

Metodologia para determinação de valor locacional de banco de capacitores em sistema de distribuição

C. F. B. Machado* I.C. Silva Jr.**
L. W. Oliveira*** V. A. Cabral****

*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica,
Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF,
CEP: 36036-900, Juiz de Fora/MG-Brasil*

**(e-mail: caio.bernardo@estudante.ufjf.br).*

****(e-mail: ivo.junior@ufjf.br)*

*****(e-mail: leonardo.willer@ufjf.br)*

******(e-mail: albuquerque.vinicius@engenharia.ufjf.br)*

Abstract: This paper presents the methodology of locational value of capacitors in radial distribution systems considering the loss relief index in the system. It is highlighted that the large volume of research on capacitor allocation occurs in the scope of optimization to minimize energy losses, resulting in the presentation of the optimal bus for allocation of capacitive reactive power. The differentiated proposal of this study is to present indexes for all buses of the system, not only for the optimal bus, thus offering greater freedom for decision-making by the administrators of the distribution system who may consider other factors not related in traditional research. The methodology was applied to the IEEE 13-bus system and 7 capacitor bank scenarios with different reactive powers were considered. The results were compared with solutions found in another study that employed optimization to minimize losses in the same IEEE system and the results were very close, the only difference was that in this paper the locational value index is presented for all buses of the system and not only for the optimal node.

Resumo: Este trabalho apresenta a metodologia de valor locacional de capacitores em sistemas de distribuição radiais considerando o índice de alívio de perdas no sistema. Destaca-se que o grande volume de pesquisas para alocação de capacitores se dá no âmbito de otimização para minimização de perdas de energia, resultando na apresentação da barra ótima para alocação da potência reativa capacitiva. A proposta diferenciada deste artigo está em apresentar índices para todas as barras do sistema, não apenas para a barra ótima, oferecendo assim maior liberdade para tomada de decisão pelos administradores do sistema de distribuição, podendo considerar outros fatores não relacionados nas pesquisas tradicionais. A metodologia foi aplicada para o sistema IEEE 13-Barras e foram considerados 7 cenários de banco de capacitores com potências reativas distintas. Os resultados foram comparados com soluções encontradas em outro trabalho que empregou otimização para minimizar perdas no mesmo sistema IEEE e houve proximidade de resultados, com o diferencial de que neste trabalho o índice de valor locacional é apresentado para todas as barras do sistema e não somente para o nó ótimo.

Keywords: Distribution Systems; Total Power losses; Power losses Reduction; Capacitor; IEEE 13-Nodes.

Palavras-chaves: Sistemas de Distribuição; Total de Perdas Elétricas; Redução de Perdas Elétricas; Capacitor; IEEE 13-Barras.

1. INTRODUÇÃO

O constante crescimento da demanda de energia elétrica e de número de consumidores obrigam as concessionárias de distribuição a ficarem sempre atentas às suas redes radiais para perceberem se há necessidade de rearranjo ou reforços de rede, conferirem a porcentagem de perdas e gerenciarem o perfil de tensão. Boa parte dos problemas enfrentados pelas distribuidoras para manterem suas redes com ampacidade dentro dos limites; terem o menor índice de perda possível e

estabelecerem o perfil de tensão controlado, ocorrem por conta da característica indutiva das grandes cargas do sistema.

Uma das maneiras de minimizar os efeitos causados por essa característica indutiva do sistema, é a instalação de banco de capacitores nessas redes de distribuição de energia elétrica. A discussão, pesquisa e aplicação de problemas de alocação ótima de capacitores não vêm de hoje. São décadas a fio em que esse assunto é protagonista na academia e nos âmbitos dos sistemas de potência (Reddy et al. 2021 e Haffner et al. 2009). Nessa perspectiva, Alcântara (2005) apresenta com detalhes e abrangência uma descrição histórica da evolução da pesquisa

relacionada ao problema de alocação ótima de capacitores a nível nacional e mundial.

Sabe-se que identificando os melhores nós e a capacidade apropriada dos capacitores, é possível obter-se redução de perdas de energia, melhoria do perfil de tensão deixando-a em limites aceitáveis, desenvolvimento de estabilidade da rede, liberação de capacidade do sistema e melhoria de fator de potência (Chang 2008).

Entre todos os benefícios anteriormente citados, o mais utilizado por pesquisadores para identificação de lugares ótimos para alocação de capacitores e seu dimensionamento é a minimização de perdas de energia, como pode-se ver em: Hamada et al (2008), Joyal et al (2013), Mohamed e Kowsalya (2014), Amin et al (2019), Salman et al. (2019), Gonzalo et al (2020), Gupta et al (2021), Tiwari et al (2021), Martins et al (2021) e muitos outros. Nesses estudos, cada autor lançou mão de uma técnica de otimização distinta para resolver o problema.

Semelhante às pesquisas citadas, este artigo também tem por objetivo identificar os melhores nós de alocação para cada potência nominal definida dos capacitores, tendo em vista obter os melhores índices possíveis de redução de perdas. Porém, tal proposta de valorização locacional de capacitores em redes de distribuição não apresentará somente o ponto ótimo para inserção dos capacitores, mas apresentará um índice de valorização do impacto da inserção do capacitor para cada uma das barras do sistema, assim, exibindo quais são as melhores barras para aplicação da reatância capacitiva com determinada potência nominal; para, por fim, auxiliar na tomada de decisão da concessionária de distribuição. Para esta análise, será utilizado o sistema IEEE 13-Barras (Kersting 2001), que pode ser visto na Fig. 1, e banco de capacitores com potência reativas nominais de 50, 150, 300, 500, 800, 1200 e 1500 kVAr.

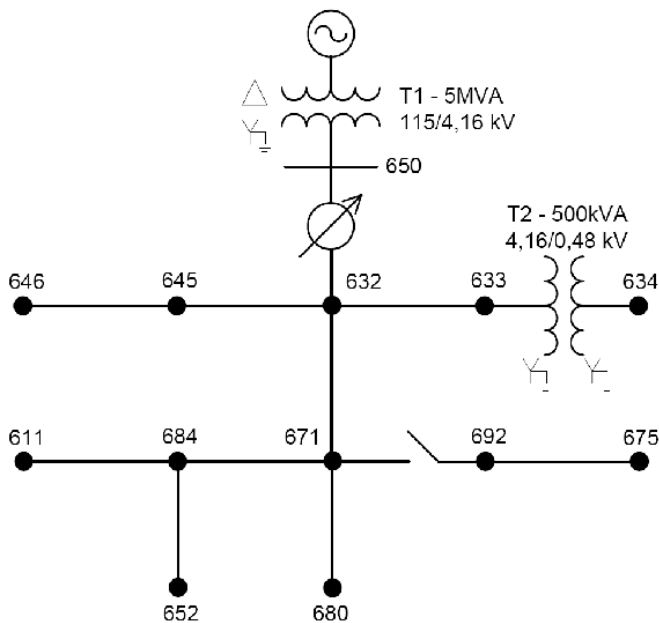


Fig. 1 Diagrama unifilar do sistema IEEE 13-Barras.

2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

A definição da barra que vai receber o capacitor ou banco de capacitores, assim como sua potência reativa nominal, é fundamental para se conhecer os impactos no sistema em questão; sejam impactos bons ou ruins. Diferentemente das técnicas de otimização que apresentam a barra ótima para cada circuito analisado, a metodologia de valor locacional de aplicação de capacitores irá apresentar o índice do impacto da inserção do capacitor para cada uma das barras da rede, incluindo a barra de melhor índice.

Este artigo propõe um índice sobre as perdas do sistema. Assim sendo, é possível formular o problema no qual o objetivo passa a ser a obtenção de índices para cada barra, sendo as barras com maiores índices as que apresentaram os melhores impactos na rede quando o capacitor está instalado nela. Este melhor índice se traduz como maior alívio de perdas em comparação com as perdas do sistema original.

O alívio das perdas do sistema com a inserção do banco de capacitores de potência p na barra i . $\Delta P^{p,i}$ pode ser expresso por (1), onde: P_{base} é o valor das perdas elétricas no caso base; e $P^{p,i}$ é o valor da perda elétrica do sistema com a inserção do banco de capacitores de potência p na barra i .

$$\Delta P^{p,i} = P_{base} - P^{p,i} \quad (1)$$

3. METODOLOGIA

As cargas de um sistema de distribuição real, na grande maioria das vezes, não são divididas uniformemente entre as barras que o compõem. Além disso, é conhecido que as dimensões do sistema também têm influências nas perdas ôhmicas e o advento e a expansão dos recursos energéticos distribuídos tornaram as características de cada barra mais diferentes ainda umas das outras.

Diante deste contexto, evidencia-se que determinadas barras do sistema de distribuição terão mais aptidão para receber alocação dos capacitores de maneira que haja uma melhora no comportamento do sistema. O cálculo de valor locacional é definido como geração de índice para cada um dos nós a fim de representar o impacto para o sistema de distribuição se a concessionária decidir alocar os capacitores de determinada potência naquele nó.

A metodologia para o cálculo de valor locacional levando-se em consideração o índice de perdas I_p , inicia-se com a obtenção do valor das perdas elétricas do caso base P_{base} do sistema que será inserido o banco de capacitores. Em seguida, é calculado o valor da perda $P^{p,i}$ que é a perda elétrica do sistema com os capacitores de potência p na barra i . Desse modo, obtém-se o alívio das perdas $\Delta P^{p,i}$, como pode ser visto em (1).

Os alívios das perdas $\Delta P^{p,i}$ obtidos compõem um vetor ΔP^p que contém os valores de todas as barras. E, por fim, para se ter o índice de perdas I_p , aplicou-se a (2), na qual os valores do vetor ΔP^p são divididos pelo maior dos valores do vetor, normalizando o índice e tornando o maior dos valores do índice de perdas igual a 1.

$$I_p = \frac{\Delta P^p}{\max(\Delta P^p)} \quad (2)$$

No entanto, a metodologia de normalização se torna falha quando o banco de capacitores piora o sistema em todos os nós. Neste caso, quando todos os valores de ΔP^p são negativos, os valores normalizados de I_p assumirão valores acima de 1 em situações em que o sistema piora. Portanto, somente é utilizada a (2) se o máximo valor de ΔP^p for positivo. Caso contrário, I_p é definido pela (3). E nessa situação, o valor máximo de I_p sempre será zero e quanto pior ficar o sistema, mais negativo será o valor de I_p .

$$I_p = \frac{\Delta P^p - \max(\Delta P^p)}{|\max(\Delta P^p)|} \quad (3)$$

Para modelagem e simulação do sistema de distribuição de 13-Barras, foi utilizado o software OpenDSS (Open Distribution Systems Simulator). Através da interface COM do OpenDSS, é possível implementar algoritmo em softwares externos que não podem ser implementados diretamente no OpenDSS. A metodologia do valor locacional foi implementada em python, através do qual foi possível acoplar o OpenDSS para obtenção dos valores de perdas através da execução do fluxo de potência trifásico. Vale ressaltar que o sistema IEEE 13-Barras no OpenDSS tem a barra 670 incorporada entre as barras 632 e 671, e tal barra também foi considerada neste estudo; outro ponto de destaque é a ausência proposital da Subestação para a análise de valor locacional, já que não faz sentido alocar capacitores neste ponto do sistema.

4. RESULTADOS

Este estudo considera 7 cenários de potência reativa nominal do banco de capacitores para realizar o cálculo de valor locacional no sistema IEEE 13-Barras que podem ser vistos na tabela 1.

Tabela 1. Cenários considerados para o estudo

Cenário	Potência Reativa Nominal (kVAr)
1	50
2	150
3	300
4	500
5	800
6	1200
7	1500

As Fig. (2) a (8) apresentam os mapas de calor do valor locacional da alocação dos bancos de capacitores para os 7 cenários da Tabela 1, respectivamente. Neles é possível encontrar o valor locacional máximo atingido por cada barra, sendo a barra cujo entorno está com verde mais forte a barra de melhor aptidão para receber o banco de capacitores. Também vale ressaltar que, quanto maior a intensidade de vermelho no entorno de determinada barra, pior é o impacto que os capacitores proporcionam ao sistema quando aplicados a essa barra. Levando-se em consideração todos os mapas de calor em conjunto, observa-se que há mudança de

comportamento dos gráficos quando mudam-se as potências reativas nominais.

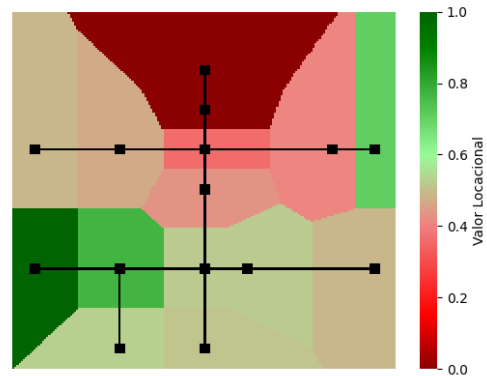


Fig. 2 Mapa de calor do valor locacional para Banco de capacitores de 50kVAr.

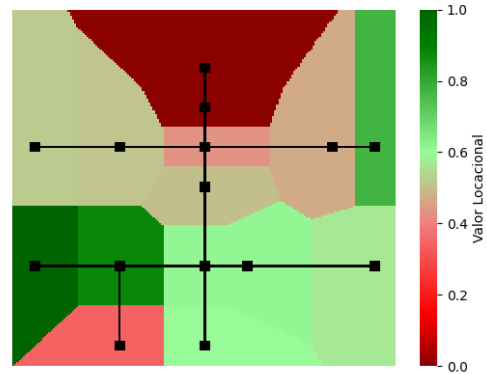


Fig. 3 Mapa de calor do valor locacional para Banco de capacitores de 150kVAr.

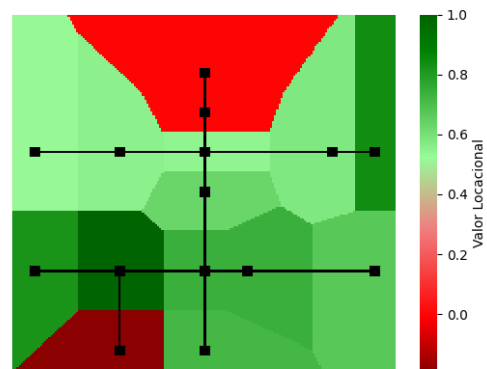


Fig. 4 Mapa de calor do valor locacional para Banco de capacitores de 300kVAr.

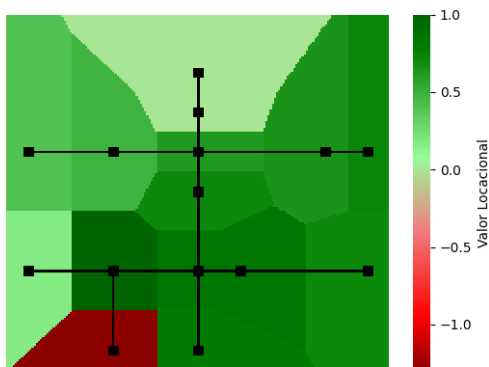


Fig. 5 Mapa de calor do valor locacional para Banco de capacitores de 500kVAr.

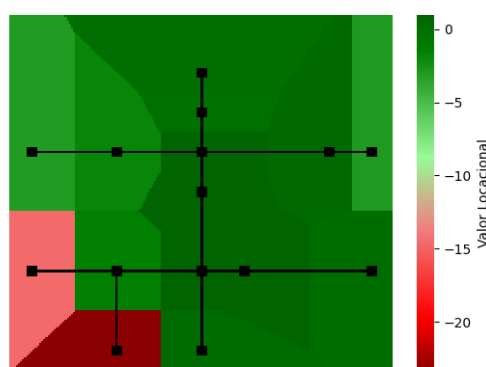


Fig. 8 Mapa de calor do valor locacional para Banco de capacitores de 1500kVAr.

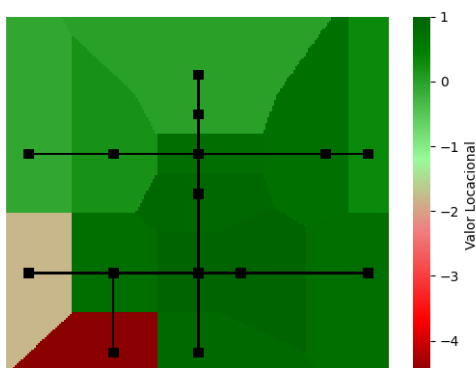


Fig. 6 Mapa de calor do valor locacional para Banco de capacitores de 800kVAr.

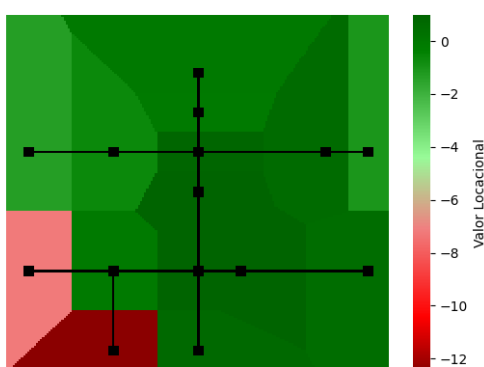


Fig. 7 Mapa de calor do valor locacional para Banco de capacitores de 1200kVAr.

Nota-se nos mapas de calor apresentados nas fig. (2) a (8) que bancos de capacitores com potências reativas menores são mais bem alocados nas barras mais distantes da subestação, isto fica muito claro quando se analisa a fig. (2). À medida que as potências reativas dos cenários vão aumentando, as barras mais centralizadas vão se tornando cada vez melhores candidatas a receber o banco de capacitores, este destaque pode ser visto na evolução dos cenários apresentados nas fig. (3) a (8).

Na Tabela 2 pode-se ver o resumo dos cenários, com a porcentagem de alívio da melhor barra do sistema e o pódio das melhores barras para cada cenário.

Tabela 2. Resumo dos cenários

Cen.	kVAr	% de alívio da melhor barra	Melhor Barra	2ª Melhor	3ª Melhor
1	50	1,8	611	684	634
2	150	4,4	611	684	634
3	300	6,8	684	634	611
4	500	9	684	671/692	680
5	800	10,2	671/692	670	680
6	1200	10,5	671/692	670	632
7	1500	9,8	670	632	671/692

5. CONCLUSÕES

Este estudo utilizou a metodologia de cálculo de valor locacional para apresentar índices de alívio de perdas para todas as barras do Sistema IEEE 13-Barras para cada um dos cenários propostos. Esta pesquisa diferenciou-se da maioria dos estudos de alocação de banco de capacitores anteriores por apresentar índices para todas as barras do sistema, não se restringindo a exibir somente a barra de melhor índice, assim proporcionando maior liberdade para tomada de decisão das concessionárias de distribuição, podendo considerar outros fatores que, porventura, não sejam abordados nas pesquisas consideradas.

Comparando os resultados obtidos com os resultados apresentados por Salman et al. (2019), que implementaram otimização para alocação de banco de capacitores para o mesmo sistema considerado neste estudo, pode-se constatar que as porcentagens de alívio que são apresentadas para as melhores barras são bem próximas às encontradas neste artigo, porém neste estudo, também apresenta-se índices dos impactos dos capacitores em todas as outras barras do sistema, gerando aqui um diferencial mais abrangente para análise do sistema como um todo por parte da concessionária ou do analista final.

Pode-se considerar como sugestão para trabalhos futuros, elaborar com esta mesma metodologia, a simulação em sistemas de distribuição de grande porte; considerar a utilização de outras métricas de avaliação de valor locacional, tais como: melhoria do perfil de tensão e alívio de carregamento nas linhas do sistema; ou, ainda, realizar esta análise alocando outros equipamentos na rede, como, por exemplo: geradores fotovoltaicos, geradores eólicos, baterias ou uma combinação desses.

REFERÊNCIAS

- Alcântara, M.V.P. (2005). Alocação de capacitores em sistemas de distribuição de energia elétrica. Dissertação de Mestrado, UNICAMP-FEEC.
- Amin, A., Kamel, S., Selim, A., Hasanien, H. M., and Al-Durra, A. (2019). Development of Analytical Technique for Optimal DG and Capacitor Allocation in Radial Distribution Systems Considering Load Variation, *IECON - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 2348-2353.
- Chang, C-F. (2008). Reconfiguration and Capacitor Placement for Loss Reduction of Distribution Systems by Ant Colony Search Algorithm, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. (23) 4, pp. 1747-1755.
- Gonzalo, G., Aguila, A., Gonzalez, D., and Ortiz, L. (2020). Optimum location and sizing of capacitor banks using VOLT VAR compensation in micro-grids, *IEEE Latin America Transactions*, vol (18) 3, pp. 465-472.
- Gupta, S., Yadav, V. K., and Singh, M. (2021). A New Novel Approach for Optimal Capacitor Placement in Radial Distribution Networks using Data Envelopment Analysis, *IECON 2021 - 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 1-7.
- Haffner, S., Pereira, L. A., Gasperin, L. V., and Barreto, L.. (2009). Alocação de bancos de capacitores em redes de distribuição de energia visando eliminar violações de tensão. *SBA: Controle & Automação Sociedade Brasileira De Automatica*, vol. (20) 4, pp 546-563.
- Hamada, M. M., Wahab, M. A. A., El-Sayed A. -H. M., and Ramadan, H. A. (2008). A proposed strategy for capacitor allocation in radial distribution feeders, *12th International Middle-East Power System Conference*, pp. 146-151.
- Joyal I. S., Suresh K. K., and Vijaya K. P. (2013). Optimal capacitor placement in radial distribution system to minimize the loss using fuzzy logic control, *INTERNATIONAL CONFERENCE ON SMART STRUCTURES AND SYSTEMS - ICSSS'13*, pp. 33-40.
- Kersting, W.H. (2001). Radial distribution test feeders. *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings*, vol. (2), pp 908-920.
- Martins, A. S. C., Costa, F. R. M. d. S., de Araujo, L. R., and Penido, D. R. R. (2021). Capacitor Allocation in Unbalanced Systems Using a Three-Level Optimization Framework, *IEEE Latin America Transactions*, vol. (19) 9, pp. 1599-1607.
- Mohamed I. A., and Kowsalya M. (2014) Optimal Distributed Generation and capacitor placement in power distribution networks for power loss minimization, *International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE)*, pp. 1-6.
- Reddy, C. K., Srinivasan, G., and Lokasree, B. S. (2021). Optimization of reactive power support in Power Distribution Network - An economical based study, *2021 7th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES)*, pp. 390-396.
- Salman I., Mohammed K., Shaker K., and Shaker H. (2019) Optimal Capacitor Placement in Radial Distribution System Using Moth Flame Optimization Algorithm. *Journal of Southwest Jiaotong University*, vol. (54) 3, p.p 21 - 39.
- Tiwari, V., Dubey, H. M., and Pandit, M. (2021). Optimal allocation of DG and Capacitor Units Using Jellyfish Search Algorithm, *13th IEEE PES Asia Pacific Power & Energy Engineering Conference (APPEEC)*, pp. 1-6.