

Impactos da Compensação Ativa e Reativa na Segurança de Tensão em Sistemas de Distribuição

Mateus Corrêa Lima Pereira
Suelem Christian dos Santos
Universidade Federal de Juiz de Fora
Juiz de Fora, Brasil
mateus.correa@engenharia.ufjf.br

Leandro Ramos de Araujo
Débora Rosana Ribeiro Penido Araujo
Dept. Energia Elétrica- Faculdade de Engenharia
Universidade Federal de Juiz de Fora
Juiz de Fora, Brasil
leandro.araujo@ufjf.edu.br

Resumo—Neste artigo será analisada a utilização de capacitores e/ou geradores distribuídos para melhorar as características de tensão e de transferência de potência em redes de distribuição. As ferramentas computacionais utilizadas para tal fim foram o algoritmo genético (AG) e um programa de cálculo de fluxo de potência “Backward and Forward Sweep”. A análise traz consigo resultados que apontam para a utilização da geração distribuída (GD) ou capacitores como formas efetivas de maximizar a transferência de potência e manter um perfil de tensão adequado.

Palavras chave—Backward and Forward Sweep, sistemas de distribuição, algoritmo genético, otimização, geração distribuída, compensação por potência ativa e reativa, fluxo de potência otimizado.

I. INTRODUÇÃO

O crescimento intenso das cidades nos últimos anos associado à falta de grandes investimentos nos sistemas elétricos, em especial nos sistemas de distribuição, vem trazendo problemas às características ou perfis de tensão destes sistemas. Estes problemas referem-se, principalmente, à queda de tensão por carregamento excessivo dos alimentadores, podendo ocasionar em tensões abaixo do nível mínimo especificado pelas agências de regulamentação, o que é proibido por lei por ser prejudicial a equipamentos.

Hoje em dia, existem medidas as quais podem ser tomadas a fim de se obter uma característica mais eficiente da rede, ou seja, que essa seja capaz de proporcionar maior fluxo de potência para as cargas sem que os limites de tensão sejam excedidos.

Uma dessas técnicas já consagradas pela literatura é a alocação de bancos de capacitores em derivação, que fornecem potência reativa ao sistema e, por consequência, melhoram o nível de tensão na rede podendo elevá-lo, pelo menos, ao nível mínimo estabelecido por lei. Uma das dificuldades deste método é a decisão sobre onde alocar tais recursos ([1]-[2]).

A escolha das barras a serem compensadas é de suma importância. Uma alocação aleatória pode levar o sistema a operar da mesma forma que estava operando sem a compensação ou até mesmo de uma maneira pior [3]. Deve-se, portanto, adotar técnicas de otimização cujo objetivo seja a seleção das barras mais propícias ao recebimento dos compensadores.

A técnica citada acima, alocação de bancos de capacitores, apresenta bons resultados a um custo relativamente baixo, se comparado com os custos dos sistemas em si ou de outros compensadores.

Será abordado neste artigo, além da alocação de capacitores, a alocação de geradores distribuídos com o mesmo fim, melhorar a qualidade da tensão na rede.

A geração distribuída ou GD, é um conceito que vem ganhando força no cenário mundial, isto porque quando a energia gerada está mais próxima do consumidor final, há menos perdas por efeito joule tanto na transmissão quanto na distribuição [4]. Além disso, a GD abre espaço para fontes alternativas de pequeno porte como células fotovoltaicas, turbinas eólicas e até mesmo usinas a biomassa entre outras.

A implementação da GD ao invés de bancos de capacitores possui custos mais elevados (não serão tratados neste artigo), mas apresentam excelentes respostas no que diz respeito ao aumento capacidade de transferência de potência [5].

De posse de todas estas informações este artigo seguirá em busca de configurações ótimas tanto para compensação por potência reativa (bancos de capacitores), quanto por ativa (GD). Os resultados obtidos para carregamento máximo, assim como as barras selecionadas para receber os compensadores em ambos os casos servirão de base para a demonstração da eficácia de cada equipamento e para uma comparação entre os resultados.

II. CONCEITOS BÁSICOS

Nesta seção serão apresentados os métodos de fluxo de potência e fluxo de potência continuado utilizados na análise proposto.

A. Backward and Forward Sweep

A formulação do “BFS” (Backward and Forward Sweep) que foi utilizada para o cálculo do fluxo de potência para um carregamento fixo é apresentada na Figura 1.

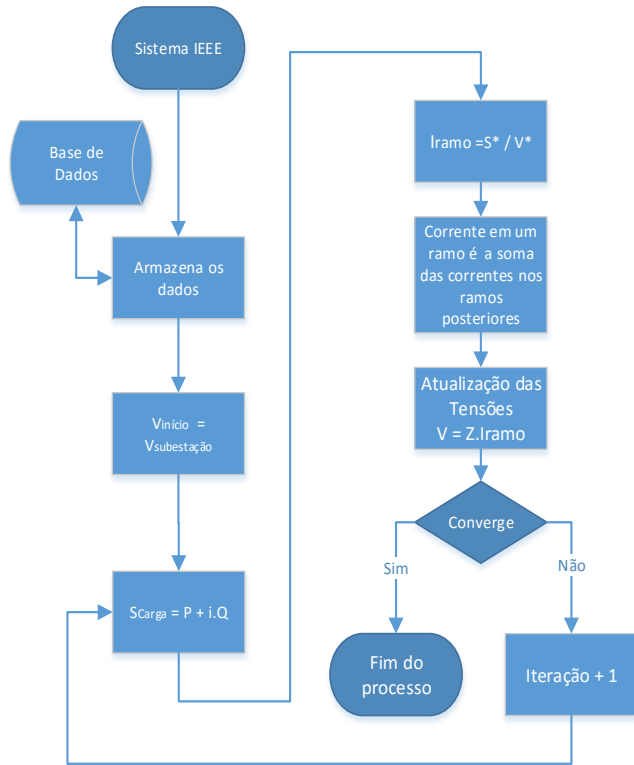


Figura 1 – Estrutura da BFS

Nota-se que há inicialmente o carregamento e armazenamento dos dados do sistema que está sendo utilizado. Em seguida, as tensões iniciais são feitas iguais à tensão na subestação. A carga é especificada por meio dos dados previamente carregados.

Com a carga e a tensão pode-se fazer o cálculo inicial da corrente em cada ramo. As correntes de ramos subsequentes são somadas de maneira retroativa de modo a se obter as correntes em todos os ramos – parte *Forward* (ida). A partir deste ponto ocorrem as atualizações das tensões por meio das correntes e impedâncias entre barras subsequentes – parte *Backward* (volta). O loop continua até que a tolerância seja menor do que um valor previamente definido.

B. Fluxo de Potência Continuado

No fluxo de potência continuado, a carga é aumentada a cada execução e para cada valor de carga é efetuado um fluxo de potência simples utilizando a função explicada anteriormente – BFS, de maneira que se consiga caracterizar este sistema para possíveis aumentos de carga.

O algoritmo do fluxo de potência continuado utilizado neste trabalho é apresentado na Figura 2.

Primeiramente são carregados os dados do sistema, estes dados são armazenados e a partir desses são obtidos os parâmetros iniciais de tensão, corrente e carga. Segue-se com a inicialização do tamanho do “passo” de carga (o passo será abordado com mais detalhes posteriormente) e a variável “Np” a qual especifica o número de passos realizados (esta variável deve ser feita o menor possível de modo a acelerar a convergência – mas deve ser também, grande o suficiente para que haja representação de todos os resultados importantes às análises). Esta variável “Np” funciona como um contador.

O passo de carga é de 5% das potências ativa e reativa iniciais, ou seja, a cada iteração, tanto as potências ativas como reativas demandadas são acrescidas de 5% do valor inicial. Isto se segue até que a menor tensão no sistema atinja um valor menor ou igual a 0.935 pu - V, neste ponto o passo é reduzido à 1% das potências iniciais para um maior detalhamento na região que tange 0.93 pu - V, limite inferior. O passo segue como 1% das potências iniciais até que a menor tensão no sistema seja menor que 0.925 pu - V, passado este intervalo o passo retorna aos 5%.

O passo de carga ainda conta com uma peculiaridade, esse deve ser reduzido pela metade caso, no decorrer do processo, haja em uma barra tensão superior à tensão na iteração anterior nesta mesma barra. Esta ação é necessária para garantir que não haja divergência, uma vez que um aumento de carga prejudicaria o perfil de tensão ao invés de melhorá-lo.

O algoritmo apresentado segue até que a variável de decisão “Np” atinja seu valor máximo previamente especificado, “Nmax”.

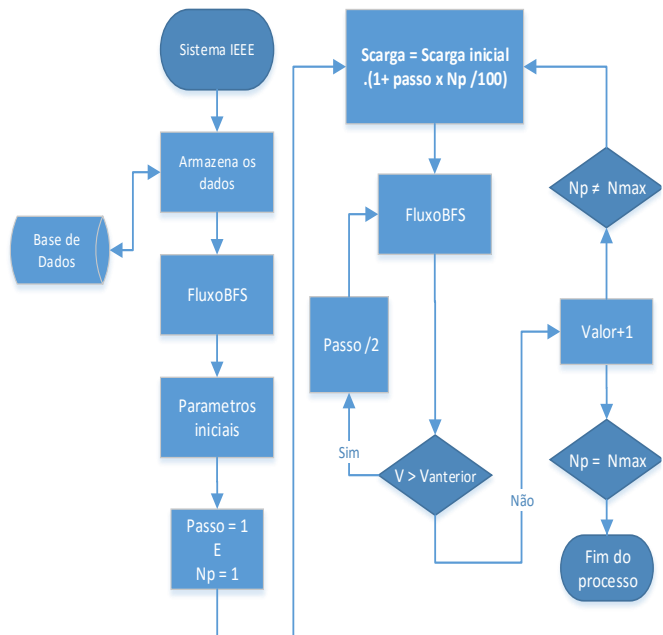


Figura 2 - Estrutura do fluxo potência continuado

C. Modelagem

As rotinas mostradas anteriormente calculam os valores

de tensão nas barras e os de corrente nos ramos do sistema utilizando a modelagem matemática que se segue:

- [1] $\max \lambda$
- [2] $P_k + \sum_{m \in \Omega} P_{km} - K_P P_G = 0$
- [3] $Q_k + \sum_{m \in \Omega} Q_{km} - K_G Q_G = 0$
- [4] $V_{min} \leq V \leq V_{max}$
- [5] $K_P^i = \{0 \text{ ou } 1\}$
- [6] $K_G^i = \{0 \text{ ou } 1\}$

A equação [1] representa a função objetivo em questão, a busca pelo carregamento máximo que obedeça aos limites de tensão já citados. O valor de λ é obtido por meio de um processo de otimização utilizando o AG e o fluxo de potência continuado. Características do AG podem ser observadas nas referências ([6]-[7]).

As equações [2] e [3] são restrições referentes ao fluxo de potência em cada barra do sistema. P_k e Q_k são as potências ativa e reativa consumidas na barra em questão; P_{km} e Q_{km} as potências que fluem da barra k para as barras m , em que estas barras m são barras vizinhas à barra k e o último termo se refere à presença ou não de compensadores. K_P^i e K_G^i podem ser 0 ou 1 (equações[5] e [6]) indicando se há ou não compensação. $K_P^i = 1$ indica que há compensação por potência ativa e $K_G^i = 1$ indica compensação por reativa. Vale mencionar que neste trabalho os dois tipos de compensação não foram utilizados simultaneamente.

A equação [4] serve para restringir as tensões em todas as barras, a fim de que o resultado encontrado seja viável.

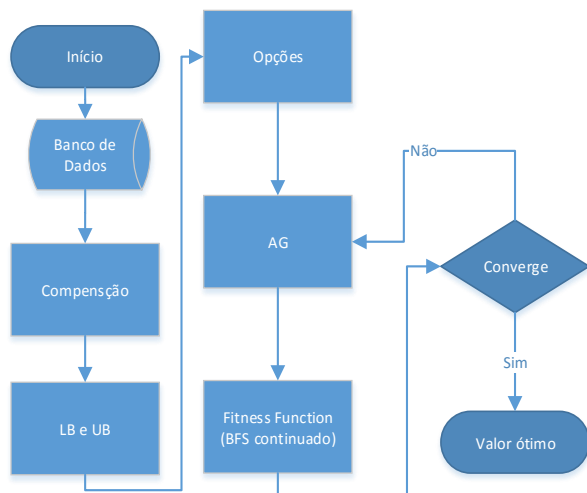


Figura 3 - Fluxograma do processo de otimização

III. MÉTODO PROPOSTO

O aumento do carregamento dos sistemas de distribuição é um fator crítico na capacidade do sistema de conseguir suprir

determinada carga. Para tanto, compensações são necessárias para permitir um funcionamento adequado deste sistema sem prejuízo aos consumidores.

A Figura 3 apresenta o algoritmo proposto, onde: (i) são lidos os dados do sistema; (ii) o usuário indica as barras candidatas para alocação da compensação (capacitor e/ou GD) e, (iii) os limites da compensação (limites inferior, LB e superior, UB). (iv) são definidos os parâmetros do AG, como o número de indivíduos e de gerações. (v) Execução do método proposto, onde é calculado o carregamento máximo do sistema utilizando o fluxo de potência continuado e o BFS.

IV. RESULTADOS

Foi utilizado o sistema IEEE 33 barras apresentado na Figura 4 para demonstrar os resultados do método proposto neste trabalho. Cada barra é identificada por um número entre 1 e 33 e os ramos por um número de 1 a 32.

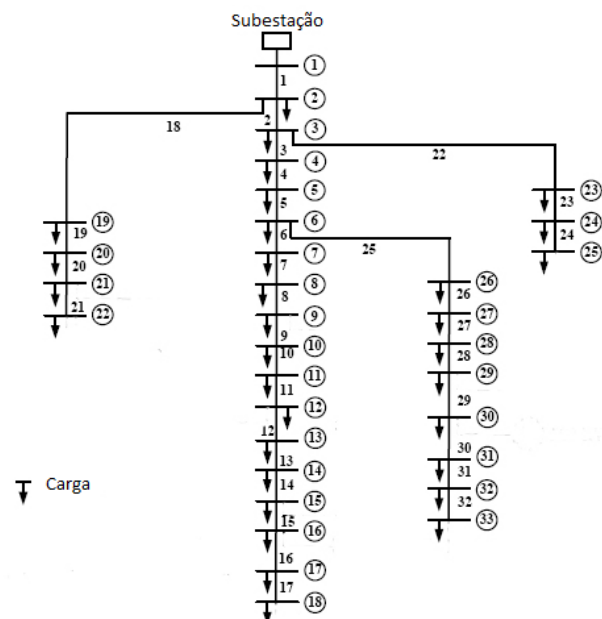


Figura 4 – Topologia do sistema IEEE 33 barras

No processo apresentado criou-se, inicialmente, a hipótese que existem 3 bancos de capacitores cada um com 500kvar e também 3 geradores distribuídos de potência nominal individual de 500kW. Isso é feito com a finalidade de se conhecer qual das opções é mais eficiente no caso estudado, a compensação por potência ativa ou reativa. Ressalta-se que análise de custos não será realizada neste trabalho. Vale lembrar ainda que além de todas as barras serem candidatas, há também a possibilidade de que mais de uma unidade de compensação seja alocada em uma mesma barra, podendo essa receber até 1.5MW ou 1.5Mvar - dependendo a compensação que estiver sendo implementada.

As potências ativas e reativas mencionadas no parágrafo anterior caracterizam os limites operacionais dos compensadores. É importante comentar que a GD, no presente

estudo, é do tipo grupo gerador à diesel e que produz apenas potência ativa por essa ser reembolsável.

Para proceder então com a análise foram realizados 3 casos.

1º caso: Caso base. A carga escolhida para uma análise inicial é 50% da carga do modelo IEEE 33 barras, apenas para fins gráficos, uma vez que o resultado do máximo carregamento deve ser o mesmo considerando a maneira com a qual se aumenta a carga.

O perfil de tensão inicial (sem compensação de qualquer tipo) está representado na Figura 5.

O programa retorna 2.225 MW como a potência máxima que se consegue transmitir sem que haja violação dos limites de tensão do sistema.

As linhas tracejadas em vermelho especificam as tensões máxima (1.05 pu-V) e mínima (0.93 pu-V). As barras representadas na Figura 5 foram as 3 com piores perfis de tensão observadas, no caso, as barras 16, 17 e 15, nesta ordem.

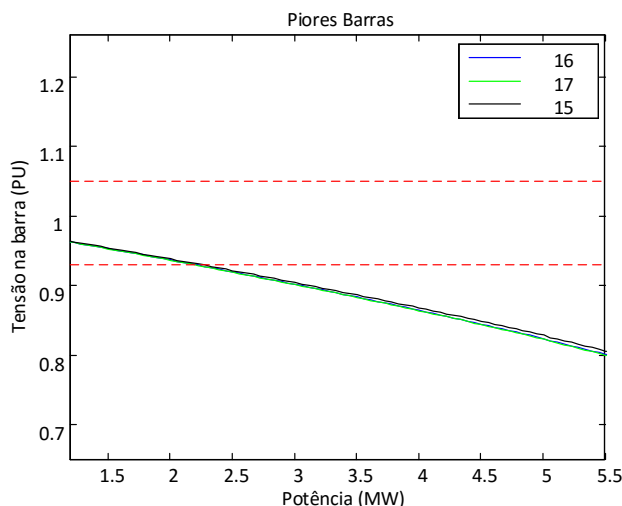


Figura 5 - 3 piores barras antes da compensação

2º caso: Nesse caso é realizada a compensação por bancos de capacitores, compensação do tipo reativa.

A compensação é realizada como já comentado em itens anteriores.

Devido às características intrínsecas ao algoritmo genético, o máximo global pode não ser alcançado em apenas uma execução, desta forma, a rotina foi executada 5 vezes a fim de melhorar a qualidade dos resultados obtidos.

Conseguiu-se, a partir do sistema compensado, aumentar o carregamento para 2.741 MW sem que as tensões nas barras excedessem os limites propostos.

As barras compensadas são mostradas na Tabela 1.

Todas as combinações encontradas geraram curvas como a da Figura 6, em que são mostrados os perfis de tensão das piores barras do sistema, as barras 13, 14 e 12.

Tabela 1 - Barras Compensadas do Caso 2

Execução	Barras	
	1	17, 30 e 32
	2	17, 31 e 32
	3	16, 30 e 31
	4	16, 31 e 32
	5	17, 29 e 30

3º caso: O sistema IEEE 33 barras foi compensado por potência ativa por meio dos geradores distribuídos. A mesma rotina, já explicada no caso 1, foi executada mais cinco vezes.

Como na compensação por potência reativa, o mesmo valor ótimo não obrigatoriamente indica que as compensações se deram nas mesmas barras. Como pode ser visto na Tabela 2.

Esta compensação rendeu um carregamento máximo de 3.148 MW.

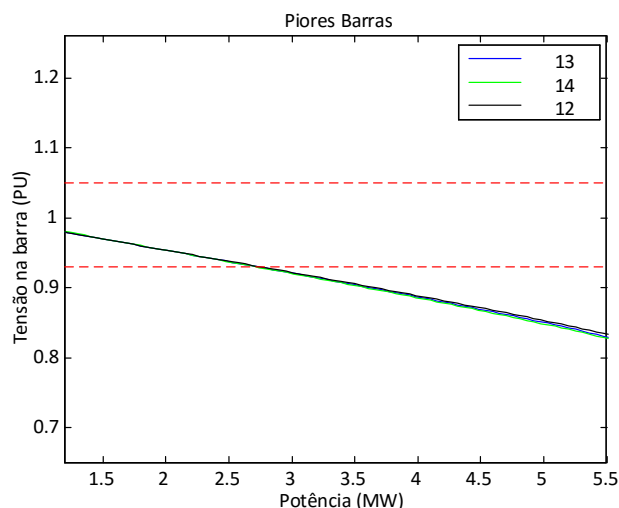


Figura 6 - 3 piores barras após compensação por potência reativa

Tabela 2 - Barras Compensadas do Caso 3

Execução	Barras	
	1	16, 30 e 32
	2	17, 31 e 32
	3	17, 30 e 31
	4	17, 30 e 32
	5	16, 31 e 32

A Figura 7, representa a curva de carregamento para as barras 14, 15 e 16 – barras de pior perfil de tensão para esta compensação.

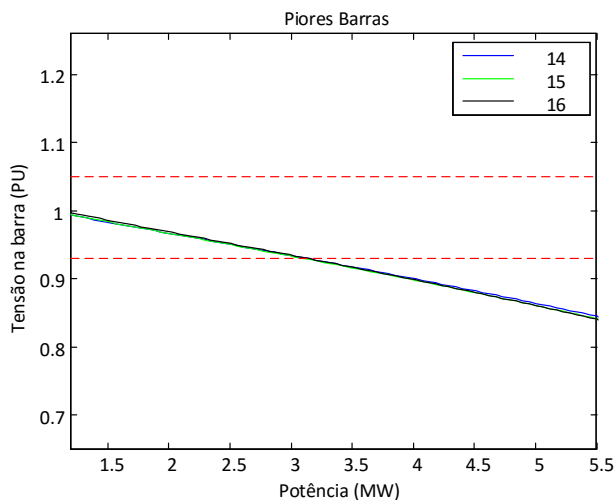


Figura 7 - 3 piores barras após compensação por potência ativa

V. CONCLUSÃO

Ao se comparar os carregamentos máximos que se obtém por cada técnica em relação ao carregamento máximo inicial percebe-se que houve um aumento de 23.19 % quando são utilizados bancos de capacitores e 41.48 % quando da utilização da GD.

Pela forma como os resultados se apresentaram, fica claro que se houver possibilidade de se investir na GD, está é a melhor opção do ponto de vista técnico, uma vez que apresentou uma melhora 18.3 % superior à encontrada para bancos de capacitores, em relação ao carregamento máximo inicial.

Além disso, vale ressaltar o fato de que a implementação da geração distribuída de maneira generalizada, em larga

escala, permite que os grandes geradores tenham liberdade de produzir um pouco menos – deixando uma margem para a produção – o que traz mais confiabilidade e flexibilidade ao sistema. Outra vantagem para os sistemas elétricos seria a redução das perdas nas linhas tanto de distribuição quanto de transmissão.

REFERÊNCIAS

- [1] J. J. Grainger and S. H. Lee "Optimum size and location of shunt capacitors for reduction of losses on distribution feeders", IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-100, no. 3, pp.1105 -1118 1981.
- [2] G. Levitin, A. Kalyuzhny, A. Shenkman and M. Chertkov "Optimal capacitor allocation in distribution systems using a genetic algorithm and a fast energy loss computation technique", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 15, no. 2, pp.623 - 628 2000.
- [3] H. Yoshida, K. Kawata, Y. Fukuyama, S. Takayama and Y. Nakanishi "A Particle Swarm Optimization for Reactive Power and Voltage Control Considering Voltage Security Assessment", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 15, no. 4, pp.1232 - 1239 2000.
- [4] Atwa, E. F. El-Saadany, M. M. A. Salama and R. Seethapathy "Optimal renewable resources mix for distribution system energy loss minimization", IEEE Trans. Power Syst., vol. 25, no. 1, pp.360 -370 2010.
- [5] M. F. Shaaban, Y. M. Atwa and E. El-Saadany "DG allocation for benefit maximization in distribution networks", IEEE Trans. PowerSyst., vol. 28, no. 2, pp.639 -649 2013.
- [6] P. Guo, X. Wang, and Y. Han, "The enhanced genetic algorithms or the optimization design," in Biomedical Engineering and Informatics (BMEI), 2010 3rd International Conference on, 2010, pp. 2990-2994.
- [7] Neeraj and A. Kumar, "Efficient hierarchical hybrids parallel genetic algorithm for shortest path routing," in 5th Int. Conf. on Confluence The Next Generation Information Technology Summit (Confluence), 2014, pp. 257-261.