



GRUPO IV

**GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA
(GAT)**

**LOCAÇÃO DE SUPORTE REATIVO CONSIDERANDO A MINIMIZAÇÃO DOS
INVESTIMENTOS E DAS PERDAS ATRAVÉS DE MODELO FLEXÍVEL DE BUSCA
HEURÍSTICA**

Nelson Kagan *
EPUSP - Escola Politécnica da USP

Carlos C. Barioni de Oliveira
EPUSP - Escola Politécnica da USP

RESUMO

Este artigo apresenta metodologia para a determinação de suporte reativo em redes de transmissão de energia elétrica, através de modelo flexível de busca heurística.

O método baseia-se em uma ferramenta computacional desenvolvida pelos autores, que permite o tratamento de problemas de decisão com restrições, determinando soluções otimizadas do problema através de procedimento de busca pela melhor escolha, na qual o engenheiro pode intervir de modo efetivo para satisfação de seus objetivos e caracterização de sua estrutura de preferências. A linguagem utilizada nesta ferramenta é bastante flexível, permitindo a rápida modelagem de aspectos relativos ao problema de suporte reativo, tais como consideração de instalação de capacitores, alteração de taps de transformadores de potência, etc. Além disso, a estrutura de preferências permite a consideração de múltiplos objetivos, tais como a minimização de investimentos e das perdas no sistema. Um exemplo de aplicação ilustra a metodologia proposta.

PALAVRAS-CHAVE:

Locação de Suporte Reativo. Bancos de Capacitores. Taps de transformadores.

1.0 - INTRODUÇÃO

O problema de locação de suporte reativo para o controle de tensão já foi amplamente considerado em

trabalhos técnicos. Grande parte das pesquisas baseiam-se na utilização de modelos de análise de sensibilidade em torno do ponto de operação do sistema e em modelos de programação matemática.

Em [1] e [2], são apresentados trabalhos que permitem a determinação do ponto de locação e quantidade de bancos de capacitores a serem instalados na rede de transmissão. Estes procedimentos baseiam-se em procedimento passo-a-passo, permitindo a determinação de soluções otimizadas do problema. Isto é, a cada passo, através de análise de sensibilidade de determinado índice (por exemplo, o ganho de tensão no sistema) com relação a instalação de um banco de capacitores em determinado local do sistema, permite-se avaliar a barra que deve receber uma unidade adicional naquele passo. O processo é continuado até que as restrições do problema sejam todas satisfeitas. Conforme publicado em [2], este tipo de enfoque permite a determinação de soluções viáveis e adequadas, de modo eficiente, em redes de transmissão. Também em redes de distribuição, a mesma idéia tem sido aplicada com muito êxito [8,9]. Obviamente, o espaço de soluções pode ser melhor explorado, no sentido de serem obtidas soluções ainda melhores em relação àquela solução inicial e viável obtida. Além disso, entende-se que outros equipamentos para o suporte reativo podem ser considerados, como alternativa aos bancos de capacitores. Assim é importante que o engenheiro tenha flexibilidade na escolha dos tipos de equipamentos e nos objetivos que deseja alcançar quanto ao problema de suporte reativo.

O problema assim formulado, quando aplicado a redes elétricas de dimensões reais, caracteriza-se pela natureza combinatorial das alternativas a serem analisadas na busca de soluções otimizadas. Os autores já apresentaram diversos trabalhos em que tratam de problemas dessa natureza [5,6,7], com a utilização de uma ferramenta computacional da área de Inteligência Artificial. Esta ferramenta, denominada *FCDP*, que trata de Problemas de Decisão com Restrições, constitui-se numa *shell*, na qual o problema a ser tratado é representado através de metas, *frames*, operadores, restrições e funções específicas que direcionam o processo de busca de soluções. O procedimento de busca é realizado por um mecanismo de inferência, que pode utilizar dois tipos de técnicas de busca em árvore: busca em profundidade (*depth-first search*) ou busca pela melhor escolha (*best-first search*).

Uma meta básica do problema é a de conduzir os valores de tensão de todas as barras da rede para uma faixa admissível. Para os capacitores, em geral, são consideradas unidades-padrão de potências nominais pré-definidas. Para os taps de transformadores, por exemplo, são considerados valores de taps discretos para os transformadores de potência em análise.

Este artigo permite demonstrar a viabilidade deste tipo de ferramenta para o problema de suporte reativo de redes de transmissão, mostrando que a consideração de outros equipamentos e diferentes objetivos a serem fixados pelo engenheiro podem ser facilmente modelados, sem a necessidade de refazer sistemas computacionais, como era o caso dos algoritmos procedurais normalmente utilizados para a análise de redes.

2.0 – LOCAÇÃO DE SUPORTE REATIVO

2.1 Considerações Gerais

O problema de locação de suporte reativo em redes de transmissão, conforme tratado neste artigo, consiste na determinação da potência reativa a ser injetada numa barra do sistema através da instalação de bancos de capacitores ou na determinação do tap de determinados transformadores de potência. A meta principal é conduzir o perfil de tensões para uma faixa aceitável de valores, assumida entre um limite mínimo e um máximo, para todas as barras. Para obtenção desta condição, são vislumbrados dois objetivos, quais sejam o de minimizar as perdas ativas (ou técnicas) totais na rede e o de minimizar o custo de investimento nos equipamentos. Assim sendo, é de

importância fundamental a análise de sensibilidade relativa às variações de tensão nas barras do sistema em função da alteração de reativos injetados em determinada barra do sistema ou em relação à alteração do valor de taps de transformadores.

Considera-se que o sistema de transmissão opera em determinada condição de operação, cujos valores de tensão, carregamento e perdas são determinados por técnicas convencionais de análise de redes, como o método de fluxo de potência Newton Raphson. É possível, a partir da matriz estendida do Jacobiano, avaliar as sensibilidades de tensão e perdas no sistema, em função das alterações de reativos e taps de transformadores. No entanto, seguindo a metodologia já utilizada pelos autores em [2], utiliza-se análise de sensibilidade baseada na matriz de impedâncias nodais, que fornece muitos bons resultados no tocante às variações de tensões nas barras do sistema.

2.2 Bancos de Capacitores

Os bancos de capacitores são representados pelo modelo de impedância constante (obviamente, o valor da impedância do capacitor não varia com a tensão) e a corrente correspondente pode ser avaliada por:

$$I_{cap,k} = j\omega CV_k = jq_{cap}V_k \quad (1)$$

na qual:

$I_{cap,k}$: corrente do capacitor na barra em k , em pu.

q_{cap} : potência reativa do banco, em pu, para tensão nominal de 1pu, igual a ωC .

V_k : tensão na barra k , em pu.

O ganho de tensão devido a instalação de um banco de capacitores com potência nominal q_{cap} numa barra k pode então ser avaliado por:

$$Ganho_k = \sum_{i \in \Omega_b} \Delta V_i / Cus_{cap} \quad (2)$$

na qual:

ΔV_i : aumento de tensão na barra i , no qual qualquer acréscimo a partir da tensão mínima é desconsiderado;

Cus_{cap} : custo de instalação do banco de potência q_{cap} ;

Ω_b : conjunto de barras com tensão abaixo da mínima.

O acréscimo de tensão, em uma dada barra, pode ser avaliado a partir do teorema da superposição, conforme ilustrado na figura 1, na qual a rede da figura 1a. pode ser decomposta nas duas redes, cfr. figuras 1b e 1c.

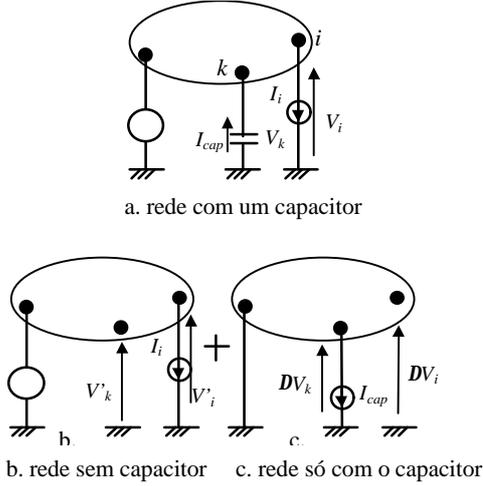


FIGURA 1- Acréscimo de tensão por superposição

Sendo a corrente do capacitor igual a $j q_{cap} V_k$, a tensão depois da instalação do banco pode ser dada pela soma das tensões $V'_k + \Delta V_k$. O acréscimo de tensão ΔV_k (cfr. fig. 1c) é avaliado por $-z_{kk} j q_{cap} V_k$, na qual $z_{kk} = r_{kk} + j x_{kk}$ é a impedância de Thevenin vista da barra k . Assim:

$$V = V'_k - z_{kk} j q_{cap} V_k \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_k \frac{V'}{1 + j z_{kk} q_{cap}} = \frac{V'}{1 - x_{kk} q_{cap}}$$

As tensões nas demais barras podem também ser avaliadas por superposição, isto é:

$$V_i = V'_i - z_{ki} j q_{cap} V_k \cong V'_i + \frac{x_{ki} q_{cap} V'_k}{1 - x_{kk} q_{cap}} \quad (4)$$

na qual $z_{ki} = r_{ki} + j x_{ki}$ é a impedância de transferência entre a barra k e a barra i .

A variação de perdas em um trecho genérico pq , Δp_{pq} , pode ser avaliada a partir da variação de corrente naquele trecho. Assumindo que somente uma impedância série, z_{pq} , represente a ligação pq , a variação de perdas neste trecho pode ser dada por:

$$\Delta p_{pq} = R_{pq} (I'^2_{pq} - I^2_{pq}) \quad (5)$$

onde:

I'_{pq} - módulo da corrente no trecho pq antes da instalação do banco de capacitores na barra k .

$I_{pq} = \left| \left(\frac{V_p - V_q}{z_{pq}} \right) \right|$ - módulo da corrente no trecho pq depois da instalação do banco em k .

A variação de perdas totais na rede será $\sum_{pq} \Delta p_{pq}$ e o ganho em perdas pode ser dado por:

$$Gper_k = \sum_{pq} \Delta p_{pq} / Cus_{cap} \quad (6)$$

2.3 Taps de Transformadores

O modelo de transformador com tap variável é normalmente aquele representado na figura 2a ou na figura 2b. As admitâncias Y_p e Y_q são dadas por:

$$Y_p = (\mathbf{a} - 1)\mathbf{a} / Z_{pq} \quad (7)$$

$$Y_q = (1 - \mathbf{a}) / Z_{pq}$$

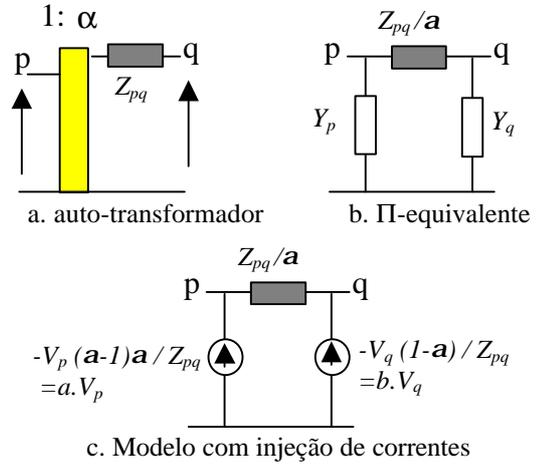


FIGURA 2 – Modelo do transformador

A partir do modelo da figura 2b, pode-se determinar um modelo por injeção de correntes, cfr. figura 2c. Assumindo-se inalterada a impedância série do modelo Π -equivalente com a variação de tap (α), pode-se avaliar as variações de tensão nas barras p e q de modo análogo ao caso do capacitor, porém com duas injeções de correntes, isto é injeção de corrente aV_p na barra p e bV_q na barra q . Assim, aplicando-se superposição de efeitos, tem-se:

$$\begin{aligned} V_p &= V'_p + aV_p Z_{pp} + bV_q Z_{pq} \\ V_q &= V'_q + aV_p Z_{pq} + bV_q Z_{qq} \end{aligned} \quad (8)$$

Donde deriva-se o seguinte sistema de equações:

$$\begin{aligned} (1 - aZ_{pp})V_p - (bZ_{pq})V_q &= V'_p \\ (-aZ_{pq})V_p + (1 - bZ_{qq})V_q &= V'_q \end{aligned} \quad (9)$$

A solução de (9) resulta na obtenção das tensões nas barras p e q , bem como das correntes injetadas nestas barras. As tensões nas demais barras do sistema podem ser avaliadas por expressões análogas às das barras p e q , conforme eqs. (8).

3.0 - MODELAGEM DO PROBLEMA POR FERRAMENTA DE BUSCA HEURÍSTICA

3.1 Considerações Preliminares

Em [5,6,7] descreve-se detalhadamente o FCDP, uma ferramenta desenvolvida para o tratamento de problemas de decisão com restrições. Esta ferramenta conta com linguagem que permite a modelagem de problemas basicamente através da definição de *frames*, metas, restrições e operadores. Em seqüência são descritos, de maneira sucinta, os elementos utilizados para a modelagem do problema de locação de suporte reativo em redes de transmissão, quando se considera somente a inserção de bancos de capacitores. A extensão para outros equipamentos é imediata de ser implementada na ferramenta FCDP.

3.2 Definição das Frames Utilizadas

São definidas as seguintes classes e respectivos objetos para o problema:

- BARRA, contando com os objetos: *tipo* (para diferenciar uma barra de suprimento de uma barra de carga/derivação), *potências ativa e reativa* (da carga ligada à barra), *tensão na barra*, *número de bancos* (para cada potência nominal considerada) e *estado* (se "LIVRE" a barra pode receber bancos);
- LIGAÇÃO, com os objetos: *barras terminais* (identificação das barras inicial e final da ligação), *fluxo* (em % da capacidade da ligação), *capacidade* (máximo fluxo na ligação), *impedância* (valores da resistência e reatância) e *tipo* (transformador ou linha);

- GERAL, contendo dados gerais da formulação: *tensões máxima e mínima na rede*, *reativos dos bancos de capacitores considerados na simulação*, *custo dos bancos de capacitores*, *custo das perdas*, *pesos atribuídos aos ganhos de tensão e de perdas*;
- SISTEMA, com resultados globais: *perdas ativas totais na rede*, *número de bancos de capacitores* (para cada potência considerada), *custo de investimento e tensão mínima na rede*.

3.3 Definição das Restrições

As seguintes restrições são contempladas pelo modelo:

- i. O *carregamento máximo* das ligações deve ser menor que sua capacidade máxima;
- ii. A *tensão máxima* na rede não deve ser ultrapassada em nenhuma barra, isto é, $V_k \leq V_{\max}$; as tensões mínimas nas barras são perseguidas pela meta principal e, portanto, não são consideradas explicitamente como restrições.
- iii. As perdas de uma nova solução não devem ser maiores que as da melhor solução já encontrada, isto é, $P_{nova} < P_{melhor}$.

3.4 Definição das Metas

Duas metas foram estabelecidas na modelagem. A primeira, denominada ESTADO, diz respeito à determinação do estado atual da rede, avaliando o fluxo de potência na condição inicial. A segunda meta, denominada INSTALA, procede à locação propriamente dita, utilizando os operadores INSTALA_CAP e FINALIZA.

3.5 Definição dos Operadores

O operador ESTADO_ATUAL encarrega-se da primeira meta, executando o cálculo de fluxo de potência (função *fluxo*) estabelecendo o estado de operação inicial do sistema.

O operador INSTALA_CAP seleciona as barras com possibilidade de instalação de capacitores e, uma vez escolhida uma determinada barra, atualiza a situação da rede e das *frames*, conforme ilustrado na figura 3.

O operador FINALIZA, que também responde à meta INSTALA, procede à finalização do processo, quando as tensões em todas as barras da rede são não inferiores a um valor mínimo (rotina *verifica_tensão*)

e quando as perdas de uma iteração para a seguinte sofrem aumento (rotina *verifica_perda*).

```
(INSTALA_CAP
  (variaveis
    (barra:BARRA, ?sis:SIST, ?sub:SIST))
    (meta_aplicavel, (Instala, ?sis))
    (dado_que,
      (xmatch, ?barra(.estado, 'LIVRE'))
      (novas_instancias, (?sub))
      (novas_atribuições,
        (atribua, ?sis.novosub, ?sub)
        (instala_cap, ?barra)
        (atualiza_sist, ?sis)
        (fprint, ?barra)
        (atribua, ?sub.perda, ?sis.perda),
        (atribua, ?sub.n_bancos, ?sis.n_bancos)
      )
      (novas metas,
        (Instala, ?sub)
      )
    )
  )
```

FIGURA 3 - Operador INSTALA_CAP

3.6 Estrutura de Preferências

Quando o problema é tratado com uma única função-objetivo, dentre as barras selecionadas pelo operador INSTALA_CAP, escolhe-se aquela que maximiza a função considerada (ganho global de tensão ou redução das perdas totais). Quando os dois objetivos são considerados simultaneamente, faz-se uma composição, através de pesos, resultando numa função de agregação, *IM*, dada por:

$$IM = \max \left(\frac{P_{perda} G_{\Delta Perda} + P_{ganho} G_{\Delta v}}{P_{perda} + P_{ganho}} \right) \quad (10)$$

na qual:

- $G_{\Delta Perda}$: ganho obtido com a redução das perdas;
- $G_{\Delta v}$: ganho obtido com a melhoria do perfil de tensões;
- P_{perda} : peso atribuído ao objetivo de minimização de perdas;
- P_{ganho} : peso atribuído ao objetivo ganho de tensão.

Os ganhos de perdas e de tensão, por sua vez, são redefinidos da seguinte forma:

$$G_{\Delta Perda} = \frac{C_{per} \sum_{pq} \Delta p_{pq}}{Cq_{cap}} \quad G_{\Delta v} = \frac{C_{\Delta v} \sum_{i \in \Omega_b} \Delta V_i}{Cq_{cap}} \quad (11)$$

nas quais C_{per} e $C_{\Delta v}$ são, respectivamente, o custo unitário das perdas e o custo de imperfeição de tensão.

Na figura 4 apresenta-se um esquema ilustrativo da estrutura de preferências em um dado nó da árvore do procedimento de busca, num caso de se considerar a utilização de bancos de capacitores de 10 MVAR (Cap10) e 20 MVAR (Cap20).

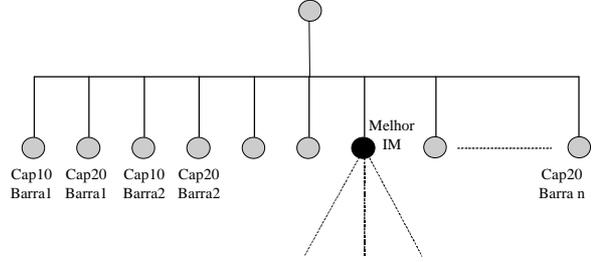


FIGURA 4 - Estrutura de preferências

5.0 - EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Para ilustrar a metodologia proposta, neste item apresenta-se exemplo de aplicação em uma rede de transmissão com 10 barras, conforme figura 5. Será considerado tão somente a meta de serem levadas as tensões para a faixa admissível (entre 0.95 e 1.05 pu), com estrutura de preferências que privilegia as barras com máximo ganho de tensão e mínimo investimento em bancos, conforme eq. 2. Foram fixadas unidades de 30MVAR, tendo estas custo unitário.

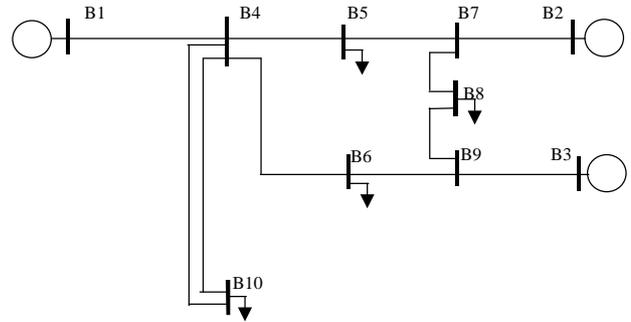


FIGURA 5 – Rede Exemplo

A situação inicial do sistema, resultante do fluxo de potência (meta ESTADO), é apresentada na tabela I.

Aplicando-se, em seqüência, a meta INSTALA, a ferramenta levou à instalação de 3 bancos de capacitores, com 30MVAR cada, sendo 1 na barra B6 e dois na barra B5, conforme a árvore de decisão da figura 6.

O estado final do sistema é também apresentado na tabela I, mostrando que todas as barras do sistema permaneceram na faixa admissível de tensão.

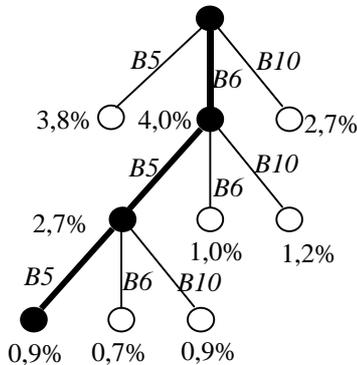


FIGURA 6 – Árvore de Busca e Ganhos de Tensão

TABELA I – Situações Inicial e Final

Barra Núm.	Tensão (pu)		Potência		Capac.
	Antes	Depois	MW	MVAr	MVAr
1	1.040	1.040	-	-	-
2	1.025	1.025	-	-	-
3	1.025	1.025	-	-	-
4	0.955	0.986	-	-	-
5	0.906	0.969	150.0	70.0	60.0
6	0.919	0.964	100.0	60.0	30.0
7	0.981	0.998	-	-	-
8	0.950	0.967	150.0	65.0	-
9	0.992	1.005	-	-	-
10	0.941	0.973	89.6	61.0	-

6.0 - CONCLUSÕES

Neste artigo foi proposta metodologia baseada em busca heurística que permite a modelagem flexível de problemas de locação de suporte reativo em sistemas de transmissão de energia elétrica.

Os operadores da ferramenta FCDP são facilmente implementados, de modo que podem ser incorporados diferentes tipos de equipamentos para compensação reativa, participando de uma competição em função de índices de mérito, que podem exprimir por exemplo relações custo - benefício de cada equipamento. Um caso teste, relativo à locação de bancos de capacitores em redes de transmissão, foi realizado, permitindo vislumbrar as potencialidades da metodologia.

Adicionalmente, podem ser considerados, simultaneamente durante o processo de decisão, diferentes objetivos. O engenheiro pode analisar as

soluções eficientes (não dominadas) do problema multi-objetivo, considerando diferentes pesos para cada objetivo individual.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) PRETELT, A.M. Automatic Allocation of Network Capacitors. *IEEE PAS* 90, 1971
- (2) RAMOS, D. S., ETRUSCO, W. M., ROBBA, E. J., KAGAN, N. Dimensionamento e alocação da compensação reativa para correção do nível de tensão - Metodologia e experiência de aplicação. *CIER*, São Paulo, 1985.
- (3) CHIANG, H. D., WANG, J. C., DARLING, G. Optimal Capacitor Placement, Replacement and Control in Large-Scale Unbalanced Distribution Systems: System Modeling and A New Formulation. *IEEE Trans. On Power Systems*, Vol. 10, n.1, pp. 356-62, Feb. 1995.
- (4) GRAINGER, J.J., CIVANLAR, S. Volt/Var Control on Distribution Systems with Lateral Branches Using Shunt Capacitors and Voltage Regulators - Part I/Part II. *IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems*, PAS-104, n.11, pp. 3278-290, Nov. 1985.
- (5) KAGAN, N., BIGHAM, J. Modelamento de Problemas de Configuração de Sistema de Distribuição de Energia Elétrica por Técnicas de Planejamento de Decisão com Restrições. *I Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, Rio Claro S.P., 1993.
- (6) KAGAN, N.; OLIVEIRA, C.C.B. A Fuzzy Constrained Decision Planning Tool to Model Uncertainties in Multiobjective Configuration Problems. *ISAP - Intelligent Systems Applications to Power Systems*, Flórida, EUA, 1996.
- (7) OLIVEIRA, C.C.B. Configuração de Redes de Distribuição de Energia Elétrica com Múltiplos Objetivos e Incertezas Através de Procedimentos Heurísticos. Tese de Doutorado. EPUSP, São Paulo, 1997.
- (8) KAGAN, N.; OLIVEIRA, C.C.B. Locação de Capacitores em Redes de Distribuição de Energia Elétrica como um Problema de Decisão com Restrições. *III Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, Vitória, E.S., 1997.
- (9) KAGAN, N.; OLIVEIRA, C.C.B. Heuristic Model For The Selection And Allocation Of Shunt Capacitors And Voltage Regulators In Electrical Power Distribution Systems. *ISAP'99 - Intelligent Systems Application to Power Systems*, Rio de Janeiro, R.J., 1999.