

Análise Tecno-Econômica da Correção do Perfil de Tensão de Alimentadores de Média Tensão

M. F. de Medeiros Jr., DCA/UFRN, M. C. Pimentel Filho, DEE/UFRN, A. L. A. de Araújo, COSERN, J. A. N. de Oliveira, DEE/UFRN

RESUMO

O objetivo deste trabalho é mostrar o desenvolvimento e o resultado de aplicações de métodos matemáticos, para definir os parâmetros necessários à aplicação de reguladores de tensão e de capacitores, de maneira que se possa otimizar a utilização desses equipamentos, procurando tornar o perfil de tensão final seja o mais próximo possível do desejável. Faz parte ainda do objetivo uma análise para definir qual a solução economicamente mais viável, para subsidiar o Engenheiro de Planejamento na sua escolha.

PALAVRAS-CHAVE

Regulador de Tensão, Capacitor, Otimização, Perfil de Tensão.

I. INTRODUÇÃO

Dentre os principais equipamentos utilizados para corrigir os baixos níveis de tensão destacam-se os reguladores de tensão e os capacitores. Em geral o processo de dimensionamento e/ou localização desses equipamentos é feito de maneira aproximada e subjetiva, através da análise dos resultados de diversos cálculos de fluxo de carga, para diferentes situações, até que se encontre a um resultado conveniente. Porém, além de demorado, esse tipo de processo pode não ser preciso.

Em um primeiro trabalho, desenvolveu-se uma técnica capaz de determinar a localização ótima de reguladores de tensão monofásicos. Os resultados podem ser aplicados diretamente a conexões trifásicas equilibradas. Em nossa região, entretanto, são frequentes as conexões de reguladores em delta aberto, por razões econômicas. O trabalho aqui proposto consiste em uma generalização do método, para que se possam incorporar conexões trifásicas. Na nova abordagem, foram desenvolvidas as equações de modelagem do regulador em um fluxo de carga trifásico, para sistemas de distribuição, permitindo assim o equacionamento do problema de otimização. Métodos de fluxo de carga trifásicos, bem como métodos de otimização foram investigados, a fim de obter uma modelagem que produzisse resultados práticos satisfatórios, tanto do ponto de vista computacional, como de sua implementação em sistemas reais. Os benefícios da utilização de regula-

dores de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica para melhorar o perfil de tensão são evidentes. Entretanto alguns aspectos importantes da operação dos reguladores devem ser observados, como por exemplo, o aumento nas perdas ativas e o aumento da demanda de consumidores caracterizados por impedância constante, quando da melhoria do perfil de tensão.

Diferentemente dos reguladores, os capacitores atuam na tensão da rede, através da redução da componente reativa da corrente de linha. Como conseqüência, as perdas do sistema diminuem, enquanto a demanda tende a aumentar. Esse aumento, por sua vez, exige acréscimos de corrente, acarretando aumento nas perdas. Essa atuação aparentemente conflitante foi modelada através de um processo de otimização, a fim de demonstrar, para cada caso, os benefícios obtidos da alocação de capacitores.

A compensação de reativos em sistemas de distribuição de energia elétrica tem procurado atender ao objetivo de melhoria do perfil de tensão. Isso pode ser conseguido através da ação de reguladores de tensão e/ou através da alocação de capacitores. O objetivo final deste trabalho foi desenvolver uma ferramenta que permitisse encontrar, para cada caso, a solução mais econômica, levando em conta a representação adequada das cargas, bem como o seu regime de funcionamento (curvas de carga).

II. O REGULADOR DE TENSÃO

O regulador de tensão é um equipamento que, ao ser instalado na rede, mantém um nível de tensão pré-determinado no ponto de regulação, apesar das variações das cargas, desde que sua margem de regulação não seja ultrapassada. Construtivamente, o regulador é composto basicamente de um autotransformador, um comutador automático de derivação (tap) sob carga e de um sistema de controle, que corrige os desvios momentâneos da tensão de regulação, relativos ao valor especificado. Usualmente, os reguladores para aplicação em linhas de distribuição são equipamentos monofásicos. Sua instalação é realizada, através da formação de bancos trifásicos. Dependendo da configuração utilizada, pode-se obter uma margem de regulação de até 15% (delta fechado). Além de decidir sobre a melhor localização do regulador no alimentador, o engenheiro de planejamento deve também definir que tensão deverá ser mantida no seu secundário, ou no ponto de regulação, caso este seja definido. Esse valor não necessariamente deverá ser igual à tensão nominal do sistema.

Os autores agradecem o apoio financeiro obtido da Companhia Energética do Rio Grande do Norte – COSERN, através da destinação de recursos do seu Programa de P&D (ciclo 2001-2002) para o presente trabalho.

M. Firmino de Medeiros Jr. trabalha no Departamento de Engenharia de Computação e Automação da UFRN (e-mail: firmino@dca.ufrn.br).

M. Chianca Pimentel Filho é Doutorando do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica (e-mail: maxchianca@hotmail.com).

A. Definição da Função Objetivo

Idealmente, o melhor ponto de instalação de um regulador de tensão seria aquele que fizesse com que todas as tensões do alimentador fossem iguais a sua tensão nominal (perfil regular nominal). Porém, isso é algo tecnicamente impossível, principalmente, quando se utiliza apenas um banco de reguladores. Entretanto, é importante utilizar uma função objetivo que, quando otimizada, eleve o perfil de tensão, aproximando-o o mais possível do perfil regular nominal. Para implementar esse conceito, define-se a função objetivo, através da eq. (1).

$$F_{obj}(V) = \frac{\sum_{i=1}^{N_{nós}} (V_{otimo} - V_i)^2}{N_{nós}} \quad (1)$$

$F_{obj}(V)$ = Função objetivo
 V_{otimo} = Tensão de otimização
 V_i = Tensão no nó "i"
 $N_{nós}$ = Número total de nós

B. Comportamento da função objetivo

A Fig. 1 mostra a dependência da função objetivo com a posição do regulador, ao longo do caminho principal do alimentador, mantendo a tensão de regulação fixa em 1 p.u.. Como se pode observar no gráfico, o comportamento da função não é propício à utilização de um método baseado em derivadas, uma vez que, no intervalo em questão, a função apresenta variações abruptas, em pontos que não possuem derivadas definidas (vértices).

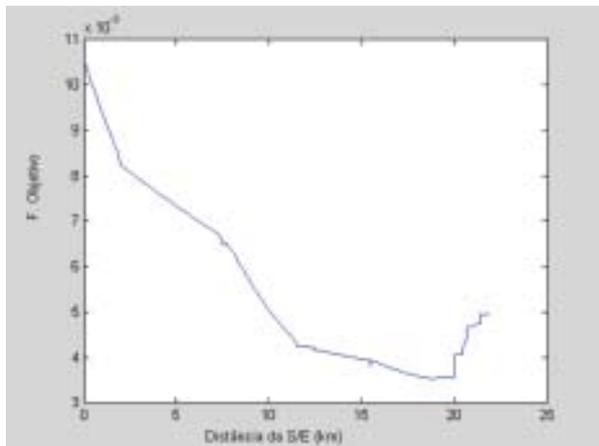


FIGURA 1 - Comportamento da Função Objetivo

Esse comportamento ocorre em virtude de que, cada vez que o regulador *passa* de um trecho de alimentador para um próximo, uma carga (ou um ramal) deixa de ter sua tensão regulada, gerando um acréscimo no valor da função. Portanto, para se aplicar um método baseado em gradiente, é importante que o ponto de inicialização do método esteja próximo da solução. Assim, o processo de busca limitar-se-á em procurar o ótimo apenas naquela região.

C. Pré Otimização

Na figura 2 são apresentados quatro perfis de tensão para um alimentador. O primeiro refere-se ao caso-base, onde o regulador não está atuando; nos outros três, a tensão no nó 17 foi escolhida como *grandeza a regular*, i.e., o nó 17 foi adotado como ponto de regulação, tendo sido admitidos três valores para a tensão de regulação: 0.98 p.u., 1.02 p.u. e 1.04 p.u.. Notar que, para cada incremento na tensão de regulação, existe um aumento proporcionalmente linear nas tensões dos outros nós que se encontram a jusante, estando, portanto, direta ou indiretamente ligado ao nó de regulação.

Considerando uma relação aproximadamente linear entre a tensão no nó de saída do regulador e os outros nós a ele ligados, então, para um incremento de tensão ΔV_R , na saída do regulador, pode-se estimar as tensões nos nós a jusante, através de (2)

$$V_j^t = V_j^{t+1} + \frac{\partial V_j}{\partial V_R} \cdot \Delta V_R \quad (2)$$

Onde:

V_j : Tensão no nó j
 V_R : Tensão no nó de regulação
 t : Contador de iteração
 ΔV_R : Variação de tensão no nó de regulação

Para escolher o melhor ponto de regulação, inicialmente executa-se um cálculo de fluxo de carga, sem considerar a atuação do regulador. Em seguida, calculam-se as derivadas das tensões de todos os nós, com relação à tensão do nó de regulação. Fazendo o nó de regulação *percorrer* todo o alimentador, define-se uma matriz de sensibilidade de tensões, que permitirá estimar, através da equação 2, os máximos valores de tensão obtíveis em todos os nós, para os máximos valores de tensão ajustáveis nos nós de regulação. Em seguida, calculam-se valores aproximados da função objetivo, considerando cada nó como se este fosse de regulação. O nó escolhido para iniciar o processo de otimização será aquele que apresentar o menor valor para a função objetivo.

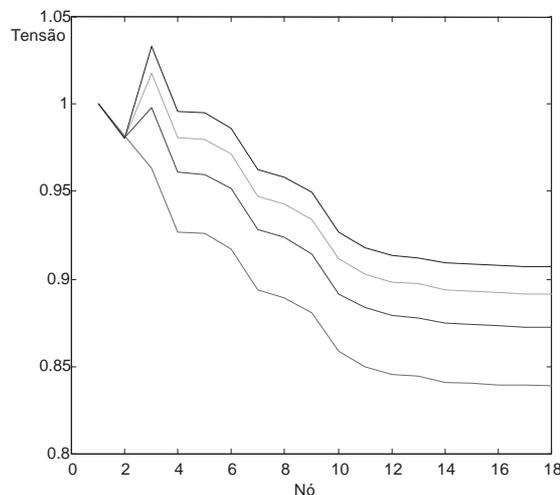


FIGURA 2 - Efeito proporcional da tensão de regulação sobre o perfil de tensão

A figura 3 mostra uma comparação entre o perfil de tensão exato, obtido por um cálculo de fluxo de carga, com um regulador no nó '7' e pelo processo de estimação. Nesse caso, as cargas ativas foram consideradas 50% com potência constante e 50% impedância constante e as reativas, com 100% de potência constante, conforme representação usual do carregamento de transformadores de distribuição. O erro máximo entre os dois processos foi de 0.7%.

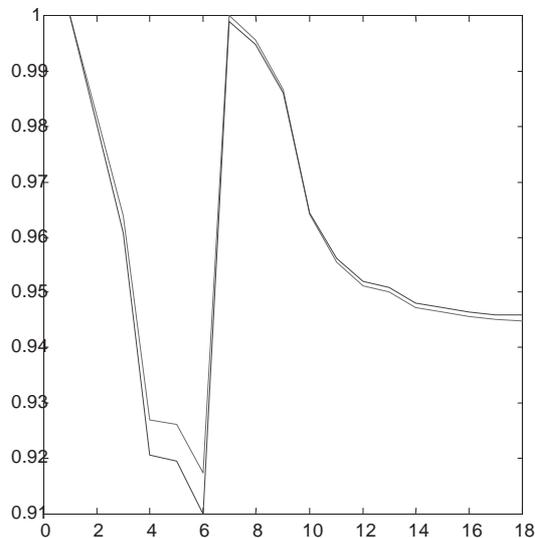


FIGURA 3 - Efeito da instalação de um regulador de tensão no nó 7, sobre o perfil de tensão da rede; Azul: cálculo exato, vermelho: cálculo aproximado. Composição das cargas: usual.

A figura 4 representa o caso em que as cargas foram modeladas com 100% de potência constante. Nesse caso, a aproximação apresentou resultado ainda melhor, sendo o erro máximo verificado entre os dois processos igual a 0,2%.

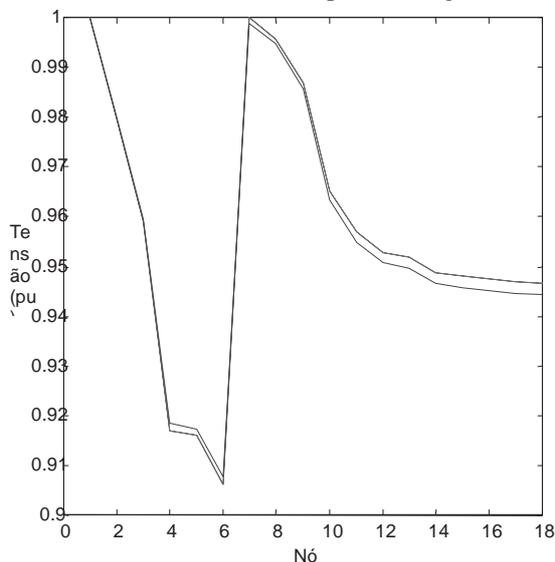


FIGURA 4 - Idem Fig. 3; Composição das cargas: 100% potência constante para as partes ativa e reativa.

Apesar dos bons resultados conseguidos através da linearização, não se pode garantir a existência de um ótimo no vértice de menor valor da função objetivo. Os erros indicados para o exemplo acima foram calculados apenas para os vértices. Portanto, é possível a existência de um mínimo no interior de um trecho de

alimentador. Nessa região, a função objetivo é continuamente diferenciável e, conseqüentemente, pode-se aplicar um método simples, como o do gradiente, para a determinação do possível mínimo.

D. Otimização

Como ponto de partida para o processo de otimização, pode-se adotar, sem perda de generalidade, o ponto médio do trecho de alimentador anterior ao nó que foi escolhido no processo de pré-otimização. A tensão de regulação inicial pode ser ajustada, p.ex., em 1,0 p.u.. Utilizando um algoritmo iterativo, através da equação 3, encontram-se os valores ótimos das variáveis de controle. Um fator relevante a ser mencionado é que as variáveis de controle estão submetidas à restrições de valores máximos e mínimos, ou seja, a tensão de regulação não poderá ser maior que a tensão máxima admissível estipulada para o sistema, e caso a distância correspondente à localização ótima exceda o limite superior ou inferior de definição do trecho de linha, o regulador será localizado pouco antes do limite excedido.

$$\begin{bmatrix} V_r^{t+1} \\ L^{t+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_r^t \\ L^t \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} P_v & P_L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial F_{obj}}{\partial V_r} \\ \frac{\partial F_{obj}}{\partial L} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Onde:

V_r = Tensão de regulação

L = Distância que define a posição do regulador na linha

P = Passo

t = Iteração

III. BANCO DE CAPACITORES

A. Definição da Função Objetivo

Como o objetivo da otimização com bancos de capacitores é o mesmo da com reguladores de tensão, a função objetivo será a mesma:

$$F_{obj}(V) = \frac{\sum_{i=1}^{N_{nós}} (V_{otimo} - V_i)^2}{N_{nós}}$$

$F_{obj}(V)$ = Função objetivo

V_{otimo} = Valor de tensão ótimo;

V_i = Tensão no nó "i"

$N_{nós}$ = Número total de nós

B. Método do Gradiente

Para otimização da função objetivo será aplicado o método do gradiente.

Define-se então a equação de busca do método como:

$$\mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{x}^{(k)} - \alpha^{(k)} \nabla f(\mathbf{x}^{(k)}) \quad (4)$$

onde:

x = Variável de controle

k = Índice da estimativa

$\nabla f(x^{(k)})$ = Gradiente da função $f(x)$

α = Passo

Adaptando para função objetivo proposta:

$$Q_i^{t+1} = Q_i^t + \alpha \cdot \left(\frac{\partial F_{obj}}{\partial Q_i} \right) \quad (5)$$

Onde:

$$\frac{\partial F_{obj}}{\partial Q_i} = -2 \cdot (V_{otimo} - V_i) \cdot \frac{\partial V_i}{\partial Q_i} \quad (6)$$

V_i = Módulo da tensão no nó i ;

t = Iteração;

Q = Reativos injetados no nó i (variável de controle);

$\frac{\partial V_i}{\partial Q_i}$ = Derivada da tensão em relação a potência

reativa no nó i .

Montando o vetor gradiente:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F_{obj}}{\partial Q_1} \\ \frac{\partial F_{obj}}{\partial Q_2} \\ \dots \\ \frac{\partial F_{obj}}{\partial Q_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2 \cdot (V_{otimo} - V_1) \cdot \frac{\partial V_1}{\partial Q_1} \\ -2 \cdot (V_{otimo} - V_2) \cdot \frac{\partial V_2}{\partial Q_2} \\ \dots \\ -2 \cdot (V_{otimo} - V_n) \cdot \frac{\partial V_n}{\partial Q_n} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Obtemos como equação de busca:

$$\begin{bmatrix} Q_1^{t+1} \\ Q_2^{t+1} \\ \dots \\ Q_n^{t+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_1^t \\ Q_2^t \\ \dots \\ Q_n^t \end{bmatrix} + \alpha \begin{bmatrix} \frac{\partial F_{obj}}{\partial Q_1} \\ \frac{\partial F_{obj}}{\partial Q_2} \\ \dots \\ \frac{\partial F_{obj}}{\partial Q_n} \end{bmatrix} \quad (8)$$

IV. ANÁLISE TECNO-ECONÔMICA COMPARATIVA ENTRE A INSTALAÇÃO DE REGULADORES DE TENSÃO E CAPACITORES.

Uma comparação econômica entre as alternativas de compensação requer não apenas uma avaliação do custo dos equipamentos e sua instalação, mas também a variação dos custos com as perdas e o aumento da energia vendida. O trabalho aqui proposto consiste em apresentar um comparativo entre a instalação de regulado-

res de tensão e banco de capacitores para correção do perfil de tensão.

Para que se possa fazer um comparativo entre as duas opções, inicialmente deve-se quantificar os resultados para que se possa fazer uma comparação. Para isso, definiremos uma função LUCRO, que quantificará em reais (R\$) os custos e os benefícios associados a cada opção de correção do perfil de tensão.

Custo com Equipamentos (CE)

Os custos com os equipamentos serão o total do custo de compra e instalação dos equipamentos.

Curva de Carga

Circuitos com uma demanda constante durante todo o dia são algo extremamente difíceis, portanto para que se possa fazer um levantamento de custos com energia e/ou demanda, torna-se necessário fazer uma aproximação da curva de carga com patamares de tamanho e duração distintos. O tamanho e a duração de cada patamar vai depender de um estudo da curva de carga de cada alimentador. Para isso será aplicado um método baseado no algoritmo *k-means*, que permitirá encontrar uma aproximação da curva de carga onde serão preservadas as características básicas da curva original.

Incremento das Vendas (IV)

A modelagem das cargas de um sistema de distribuição, geralmente é feita com 50% de impedância constante e 50% de potência constante para as cargas ativas, e 100% de impedância constante para as cargas reativas. Portanto, quando é verificado um incremento no perfil de tensão do sistema do mesmo modo é verificado um aumento na potência consumida pelo sistema. Este é um fator importante, pois com a melhoria do perfil de tensão, a concessionária além de fornecer uma energia de melhor qualidade também aumenta o seu faturamento.

Custo com Perdas (CP)

As perdas ativas em um alimentador devido ao aquecimento das linhas pela passagem de corrente é algo indesejável e que os engenheiros tentam evitar ao máximo. O aumento do nível de tensão do alimentador pode trazer benefícios, pois as perdas são inversamente proporcionais ao nível de tensão. Por outro lado, um aumento do perfil de tensão gera um aumento do carregamento do sistema, devido as cargas de impedância constante, portanto não se pode afirmar sem uma análise mais detalhada do problema, se um aumento do nível de tensão vai gerar um aumento ou diminuição nas perdas totais do sistema. Para o cálculo do custo com perdas deve-se considerar uma aproximação da curva de carga e através da execução de fluxos de carga calcular o custo com demanda e energia.

Definição da Função LUCRO

A função lucro será definida como a soma de todos os fatores acima mencionados, sendo eles positivos quando estiverem representando uma entrada na caixa da concessionária ou negativo quando estiver representando uma saída.

$$Lu=CE+CFP+IV+CP(9)$$

V. RESULTADOS

Para decidir sobre qual dos dois investimentos (capacitor/regulador) será o mais interessante, do ponto de vista técnico e econômico, foram feitas simulações nos sistemas escolhidos, cujos resultados foram tabulados, de maneira a ressaltar, para cada sistema, as principais características da solução de um fluxo de carga para o caso base, para o caso otimizado por capacitor e para o caso otimizado por regulador. De posse desses resultados, calculou-se através da função lucro, o benefício produzido, a cada mês, com a instalação de cada tipo de equipamento de compensação.

Uma vez que os equipamentos produzem efeitos diferenciados e, em princípio, seus períodos de vida útil podem ser distintos, os benefícios produzidos pela sua instalação não podem ser comparados diretamente. Torna-se necessário, primeiramente, referir o capital investido em capacitores ou em reguladores, bem como os recursos produzidos pela sua instalação, a uma mesma base de tempo (por exemplo, um mês ou um ano). A partir desses resultados, realiza-se uma análise econômica, comparando o rendimento que o capital empregado para compra e instalação dos equipamentos produziria se ele fosse aplicado no mercado financeiro (adotou-se, como exemplo, taxa de 2% a.m.), com os benefícios trazidos pela instalação dos equipamentos. Caso o investimento seja economicamente rentável, depois de um certo período, a curva que representa o retorno do investimento irá ultrapassar a curva que representa o capital investido, identificando o ponto (instante) em que se dará o retorno do investimento. A partir daí, os recursos gerados passam a se constituir em lucro líquido. A escolha do esquema de compensação dar-se-á em função do intervalo de tempo necessário ao retorno do investimento, como também do volume de capital a investir e dos lucros globais obtidos, referidos a um mesmo instante de tempo.

Esses parâmetros foram calculados para os sistemas testes, para alguns valores dos tempos de vida útil dos equipamentos. Os gráficos dos resultados de dois sistemas testes, são apresentados a seguir.

1) CAM01C3

Bancos de capacitores

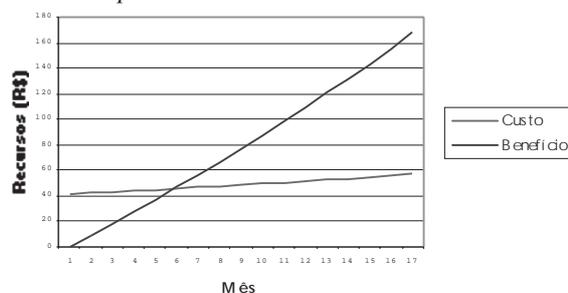


FIGURA 5. Relação custo benefício.

Retorno do investimento em 07 meses

Valor presente dos benefícios depois de 5 anos de funcionamento - 294.980,00 reais

Valor presente dos benefícios depois de 10 anos de funcionamento - 390.203,00 reais

Valor presente dos benefícios depois de 25 anos de funcionamento - 430.767,00 reais

Reguladores de tensão

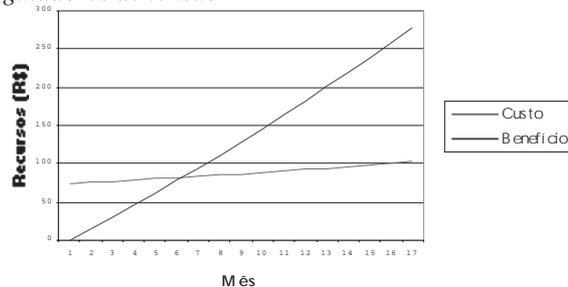


FIGURA 6. Relação custo benefício.

Retorno do investimento em 08 meses

Valor presente dos benefícios depois de 5 anos de funcionamento - 490.747,00 reais

Valor presente dos benefícios depois de 10 anos de funcionamento - 649.166,00 reais

Valor presente dos benefícios depois de 25 anos de funcionamento - 716.651,00 reais

2) EST01S1

Bancos de capacitor

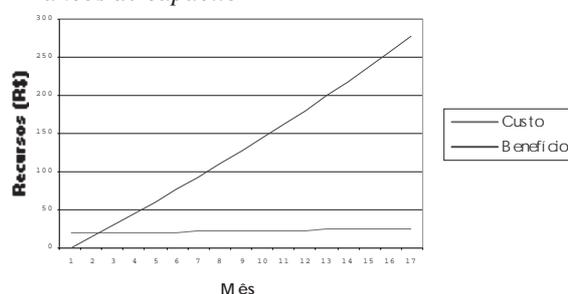


FIGURA 7. Relação custo benefício.

Retorno do investimento em 02 meses

Valor presente dos benefícios depois de 5 anos de funcionamento - 486.541,00 reais

Valor presente dos benefícios depois de 10 anos de funcionamento - 644.000,00 reais

Valor presente dos benefícios depois de 25 anos de funcionamento - 710.948,00 reais

Reguladores de tensão

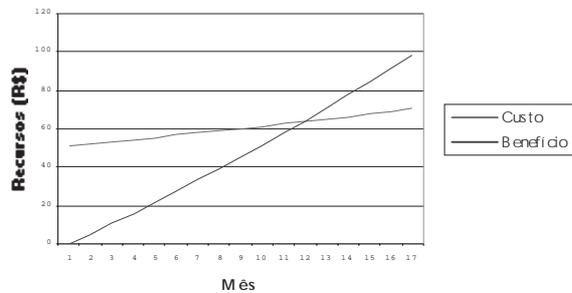


FIGURA 8. Relação custo benefício.

Retorno do investimento em 11 meses

Valor presente dos benefícios depois de 5 anos de funcionamento - 173.581,00 reais

Valor presente dos benefícios depois de 10 anos de funcionamento - 229.515,00 reais

Valor presente dos benefícios depois de 25 anos de funcionamento - 283.581,00 reais

VI. CONCLUSÕES

Esse trabalho apresentou uma ferramenta para que se possa fazer uma análise comparativa mais precisa entre a instalação de bancos de capacitores e reguladores de tensão. Contudo os números só farão ajudar ao engenheiro a tomar uma decisão entre a instalação de um ou outro equipamento, ou até mesmo, dos dois em conjunto, o que pode ser objeto de outros trabalhos.

No primeiro sistema mostrado, se formos comparar apenas o tempo de retorno do investimento, o capacitor levará vantagem. Entretanto, se considerarmos uma vida útil de 25 anos, o regulador passará a ser vantajoso. Já no segundo sistema os bancos de capacitores levam vantagem nesses dois aspectos.

Também poderão existir casos onde uma característica em particular do equipamento possa ser relevante para a sua

escolha. Por exemplo, em circuitos com uma variação relevante da carga durante o período de análise, os reguladores de tensão com seu ajuste automático de TAP's seriam mais indicados do que os capacitores. Já circuitos com uma carga reativa alta, talvez os capacitores seriam mais indicados, pois além de corrigirem a fator de potência na subestação, também, por suprir os reativos mais próximos das fontes de consumo, podem "aliviar" os alimentadores permitindo um fluxo maior de potência ativa.

VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

PERIÓDICOS:

- [1] R. Cespedes, "New Method for the Analysis of Distribution Networks", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 5, Jan 1990.
- [2] C. S. Cheng, D. A. Shirmohammadi, "Three-Phase Power Flow Method for Real-Time Distribution System Analysis", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 10, 1995.
- [3] R. Zimmerman, H. D. Chiang, "Fast Decoupled Power Flow for Unbalanced Radial Distribution Systems", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 10, 1995.

LIVROS:

- [4] A. J. Monticelli, A. Garcia, *Introdução a Sistemas de Energia Elétrica*, Editora Unicamp, Campinas - SP, v.1, 2000, p. 251.

Artigos em Anais de Conferências (Não publicados):

- [5] M. F. Medeiros Jr., P. C. S. Câmara, "Fluxo de Carga Trifásico, com Acoplamento Magnético entre Fases através do Método da Soma de Potências". IV Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, Natal, 19 a 22 de novembro de 2000.
- [6] M. F. Medeiros Jr., P. C. S. Câmara, "Localização Ótima de Reguladores de Tensão em Sistemas de Distribuição Radiais". IV Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, Natal, 19 a 22 de novembro de 2000.
- [7] M. F. Medeiros Jr., M. C. Pimentel Filho, "Optimal Power Flow in Distribution Networks by Newton's Optimization Methods", *Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*.
- [8] Medeiros Jr., M. F., Pimentel Filho, M. C.. (2002). Fluxo de Potência Trifásico pelo Método Soma de Potências: Modelagem de Ajustes e Controles. *VINDUSCON*, Salvador - BA, 03 a 05 de julho de 2002.
- [9] Medeiros Jr., M. F., Pimentel Filho, M. C.. (2002). Localização Ótima de Bancos Trifásicos de Reguladores de Tensão em Alimentadores Radiais de Distribuição. *XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA - CBA2002*, set/2002, Natal - RN.