) e (2.8) garantem a mesma condição de operação, mas no primeiro caso a relação foi estabelecida para os laterais, e no segundo para o alimentador principal.

$$P_{n(i+1)}^k = P_{ni}^k - r_{ni}^k \frac{P_{ni}^{k\ 2} + Q_{ni}^{k\ 2}}{V_{ni}^{k\ 2}} - P_{Ln(i+1)}^k, \forall n \neq 0 \text{ e } k \neq 0 \tag{2.7}$$

$$P_{0(i+1)}^0 = P_{0i}^0 - r_{0i}^0 \frac{P_{0i}^{0\ 2} + Q_{0i}^{0\ 2}}{V_{0i}^{0\ 2}} - P_{L0(i+1)}^0 - \sum_{n=1}^{N^{i+1}} P_{n0}^{(i+1)} \quad (2.8)$$

Acontece o mesmo para as equações (2.9) e (2.10), em que a primeira se destina a assegurar a condição da potência reactiva para os laterais e a segunda para o alimentador principal.

$$Q_{n(i+1)}^k = Q_{ni}^k - x_{ni}^k \frac{P_{ni}^{k\ 2} + Q_{ni}^{k\ 2}}{V_{ni}^{k\ 2}} - Q_{Ln(i+1)}^k + Q_{Cn(i+1)}^k, \quad \forall n \neq 0 \text{ e } k \neq 0 \quad (2.9)$$

$$Q_{0(i+1)}^0 = Q_{0i}^0 - x_{0i}^0 \frac{P_{0i}^{0\ 2} + Q_{0i}^{0\ 2}}{|V_{0i}^0|^2} - Q_{L0(i+1)}^0 - \sum_{n=1}^{N^{i+1}} Q_{n0}^{i+1} + Q_{C0(i+1)}^0 \quad (2.10)$$

A relação (2.11) é a equação relativa à tensão nos nós do sistema.

$$V_{n(i+1)}^k\ 2 = V_{ni}^k\ 2 - 2 \times (r_{ni}^k P_{ni}^k + x_{ni}^k Q_{ni}^k) + (r_{ni}^k\ 2 + x_{ni}^k\ 2) \times \left(\frac{P_{ni}^{k\ 2} + Q_{ni}^{k\ 2}}{V_{ni}^{k\ 2}} \right) \quad (2.11)$$

É ainda necessário que a tensão nos nós do sistema permaneça dentro de valores que assegurem a qualidade de serviço. A condição (2.12) garante que o perfil de tensões das soluções admissíveis esteja no intervalo $[V_{nm_{min}}^k, V_{nm_{max}}^k] \forall m, n, k$.

$$V_{nm_{min}}^k \leq V_{nm}^k \leq V_{nm_{max}}^k \quad \forall m, n, k \quad (2.12)$$

A restrição (2.13) impõe que apenas pode ser colocado um condensador em cada nó.

$$\sum_{j=1}^Y j a_{nm}^k \leq 1 \quad \forall m, n, k \quad (2.13)$$

A potência reactiva de compensação em cada barramento é dada pela equação (2.14) e a sua expressão pode ser substituída directamente nas equações em que aparece.

$$Q_{Cnm}^k = b_{nm}^k \sum_{j=1}^Y j a_{nm}^k Q_{Fj} \quad \forall m, n, k \quad (2.14)$$

A variável b_{nm}^k , expressão (2.15), é uma variável binária que indica se é possível ou não colocar condensador no nó B_{nm}^k , uma vez que existem barramentos onde, por razões físicas ou operacionais do sistema, não é possível colocar as baterias de condensadores.

$$b_{nm}^k = \begin{cases} 1 & \text{se é possível colocar condensadores em } B_{nm}^k \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.15)$$

3 Ferramenta Desenvolvida

Com o objectivo de resolver o problema de colocação e operação de condensadores em redes de distribuição de energia alguns autores desenvolveram ferramentas computacionais. SAMVAR

- *Simulated Annealing based computer package for Multi-objective VAR planning* [30], baseado em *simulated annealing*, e GANOS – *Genetic Algorithm Network Optimization System* [31], baseado em algoritmos genéticos, são exemplos de duas aplicações computacionais dedicadas a este problema.

A necessidade de desenvolver uma aplicação computacional específica que permita obter soluções para o problema deve-se à sua complexidade e à inexistência de ferramentas computacionais genéricas para problemas com estas características. O problema é multiobjectivo, com variáveis reais, inteiras e binárias, e apresenta restrições e funções objectivo não lineares, o que dificulta a utilização de ferramentas de optimização (comerciais ou não) já existentes. Além disso a opção de utilizar uma meta-heurística, pesquisa tabu, algoritmos genéticos, *simulated annealing*, ou outra, obriga necessariamente à criação de um ambiente de simulação e teste, em que se tenha o cuidado de adaptar a metodologia de resolução à especificidade do problema.

A aplicação computacional criada especialmente para apoio à decisão na colocação de condensadores em redes de distribuição radiais é essencialmente composta por quatro processos fundamentais: o de análise do trânsito de potência da rede, o de geração de cenários de compensação de forma aleatória, o de criação de cenários de compensação através da pesquisa local baseada na pesquisa tabu e ainda o de selecção das soluções potencialmente não dominadas (p.n.d) do problema.

Cada cenário de compensação gerado, de forma aleatória ou por pesquisa de vizinhança, é analisado sob o ponto de vista do trânsito de potência da rede, verificando-se desta forma a admissibilidade das soluções geradas relativamente às equações de operação do sistema e limites de tensão dos barramentos. No fim de cada iteração, em que são geradas várias soluções admissíveis, o processo de selecção das soluções potencialmente não dominadas do problema actualiza o ficheiro onde se guardam estas soluções.

Quando termina o processo de geração aleatória de soluções, passa-se para o de optimização (com a meta-heurística pesquisa tabu). Neste processo escolhe-se para *semente* da pesquisa uma das soluções potencialmente não dominadas geradas aleatoriamente. Esta solução inicial é um “compromisso” entre perdas resistivas e custo, ou seja é escolhido um cenário de compensação de valor intermédio relativamente a cada uma destas grandezas.

A solução inicial é depois sujeita a um processo de optimização que permite obter uma solução de compromisso satisfatório num tempo de cálculo computacional baixo, através da pesquisa tabu.

3.1 Análise do Trânsito de Potência

Existem diversas abordagens ao problema do trânsito de potência e várias formas de modelar o sistema. No entanto, para a análise do trânsito de potência as aproximações mais conhecidas não foram desenvolvidas para redes com topologias radiais, mas sim para redes com topologias em anel.

As características distintas das redes de distribuição, relativamente às de transmissão – i.e. são redes radiais, com vários pontos de carga e alimentadores de menor comprimento em que a razão R/X é elevada –, fazem com que a aplicação de metodologias convencionais de resolução do trânsito de potência desenvolvidas para redes de transporte, como, por exemplo,

as baseadas no método de *Newton-Raphson*, não convirjam sem a adopção de técnicas de tratamento de matrizes esparsas. Por estas razões, aplicou-se neste trabalho uma metodologia adaptada às características da rede de distribuição radial, que permite analisar o trânsito de potência de forma expedita e com resultados precisos.

Existem alguns trabalhos que se destinam exactamente a tratar o problema do trânsito de potência em redes radiais, tais como [32, 33, 34, 35]. Destes, apenas [33] cria um algoritmo de resolução substancialmente diferente dos convencionais, adaptado a redes com topologia radial. Além disso, trabalhos como [12, 13], dedicados ao problema da optimização de energia reactiva em redes radiais, apresentam contribuições para o cálculo do fluxo de cargas também adaptadas ao carácter radial destas redes. É nestas três últimas contribuições que se baseou o método de análise do trânsito de potência desenvolvido neste trabalho.

A metodologia de análise do trânsito de potência foi validada por comparação dos resultados obtidos, por simulação da rede fornecida pela EDP Distribuição, na aplicação desenvolvida e na aplicação comercial utilizado pela EDP Distribuição, DINIS (*Distribution Network Information System*). Os resultados reproduziram exactamente aqueles que a aplicação DINIS forneceu.

3.2 Geração Aleatória de Soluções

A geração aleatória de soluções é constituída por duas componentes fundamentais: a primeira gera aleatoriamente uma solução inicial, enquanto que a segunda introduz modificações nesta solução também de forma aleatória. O processo que compreende estas duas componentes é repetido durante um número de iterações especificado.

Para criar um cenário de compensação inicial são gerados aleatoriamente (dentro da gama de valores de capacidade e locais possíveis para colocar as baterias de condensadores):

- os locais onde se coloca a compensação;
- a capacidade das baterias a colocar nos barramentos indicados.

A partir deste cenário de compensação inicial, ou primeira solução, são geradas novas soluções através da introdução de outros pontos de compensação relativamente aos que a primeira solução apresenta. Nesta fase ainda não existe a preocupação de minimizar as duas funções objectivo, até porque a introdução de novos pontos de compensação tem como consequência directa o aumento do valor da função custo. Todas as soluções geradas são posteriormente avaliadas através do processo de selecção de soluções potencialmente não dominadas.

Neste caso, apenas se pretende introduzir modificações na solução inicial de uma forma simples e que consome pouco tempo de cálculo. Assim, cria-se uma base de soluções a partir da qual se vai seleccionar a solução que servirá de semente ao processo de optimização com a pesquisa tabu.

Os movimentos que permitem transformar uma solução x numa solução y são obtidos por alteração de apenas um ponto de compensação. O sistema de geração de novas soluções tem por objectivo adicionar novos pontos de compensação à solução inicial, uma vez que esta apresenta, na maioria dos casos, um número reduzido de locais compensados.

O perfil de compensação da solução y obtém-se a partir da solução x da seguinte forma:

Durante k iterações (com k igual ao número de nós da rede):

- passo 1: gera aleatoriamente um novo local de compensação.
- Passo 2: verifica se o local de compensação indicado já tem alguma bateria de condensadores.
- Passo 3: se sim, volta ao passo 1; caso contrário, gera aleatoriamente um valor de capacidade dentro da gama de baterias existentes, e compensa com esse valor o nó indicado no passo 1.
- Passo 4: faz o cálculo do trânsito de potência e grandezas da rede.
- Passo 5: se a bateria de condensadores colocada tem o valor máximo possível de capacidade, termina; caso contrário, incrementa para o valor de capacidade imediatamente superior e vai para o passo 4.

3.3 Melhoria de Soluções com Pesquisa Tabu

Descrevem-se aqui as opções principais do algoritmo da pesquisa tabu desenvolvido para o problema de colocação de condensadores em redes de distribuição. Este algoritmo começou por uma versão simples desta meta-heurística que apenas utilizava memória de curto termo. Posteriormente introduziu-se uma fase de diversificação, com memória baseada na frequência, com a finalidade de procurar soluções com atributos diversos daqueles encontrados até ao momento. É esta última versão, mais completa, que aqui se apresenta.

Numa pesquisa de vizinhança cada solução x do espaço de soluções \mathbf{X} tem uma vizinhança $\mathbf{N}(x)$, definida como um subconjunto do espaço de soluções, $\mathbf{N}(x) \subset \mathbf{X}$, e cada solução $x' \in \mathbf{N}(x)$ pode ser alcançada a partir de x através de uma operação a que se chama movimento. Na versão da pesquisa tabu desenvolvida, as soluções de $\mathbf{N}(x)$ são todas aquelas que se conseguem obter a partir de uma solução qualquer x de acordo com as seguintes alterações:

- por redução da capacidade do condensador instalado no nó i ,
- por eliminação do condensador instalado no nó i ,
- por deslocação da capacidade instalada no nó i para o nó $i+1$,
- por deslocação da capacidade instalada no nó i para o nó $i-1$.

Com a finalidade de clarificar a definição de vizinhança apresentada, consideremos uma rede com 6 nós e a possibilidade de colocar dois tipos de condensadores, a e b (sendo a capacidade de a inferior à capacidade de b). Consideremos também que o seguinte vector representa a posição dos condensadores nos nós da rede (zero significa a não existência de condensador), de uma solução qualquer x' : 00a0bb. Segundo a definição de vizinhança adoptada tem-se $\mathbf{N}(x') = \{0000bb; 0a00bb; 000abb; 00a0ab; 00a00b; 00ab0b; 00a0ba; 00a0b0\}$.

Com a adopção deste tipo de vizinhança obteve-se um espaço de pesquisa bastante alargado. No entanto, verificou-se que com uma vizinhança mais reduzida a pesquisa não era tão eficaz. De facto, como há restrições à colocação de condensadores em determinados nós, isso tem como consequência uma diminuição das soluções de $\mathbf{N}(x)$, i.e. a não admissibilidade das soluções reduz por si o espaço de pesquisa.

Em cada iteração do algoritmo da pesquisa tabu avalia-se um conjunto de soluções candidatas da vizinhança da solução actual, e não apenas uma solução. A partir deste conjunto de soluções, e considerando a respectiva admissibilidade, escolhe-se a melhor solução para uma dada função de avaliação.

O algoritmo desenvolvido baseado na pesquisa tabu usa uma *lista tabu* do tipo “primeiro a entrar, primeiro a sair” (FIFO – *first in, first out*) de tamanho L . Esta lista contém os índices das últimas L posições que trocaram de valor. Experimentaram-se alguns valores para L , que tipicamente deve variar entre 5 e 11, mas como este valor não revelou ter muita influência no resultado, estabeleceu-se um valor intermédio e os testes apresentados neste texto foram realizados com $L=7$.

Quanto à pesquisa, esta divide-se nas seguintes duas fases:

- uma fase inicial que utiliza, como único registo de memória, a lista tabu.
- Uma segunda fase de *diversificação*. Nesta fase, além da lista tabu é também imposta outra condição baseada na frequência dos valores das variáveis, que consiste no seguinte: uma variável pode trocar de valor se o número de vezes que isso aconteceu em iterações passadas não ultrapassa um determinado limiar.

A introdução de uma fase de diversificação na pesquisa surge da observação das soluções obtidas com o algoritmo simples. Estas apresentavam ainda alguma semelhança com a solução inicial, mesmo após um grande número de iterações. Com a fase de diversificação pretendeu-se encorajar a pesquisa de soluções significativamente diferentes daquela que deu origem à pesquisa.

Esta fase de diversificação usa um registo de memória de frequência dos valores das variáveis. O registo, designemo-lo por *frequência1*, é um vector de dimensão n (número de variáveis) que conta o número de vezes que cada variável trocou de valor em soluções admissíveis. O registo *frequência1* é utilizado na definição de vizinhança da segunda fase: uma solução vizinha de x é candidata a avaliação se resulta da comutação de uma variável x_j não tabu que verifica:

$$\left\{ \begin{array}{ll} frequencia1 < filtro1 & \text{se } x_j \text{ passa a ter compensação (i.e. passa de zero a um valor que} \\ & \text{indica o tipo de condensador)} \\ frequencia1 < filtro0 & \text{se } x_j \text{ deixa de ter condensador (i.e. passa a ter o valor zero)} \end{array} \right. \quad (3.16)$$

No início da segunda fase *filtro1* e *filtro0* são iguais à média dos valores de *frequência1*.

Os dados começam a ser registados em *frequência1* desde o início da primeira fase e são actualizados ao longo da segunda fase.

3.4 Selecção das Soluções Potencialmente não Dominadas

Uma dada solução admissível é não dominada se e só se não existe outra solução admissível que melhore simultaneamente todas as funções objectivo, i.e. a melhoria num objectivo só pode ser alcançada à custa da degradação do valor de pelo menos um dos outros objectivos.

Em problemas de programação matemática multiobjectivo, o cálculo de soluções não dominadas pode ser feito através de funções escalares substitutas cuja solução óptima é solução não dominada do problema multiobjectivo.

Quando a técnica utilizada para a resolução do problema multiobjectivo é uma meta-heurística, não há garantia de que a solução pertença à fronteira eficiente do problema. Podemos então caracterizar estas soluções como potencialmente não dominadas, dado que apenas se garante que o são relativamente ao conjunto de soluções encontradas durante o processo de optimização.

Nas abordagens multiobjectivo com meta-heurísticas em que se gera um conjunto de soluções potencialmente não dominadas, representativo de todo o conjunto de soluções não dominadas, utiliza-se habitualmente uma estrutura de dados que armazena e actualiza as soluções potencialmente não dominadas eficientes encontradas ao longo do processo de pesquisa. O processo de selecção de soluções potencialmente não dominadas desenvolvido neste trabalho baseia-se também na utilização de uma base de dados que facilita a avaliação do conjunto de soluções geradas.

O processo de selecção de soluções potencialmente não dominadas é pela primeira vez chamado no fim da geração aleatória de soluções. De entre todas as soluções admissíveis geradas, são então seleccionadas as soluções potencialmente não dominadas. A solução inicial da pesquisa com a meta-heurística pesquisa tabu é seleccionada a partir deste conjunto.

O processo de selecção de soluções potencialmente não dominadas é novamente chamado no fim de cada pesquisa de vizinhança, para actualizar o conjunto de soluções potencialmente não dominadas do problema. No final de uma corrida da aplicação, este conjunto contém as soluções que permitem traçar a “fronteira” de soluções não dominadas do problema.

4 Aplicação da Ferramenta Desenvolvida a uma Rede de Distribuição da EDP

A ferramenta computacional desenvolvida foi aplicada a três redes reais, duas retiradas da bibliografia [33] e outra cujos dados foram fornecidos pela EDP Distribuição. Os resultados que se apresentam neste artigo foram obtidos com esta última rede.

Em relação aos parâmetros da aplicação que podem ser facilmente modificados, considerou-se o seguinte:

- número de iterações para obter a solução inicial: 20;
- número de iterações da pesquisa tabu: 50;
- tamanho da lista tabu: 7;

Tabela 2: Perdas na rede quando não existe compensação.

	perdas, potência activa (MW)
rede sem compensação	0.2463

Tabela 3: Custo e perdas para a solução inicial da pesquisa tabu.

	custo (milhares escudos)	perdas, potência activa (MW)
solução inicial	8200	0.189

- número de vezes que se reduzem os níveis de reserva (valores máximos que o decisor está disposto a aceitar em cada função objectivo): 2;
- percentagem de redução dos níveis de reserva: 1%;
- posição da solução inicial: ponto intermédio na curva de soluções potencialmente não dominadas.

A rede eléctrica do sistema de distribuição português apresenta 94 nós, distribuídos por um alimentador principal extenso e por 23 laterais. Esta rede caracteriza-se por, em períodos de sobrecarga, como é o que está em estudo, apresentar um perfil de tensões em que a maioria dos nós apresenta um valor abaixo dos 0.93 p.u., que é o limite inferior do intervalo admissível para o valor da tensão.

Na Tabela 2 encontram-se os valores das perdas apresentadas pela rede sem compensação, para o cenário de carga escolhido.

Após a aplicação da abordagem proposta a esta rede, obtiveram-se os resultados ilustrados nas Figuras 3 e 4.

Na figura 3a apresenta-se o número total de soluções geradas e na Figura 3b o subconjunto de soluções admissíveis, enquanto na Figura 4 se apresentam apenas as soluções não dominadas antes e depois da aplicação da pesquisa tabu.

Na Figura 4a assinala-se a solução inicial utilizada para a fase de aplicação da pesquisa tabu, e apresentam-se na Tabela 3 as características desta solução.

Como exemplo de soluções de compensação para a rede em estudo, foram escolhidas as soluções 1, 2 e 3 indicadas na Figura 4b. Na Tabela 4 apresentam-se as características destas soluções.

Os valores da redução global das perdas em potência activa, em relação ao cenário em que não existe qualquer dispositivo de compensação, são apresentados na Tabela 5.

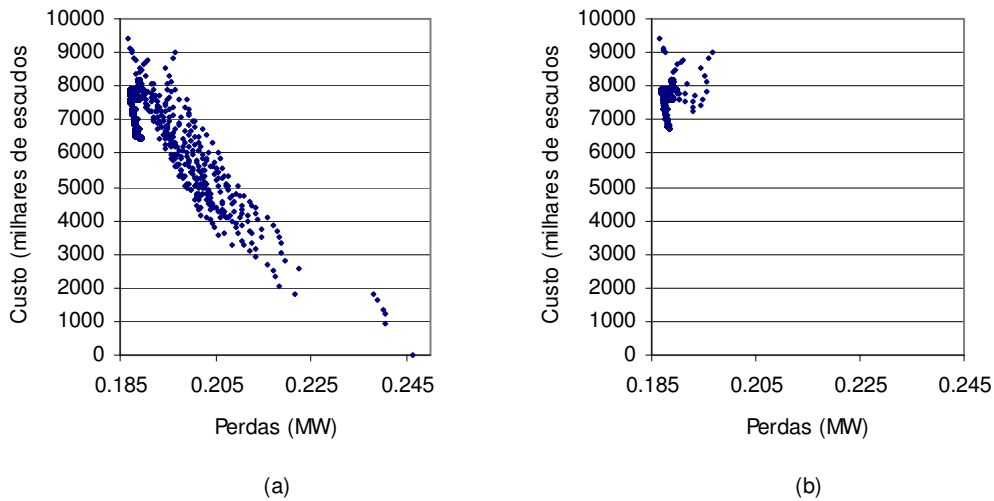


Figura 3: Representação das soluções geradas: total (a), admissíveis (b) para a rede portuguesa de 94 nós.

Tabela 4: Custos e perdas associados a cada uma das soluções exemplo (Figura 4b).

	custo (milhares de escudos)	potência activa de perdas (MW)
solução 1	6711	0.188
solução 2	7245	0.1874
solução 3	7867	0.187

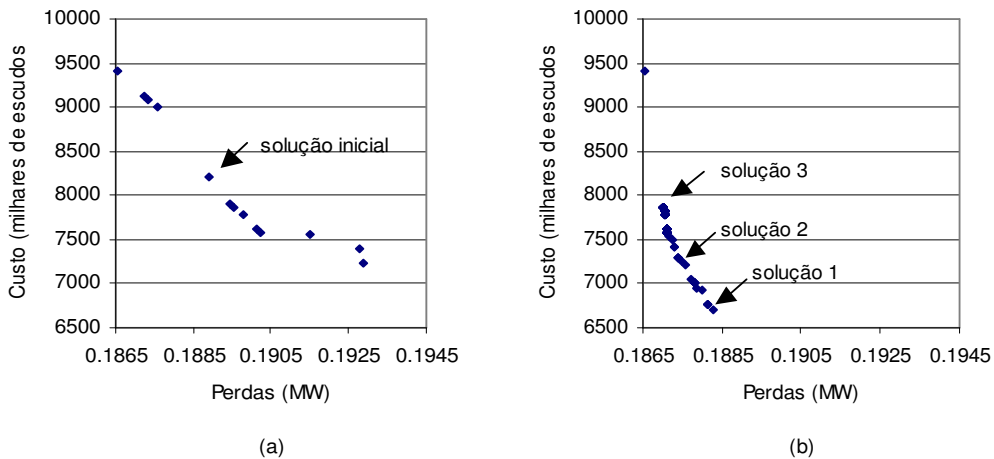


Figura 4: Soluções potencialmente não dominadas: antes (a) e depois (b) da aplicação da pesquisa tabu.

Tabela 5: Redução de perdas, em percentagem, para as soluções exemplo(Figura 4b).

	solução 1	solução 2	solução 3
redução de perdas potência activa (%)	23.5	23.9	24

	sem compensação	solução 1	solução 2	solução 3
distância euclideana	0.783	0.491	0.485	0.477
maior distância	0.11	0.07	0.069	0.068

Tabela 6: Indicadores das melhorias obtidas na tensão.

O perfil de tensões apresentado pela rede deve encontrar-se dentro do intervalo $[0.93, 1.07]$ p.u.. No caso da rede em estudo, para o cenário escolhido, as tensões dos nós, principalmente nas extremidades dos ramos, encontram-se afastadas do limite inferior do intervalo. A compensação de energia reactiva permite melhorar o perfil de tensões da rede, trazendo-o para o intervalo pretendido. De notar que as soluções em que a tensão de algum nó se encontre fora deste intervalo são consideradas não admissíveis, e verifica-se que o intervalo de soluções admissíveis é bastante menor que o total de soluções geradas (Figura 3). Em relação ao perfil de tensões, as soluções que servem de exemplo representam uma melhoria significativa.

O valor da tensão mais afastado do limite inferior do intervalo admissível é o do extremo do alimentador principal, no nó 32. Este valor apresenta um desvio de 0.11 antes da compensação, enquanto que depois da compensação, para a solução exemplo 2, é de apenas 0.069. Como indicador da melhoria global do perfil de tensões do sistema, pode considerar-se a distância euclideana (Tabela 6) ao perfil “ideal” em que se consideram todos os nós com a tensão de 1 p.u..

5 Conclusões

O problema da colocação de condensadores em redes de energia, que envolve a localização e dimensionamento de baterias de condensadores para compensação da energia reactiva, apresenta aspectos conflituosos. A redução de custos de investimento, aquisição, operação e manutenção das baterias, está em conflito com a redução das perdas do sistema por compensação da energia reactiva. Por outro lado, a melhoria do perfil de tensões do sistema pode também estar em conflito com qualquer um dos outros aspectos de avaliação. Assim, o problema é por natureza um problema multiobjectivo, envolvendo aspectos económicos, de operação e de qualidade de serviço.

No modelo matemático desenvolvido foram tidos explicitamente em conta os dois primeiros aspectos, de redução do custo e das perdas do sistema. O último aspecto, perfil de tensões, foi considerado como restrição, embora se tenha criado, na fase de análise de soluções, um indicador para que o agente de decisão possa aferir a qualidade das soluções sob esse aspecto.

Com o auxílio do modelo multiobjectivo criado para o problema de colocação de condensadores, o gestor da rede tem possibilidade de escolher soluções de compromisso satisfatórias entre os dois objectivos que estão em jogo e lhe interessam em simultâneo. O modelo matemático tem ainda a vantagem de respeitar a natureza discreta das variáveis, relativamente à capacidade e local de instalação. Permite também escolher previamente os locais onde não convém colocar compensação, seja por motivos técnicos, seja por motivos operacionais.

A aplicação da ferramenta desenvolvida a casos reais, nomeadamente da rede da EDP Distribuição, comprova que através desta metodologia é possível atingir um conjunto de soluções

potencialmente não dominadas com boas características, ou seja, que reduzem consideravelmente o volume de perdas e apresentam baixos custos.

Agradecimentos Este trabalho foi parcialmente financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia, através do projecto POCTI/38422/ESE/2001.

Os autores agradecem ao revisor os comentários construtivos e a discussão suscitada no processo de revisão científica deste texto, que contribuíram quer para a melhoria e a clarificação de aspectos do artigo, quer para futuros desenvolvimentos.

6 Referências

- [1] Cook, R.F., (1964), "Calculating Loss Reduction Afforded by Shunt Capacitor Application", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-83, 1227-1230.
- [2] Schmill, J.V., (1965), "Optimum Size And Location Of Shunt Capacitors On Distribution Feeders", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-84 (9), 825 - 832.
- [3] Chang, Nelson E. (1969), "Locating Shunt Capacitors On Primary Feeder For Voltage Control And Loss Reduction", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-88 (10), 1574-1577.
- [4] Chang, Nelson E. (1971), "Generalized Equations On Loss Reduction With Shunt Capacitors", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-91, 2189-2195.
- [5] Bae, Y.G., (1978), "Analytical Method Of Capacitor Allocation On Distribution Primary Feeders" IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-97 (11), 1232 - 1238.
- [6] Grainger, J. J., S.H. Lee (1981), "Optimum Size and Location of Shunt Capacitors for Reduction of Losses on Distribution Feeders", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-100 (3), 1105 - 1118.
- [7] Grainger, J. J., S.H. Lee (1982), "Capacity Release by Shunt Capacitor Placement on Distribution Feeders: a New Voltage-Dependent Model", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-101 (5), 1236 - 1244.
- [8] Pretelt, A. M. (1971), "Automatic allocation of network capacitors", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-90 (1), 54 - 61.
- [9] Fernandes, R.A., F. Lange, R.C. Burchett, H.H. Happ, K.A. Wirgau (1983), "Large Scale Reactive Power Planning", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-102 (5), 1083 - 1088.
- [10] Chung, T. S., Ge Shaoyun (1997), "A Recursive LP-Based Approach for Optimal Capacitor Allocation with Cost-Benefit Consideration", Electric Power Systems Research, 39(1997), 129-136.
- [11] Aoki, K, M. Fan, A. Nishikori, (1988), "Optimal VAR Planning by Approximation Method for Recursive Mixed-Integer Linear Programming", IEEE Transactions on Power Systems, PWRS-3 (4), 1741 - 1747.
- [12] Baran, M. E., F.F. Wu (1989a), "Optimal Capacitor Placement on Radial Distribution System", IEEE Transactions on Power Delivery, 4 (1), 725-734.
- [13] Baran, M. E., F.F. Wu (1989b), "Optimal Sizing of Capacitors Placed on a Radial Distribution System", IEEE Transactions on Power Delivery, 4 (1), 735-743.

- [14] Iba, Kenji (1994), "Reactive Power Optimization by Genetic Algorithm", *IEEE Transactions on Power Systems*, 9(2), 685-692.
- [15] Lee, K.Y., Xiaomin Bai, Young-Moon Park (1995), "Optimization Method for Reactive Power Planning by Using a Modified Simple Genetic Algorithm", *IEEE Transactions on Power Systems*, 10(4), 1843-1850.
- [16] Kim, K.-H., S.-K. You (1999), "Voltage Profile Improvement by Capacitor Placement and Control in Unbalanced Distribution Systems Using GA", *Proceedings of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, 2, 800-805.
- [17] Levitin, G., A. Kalyuhny, A. Shenkman, M. Chertkov (2000) "Optimal Capacitor Allocation in Distribution Systems Using a Genetic Algorithm and a Fast Energy Loss Computation Technique", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 15(2), 623-628.
- [18] Chiang, H.D., J.C. Wang, O. Cockings (1990a), "Optimal Capacitor Placements in Distribution Systems Part I: A New Formulation and the Overall Problem", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 5 (2), 634-642.
- [19] Chiang, H. D., J.C. Wang, O. Cockings (1990b), "Optimal Capacitor Placements in Distribution Systems Part II: Solution Algorithms and Numerical Results", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 5 (2), 643-649.
- [20] Hsiao, Y.-T, C.-C. Liu, H.-D. Hsiao, Y.-L. Chen (1993), "A New Approach for Optimal VAR Sources Planning in Large Scale Electric Power Systems", *IEEE Transactions on Power Systems*, 8(3), 988-996.
- [21] Chang, C. S., J.S. Huang (1997), "Optimal SVC Placement for Voltage Stability Reinforcement", *Electric Power Systems Research*, 42(1997), 165-172.
- [22] Yang, H.-T., Y.-C. Huang, C.-L. Huang (1995), "Solution to Capacitor Placement Problem in a radial Distribution System Using Tabu Search Method", *Proceedings of EMPD '95, International Conference on Energy Management and Power Delivery*, 1, 388-393.
- [23] Mori, H., Y. Ogita (1999), "Capacitor Placement Using Parallel Tabu Search in Distribution Systems", *Proceedings of SMC '99, International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 6, 521-526.
- [24] Mori, H., Y. Ogita (2000), "Parallel Tabu Search for Capacitor Placement in Radial Distribution Systems", *Proceedings of IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, 4, 2334-2339.
- [25] Chang, C.S., L.P. Lern (2000), "Application of Tabu Search Strategy in Solving Non-Differentiable Savings Function for the Calculation of Optimum Savings Due to Shunt Capacitor Installation in a Radial Distribution System", *Proceedings of IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, 4, 2323-2328.
- [26] Chin, H.-C., W.-M. Lin (1994), "Capacitor Placements for Distribution Systems with Fuzzy Algorithm", *TENCON '94 IEEE Region 10's Ninth Annual International Conference. The Frontiers of Computer Technology*, 2, 1025-1029.
- [27] Abdul-Rahman, K. H., S.M. Shahidehpour, M. Daneshdoost (1995), "AI Approach to Optimal VAR Control With Fuzzy Reactive Loads", *IEEE Transactions on Power Systems*, 10(1), 88-97.
- [28] Dash, P.K., S. Saha, P.K. Nanda (1991), "Artificial Neural Net Approach for Capacitor Placement in Power System", *Proceedings of the First International Forum on Applications of Neural Networks to Power Systems*, 1, 247-250.
- [29] Zhu, J. Z., C.S. Chang, W. Yan, G.Y. Xu (1998), "Reactive Power Optimisation Using an Analytic Hierarchical Process and a Nonlinear Optimisation Neural Network Approach", *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, 145(1), 89-97.

- [30] Hsiao, Y.-T, H.-D. Hsiao, C.-C. Liu, Y.-L. Chen (1994), "A Computer Package for Optimal Multi-Objective VAR Planning in Large Scale Power Systems", *IEEE Transactions on Power Systems*, 9(2), 668-676.
- [31] Glamocanin, V., D. Andonov, D. Trajanov, B. Stojkoska (1998), "Optimal Power System VAR Planning by AI Algorithm", *MELECON 98, 9th Mediterranean Electrotechnical Conference*, 2, 1066-1070.
- [32] Chen, T.-H., M.-S. Chen, K.-J. Hwang, , P. Koats , E.A. Chebli, (1991), "Distribution Sstem Power Flow Analysis - A Rigid Approach", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 6(3), 1146-1152.
- [33] Das, D., H. S. Nagi, D.P. Kothari, (1994), "Novel Method for Solving Radial Distribution Networks", *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, 141(4), 291-298.
- [34] Moon, Y.-H., B.-K. Choi, B.-H. Cho, S.-H. Kim, B.-N. Ha, J.-H. Lee (1999), "Fast And Reliable Distribution System Load Flow Algorithm Based On The Y/Sub Bus/ Formulation", *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting 1999.*, (1), 238-242.
- [35] Expósito, A.G., E. R. Ramos (1999), "Reliable Load Flow Technique for Radial Distribution Networks", *IEEE Transactions on Power Systems*, 14 (3), 1063 - 1069.