

METODOLOGIA PARA ALOCAÇÃO ÓTIMA DE CAPACITORES EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO CONSIDERANDO RESTRIÇÕES DE TENSÃO, MITIGAÇÃO DO DESEQUILÍBRIO E MINIMIZAÇÃO DE PERDAS

RODRIGO VIANA BATISTA*, LUÍSA S. BARBOSA *, LEANDRO R. DE ARAUJO*, DÉBORA R. R. PENIDO *

*Laboratório de Sistemas de Potência, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, Campus Universitário, Plataforma 05, Galpão 03 – Bairro São Pedro – Juiz de Fora – Minas Gerais – Brasil – CEP:36036-900

Emails: rodrigo.viana@engenharia.ufjf.br, luisa.barbosa@engenharia.ufjf.br, leandro.araujo@ufjf.edu.br, debora.rosana@ufjf.edu.br

Abstract: This paper presents a two-step methodology for optimal capacitor placement in unbalanced power distribution systems considering voltage constraints, imbalance mitigation and reduction of technical losses using a genetic algorithm technique. In the optimization process, both in the first and second stage, the uncertainties arising from the loading levels of the feeders and the demand for loads in the nodes are considered, seeking to better represent the operation of the real systems, thus allowing a better assessment of the ideal nodes for capacitors placement. In order to validate the proposed methodology, it was used the IEEE 13 and IEEE 37 Nodes Test Feeders.

Resumo: Este artigo apresenta uma metodologia em duas etapas para alocação ótima de capacitores em sistemas de distribuição de energia desequilibrados considerando restrições de tensão, mitigação de desequilíbrio e redução de perdas técnicas utilizando a técnica de algoritmos genéticos. No processo de otimização, tanto na primeira quanto na segunda etapa, são consideradas as incertezas provenientes dos níveis de carregamento dos alimentadores e da demanda das cargas nos nós buscando representar de maneira mais adequada a operação dos sistemas reais, permitindo assim uma melhor avaliação das barras ideais para alocação dos capacitores. Para validar a metodologia proposta, foram utilizados os alimentadores IEEE 13 e IEEE 37 barras.

Keywords: capacitors banks; genetic algorithm; optimization; power distribution systems; voltage constraints; imbalance mitigation; loss reduction.

Palavras-chaves: bancos de capacitores; algoritmos genéticos; otimização; sistemas de distribuição de energia elétrica; restrições de tensão; mitigação do desequilíbrio; redução de perdas.

1. INTRODUÇÃO

Com o aumento das cargas nos sistemas de distribuição e a necessidade das concessionárias cumprirem os requisitos de qualidade de energia estabelecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a prática da alocação de capacitores em alimentadores de redes de distribuição tem sido uma das principais alternativas para melhorar o desempenho destes sistemas. As aplicações de capacitores nos sistemas de distribuição abrangem: redução de perdas técnicas nos alimentadores; melhorias nos perfis de tensão; correção do fator de potência; aumento da capacidade da rede; mitigação do desequilíbrio.

Ao longo das últimas décadas a alocação de bancos de capacitores em sistemas de potência tem sido um tema intensivamente abordado na literatura. O desafio dos pesquisadores está relacionado à determinação do local de instalação, quantidade, capacidade (potência em kvar) e tipo (fixos e/ou chaveados) dos capacitores de modo a se obter um ponto de operação ótimo com os menores custos de investimento e operação.

Problemas desse tipo são de difícil solução por sua natureza não convexa, não linear, inteira e combinatória, que pode acarretar tempos de processamento computacionais impraticáveis em sistemas reais dependendo do método de solução adotado. Com isto, vários métodos de otimização baseados em técnicas evolutivas mais elaborados vêm sendo

desenvolvidos e ganhando destaque na literatura, sendo frequentemente indicados para tratar e solucionar este tipo de problema, isto devido à sua capacidade de fornecer boas soluções com um tempo de processamento aceitável para obtenção dessas soluções. Alguns trabalhos na literatura que tratam da alocação de capacitores através de técnicas inteligentes de otimização são resumidos a seguir.

Em Duque *et al.* (2015) é apresentado um método de otimização bio-inspirado intitulado Monkey Search, algoritmo baseado no comportamento de macacos em busca de alimentos na natureza. Este método foi utilizado para alocação de capacitores buscando minimizar perdas com menor custo de investimento em um determinado horizonte de planejamento. Em Baysal & Altas (2016), foi utilizado o Cukoo Search Algorithm (CSA), algoritmo inspirado no parasitismo de algumas espécies do pássaro cuco, que colocam seus ovos em ninhos de outras espécies de aves hospedeiras. Neste trabalho a técnica de otimização foi utilizada para redução de perdas e melhorias nos perfis de tensão. Em Upadhyay & Gaurav (2017), foi realizada uma combinação do Algoritmo Genético (AG) com Otimização por enxame de partículas (*Particle Swarm Optimization* - PSO) para resolver o problema de alocação e dimensionamento de capacitores, com objetivo de reduzir as perdas e os custos por capacitor. Em Pranitha & Vijaya (2017) foi utilizado um AG para alocação ótima de capacitores de modo a realizar o aprimoramento dos índices de confiabilidade de um sistema de distribuição radial em tempo

real. Em Ceylan & Paudyal (2017) são modelados o dimensionamento e a alocação ótima dos capacitores usando a técnica Moth-flame Optimization (MFO), inspirado no método de navegação das mariposas na natureza, denominado orientação transversal. O objetivo do trabalho é minimizar os desvios de tensão considerando variações nos perfis de carga. Em Bhatt *et al.* (2018) é analisado um sistema de distribuição e proposto uma metodologia que combina AG e redes neurais artificiais (RNA) para alocação os capacitores buscando diminuir o desvio de tensão e manter um bom nível de estabilidade de tensão em situação de carga dinâmica. Neagu *et al.* (2018) propõem diminuir as perdas de energia e quedas de tensão por meio da alocação de bancos de capacitores. O trabalho foi dividido em duas etapas: a identificação da barra ótima para a injeção de reativo e o dimensionamento dos capacitores. A metaheurística utilizada em ambas as etapas para a solução do problema de controle de tensão foi o Bat Algorithm (BA), método inspirado na ecolocalização de morcegos. Em Araujo *et al.* (2018) é apresentado uma metodologia considerando a variação diária do carregamento para alocação ótima de capacitores fixos e chaveados em sistemas desequilibrados através de um AG com objetivo de minimização de perdas e adequação dos perfis de tensão.

Neste trabalho, é abordado um método para a alocação de capacitores monofásicos em sistemas de distribuição, buscando minimizar as perdas técnicas e mitigar o desequilíbrio de tensão em barras trifásicas, considerando restrições de tensão. O método é dividido em duas etapas. Na primeira etapa é realizada uma análise de sensibilidade dos nós do sistema visando redução de perdas nos alimentadores. A partir desse conjunto de nós definidos, na segunda etapa busca-se além de minimizar as perdas, mitigar o desequilíbrio nas barras trifásicas que fizerem parte deste conjunto. As possibilidades de alocação dos capacitores são tratadas de forma discreta. O método de otimização adotado é a técnica meta-heurística do algoritmo genético (AG). De modo a aproximar as simulações da operação real dos sistemas de distribuição, na resolução do fluxo de potência, as incertezas e aleatoriedade do comportamento das cargas são consideradas. A rotina do AG é implementada em Matlab® e acoplada a um programa para o cálculo do fluxo de potência trifásico considerando a inserção dos capacitores avaliados pelo AG.

2. CONSIDERAÇÕES

Nesta seção serão apresentadas algumas considerações de ferramentas e teorias utilizadas no desenvolvimento deste trabalho.

2.1 OpenDSS

O OpenDSS (*Open Distribution System Simulator*) é um software livre de código aberto amplamente utilizado para modelagem e simulações de sistemas de distribuição da energia elétrica. É uma ferramenta computacional com alta capacidade para realização de estudos elétricos em regime permanente senoidal e, no caso deste trabalho, foi utilizado para execução do cálculo do fluxo de potência trifásico, fornecendo os valores de tensão e fator de desequilíbrio nas barras e as perdas totais nos sistemas.

Uma característica muito útil do OpenDSS é a interface COM, que permite ao usuário desenvolver algoritmos em ambientes externos (neste trabalho é utilizado o Matlab®) que não poderiam ser implementados diretamente no OpenDSS para controlar o programa, obtendo o comportamento dos sistemas de distribuição de modo a cumprir um determinado objetivo.

Com essa ferramenta então é possível acoplar o AG desenvolvido em Matlab® com o fluxo de potência, necessários à resolução do problema da alocação ótima de capacitores.

2.2 Desequilíbrio de tensão em sistemas de distribuição

Na operação de sistemas elétricos de distribuição reais o grau de desequilíbrio nos nós pode variar juntamente com o nível de carregamento das redes. Esse desequilíbrio está associado à configuração das cargas, topologia das redes, indutâncias mútuas desequilibradas, entre outros fatores. Essa operação desequilibrada traz condições indesejáveis que influenciam diretamente no desempenho dos equipamentos que compõem os sistemas de distribuição (Araujo *et al.*, 2013).

O fator de desequilíbrio (FD) de tensão em um nó é expresso matematicamente pela razão entre a componente de sequência negativa (V_-) e a componente de sequência positiva (V_+) das tensões conforme mostrado em (1).

$$FD (\%) = \left(\frac{V_-}{V_+} \right) \times 100 \quad (1)$$

A ANEEL estabelece através do Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST) que o FD nos sistemas de distribuição, com exceção das redes de baixa tensão, seja igual ou inferior a 2% (ANEEL, 2018). Como principais consequências de um elevado desequilíbrio nas redes têm-se: aumentos das perdas técnicas no sistema como um todo; deslocamento de tensão do neutro; aquecimento excessivo e oscilação de torque em máquinas girantes, com vibrações e degradação da vida útil destes equipamentos.

Diante deste cenário, a utilização da compensação reativa com capacitores monofásicos ao longo dos alimentadores de distribuição se torna uma alternativa interessante, pois além de fornecer um suporte de reativos para melhorar o nível de tensão e reduzir as perdas, também atua na minimização do FD.

3. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

O objetivo da otimização neste trabalho é a determinação da alocação (barra e fase) de capacitores monofásicos nos alimentadores de distribuição de modo que estes contribuam para a minimização das perdas ativas totais e mitigação do desequilíbrio de tensão em barras trifásicas.

3.1 Problema de Otimização

O problema de otimização pode ser modelado conforme o conjunto de equações definidas de (2)-(7).

$$FOB = \min \sum_{k=1}^N P_{perdas} + pen_{deseq} \quad (2)$$

Sujeito a

$$I_{Re}^i(V_{Re}, V_{Im}, kQ_{cap}) = 0 \quad (3)$$

$$I_{Im}^i(V_{Re}, V_{Im}, kQ_{cap}) = 0 \quad (4)$$

$$V_{min}^i \leq V^i \leq V_{max}^i \quad (5)$$

$$Q_{cap} \in \{100\} \text{ kvar} \quad (6)$$

$$k \in \{0, 1\} \quad (7)$$

$$pen_{deseq} = \begin{cases} 0, & \text{se } FD \leq 2\% \\ 10^8, & \text{se } FD > 2\% \end{cases} \quad (8)$$

A equação (2) apresenta a função objetivo sujeita às restrições expressas em (3)-(6) para a avaliação dos parâmetros ótimos escolhidos em cada solução indicada do algoritmo genético. Onde:

P_{perdas} – Perda real em kW do sistema;

pen_{deseq} – Penalização por violação de desequilíbrio;

I_{Re}^i – Componente real do vetor de injeção de correntes para um dado nível de carga i ;

I_{Im}^i – Componente imaginária do vetor de injeção de correntes para um dado nível de carga i ;

Q_{cap} – Corresponde ao valor pré-estabelecido de potência reativa dos capacitores;

k – Se refere à presença ou não do capacitor em uma possibilidade de alocação (barra e fase);

V_{min}^i e V_{max}^i – Limites máximo e mínimo das tensões nodais para uma dada condição de carga i ;

A equação (3) corresponde às restrições de igualdade do fluxo de carga.

A equação (4) indica os limites impostos de operação das tensões nodais para cada cenário de carga i .

Em (5) é indicado o valor da compensação reativa de cada capacitor alocado.

Em (6), 0 indica que não há capacitor alocado no nó e 1 indica que há capacitor alocado no nó.

Em (7) são expressos os valores admitidos para pen_{deseq} na FOB quando há ou não violação do FD em barras trifásicas.

Como dito anteriormente, o problema possui características não linear e inteira. Isto posto, o AG será utilizado tanto na primeira como na segunda etapa para resolução do problema.

3.2 Metodologia Proposta

A metodologia neste trabalho é dividida em duas etapas, onde a primeira etapa se dedica a determinar quais as barras mais indicadas pelo AG, independentemente do nível de carregamento da rede, que proporcionam as menores perdas. Esse conjunto de barras definidos na primeira etapa formam o espaço de busca para alocação dos capacitores na segunda etapa, onde além de minimizar as perdas, busca-se mitigar o desequilíbrio em barras trifásicas que fazem parte deste conjunto. A sequência de alocações dos capacitores é indicada

pelo AG. Feito isso, o OpenDSS executa o fluxo de potência, e então são obtidas as perdas totais, tensões nodais e FD em cada nó.

A Fig. 2 apresenta o passo a passo do método proposto e em seguida são feitas as descrições de cada etapa. O fluxograma serve para ambas as etapas, entretanto, em P.1 para a segunda etapa são consideradas somente os nós definidos ao final da primeira etapa.

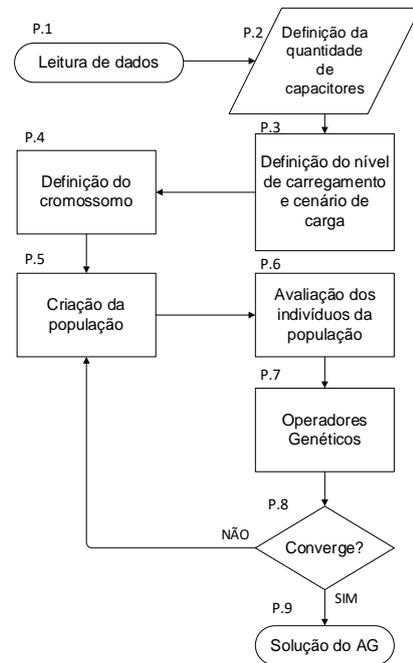


Fig. 1 - Fluxograma do método.

P.1 – Leitura de dados: Inicialização da rotina do AG no Matlab®, leitura de dados dos sistemas de distribuição como limites operacionais, nós e fases, e definição da quantidade de simulações a serem realizadas.

P.2 – Quantidade de capacitores a serem alocados: O usuário define a quantidade de capacitores que deseja alocar em cada sistema.

P.3 – Definição do nível de carregamento e cenário de carga: Para se aproximar do comportamento dos sistemas reais, diferentes níveis de carregamento foram simulados. Os níveis de carga foram divididos em três. Para o primeiro nível de carregamento a demanda das cargas são multiplicadas por valores que podem variar entre 0,3 a 0,8. Para o segundo nível, esses valores variam entre 0,8 a 1,2. Para o terceiro nível, completamente aleatório, essa variação fica entre 0,3 a 1,2. A cada execução do AG, um cenário de carga diferente é simulado, incorporando então as incertezas e aleatoriedades da demanda.

P.4 – Definição do cromossomo: a estrutura do cromossomo consiste nas possibilidades de alocações (barras e fases), como mostrado na figura abaixo:

Alocação 01 (Barra e fase)	Alocação 02 (Barra e fase)	Alocação n (Barra e fase)
-------------------------------	-------------------------------	-----	-----	------------------------------

Fig. 2 – Estrutura do cromossomo utilizado no AG.

Onde n é correspondente ao número de capacitores a serem alocados.

Cada indivíduo oferece uma nova configuração para o sistema, onde os capacitores instalados irão contribuir com injeção de potência reativa de acordo com as posições indicadas pelo AG.

P.5 – Criação da população: Inicialmente a população do algoritmo é criada de maneira totalmente aleatória. Com aplicação dos operadores genéticos – descritos em **P.7** – os indivíduos sofrem modificações nos genes e uma nova população é gerada a cada iteração.

P.6 – Avaliação dos indivíduos: Nessa etapa ocorre a avaliação de cada indivíduo da população, quando cada indivíduo é decodificado, os capacitores devidamente alocados e o fluxo de potência executado pelo OpenDSS, obtendo deste os valores de perdas totais, tensões nodais e no caso da segunda etapa do método, o FD também. Neste passo a função de aptidão avalia quais indivíduos geram os melhores resultados de acordo com o objetivo e restrições do problema. Os indivíduos mais bem avaliados neste passo são responsáveis por gerar os melhores indivíduos nas próximas populações do AG. As principais diferenças da primeira e da segunda etapa é que a avaliação dos indivíduos na primeira etapa é voltada para a minimização de perdas nos sistemas de distribuição, enquanto na segunda etapa a avaliação irá incluir a mitigação do desequilíbrio entre as fases.

P.7 – Operações genéticas: Os operadores genéticos são empregados em cada população para gerar melhores soluções (indivíduos) através da aplicação de taxas de mutação, taxa de elitismo e crossover. Os valores utilizados correspondentes aos operadores foram os valores padrões do Matlab®. Esses operadores são aplicados até que se tenha convergência para uma solução.

P.8 – Critério de convergência: Essa etapa verifica se o critério de parada foi atingido, em caso negativo o algoritmo retorna para o passo P5 e em caso positivo obtém-se a solução para aquele cenário de carga definido no passo **P.3**.

P.9 – Finalização: Neste passo é apresentado a solução pelo AG após atingir o critério de convergência. A solução do algoritmo indica as alocações que proporcionam as menores perdas e respeitam as restrições do problema impostas tanto na primeira como na segunda etapa.

4. RESULTADOS

O método proposto foi testado nos sistemas IEEE 13 e IEEE 37 *Node Test Feeders* (IEEE PES, 2021). As simulações foram executadas em um Intel Core i5, 2,3GHz, 4GB RAM, utilizando sistema operacional Windows 10 Pro, com o Matlab R2015a e o OpenDSS versão 8.1.6.1 (64 bits build). O tempo de processamento das simulações varia de acordo com os níveis de carregamento (quanto maior o carregamento, mais iterações são necessárias para o fluxo de potência convergir) e com os sistemas testados (quanto maior a dimensão dos sistemas, maior tempo computacional).

Para a primeira etapa, o AG foi executado 300 vezes em cada sistema, sendo 100 vezes para cada nível de carregamento. Este número excessivo de execuções foi realizado apenas para verificar a sensibilidade das soluções iniciais em relação a variabilidade do carregamento. Foi

verificado que independe da carga dos sistemas, o conjunto ideal da população inicial era praticamente o mesmo.

Em cada simulação, as cargas assumem valores diferentes dentro do intervalo que define o nível de carga e operação da rede, implicando em soluções distintas indicadas pelo AG a cada simulação. Apesar da natureza aleatória do algoritmo e à incorporação das incertezas das cargas, uma quantidade maior de simulações não contribuiu para uma melhor sensibilidade na identificação da população inicial ideal.

O seguinte procedimento será utilizado nos exemplos desta seção. Na primeira etapa do problema é realizada uma análise de sensibilidade para verificação das barras mais indicadas para minimização das perdas nos sistemas. A potência dos capacitores é fixada em 100 kvar em todas as simulações. Ao finalizar a primeira etapa, as barras que foram indicadas pelo AG com maior frequência e suas respectivas fases serviram para entrada de dados da segunda etapa do método. Em todos os casos simulados a quantidade de capacitores foi igual a seis. A quantidade de capacitores foi definida de modo a permitir maior diversidade de indicações dos possíveis pontos de alocação. Na segunda etapa é realizada a alocação dos capacitores.

Para validação do método proposto, foram realizadas simulações em casos com alocação dos capacitores nas barras e fases mais indicadas (caso de alocação), consideradas as alocações ótimas. Também foram realizadas simulações para casos em que não há alocação de capacitores nas redes (caso base). Foi escolhido apenas um nível de carregamento para as simulações de comparação, sendo este, o nível que permite as cargas serem multiplicadas por valores entre 0,8 e 1,2. Os resultados serão expostos nas seções seguintes para comparação de casos e avaliação da metodologia.

4.1 Sistema IEEE 13 Node Test Feeders modificado

A Fig. 3 apresenta o alimentador do sistema IEEE 13. Este é um pequeno alimentador com tensão nominal de 4.16 kV. É caracterizado por possuir linhas aéreas e subterrâneas, um regulador de tensão na saída da subestação, um transformador e cargas desequilibradas.

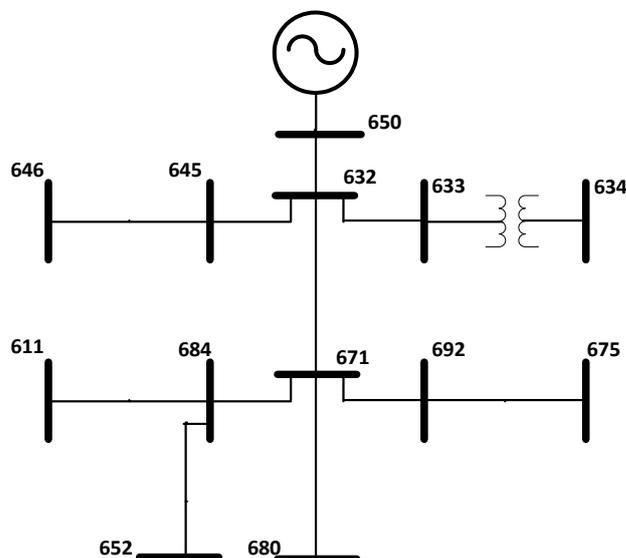


Fig. 3 – Diagrama unifilar do sistema IEEE de 13 barras.

Os resultados da primeira e segunda etapa são mostrados na Fig. 4 e Fig. 5, onde cada uma das figuras apresenta as incidências para cada possibilidade de alocação indicadas pelo AG por nível de carregamento simulado. É observado que a frequência de indicação para cada alocação varia de acordo com o nível de carga da rede. Entretanto, algumas alocações são selecionadas constantemente, outras com menor frequência e outras nunca são selecionadas.

Das simulações executadas tem-se que as barras mais indicadas para alocação de capacitores considerando os três níveis simulados são as barras 684, 671, 675, 634, 652 e 632.

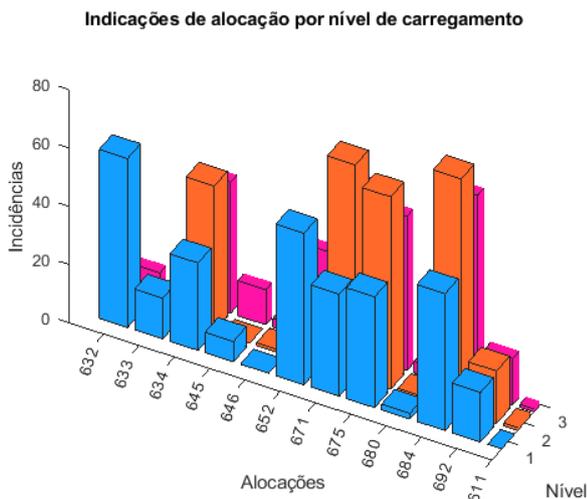


Fig. 4 – Indicações das barras por nível de carregamento para IEEE 13 – primeira etapa.

A partir das barras mais indicadas na primeira etapa e suas respectivas fases, foi formado o conjunto de possíveis alocações da segunda etapa. Pode-se observar na Fig. 5 que as alocações mais indicadas para solução do problema são 634.A, 684.A, 671.A, 652.A, 675.A e 632.A.

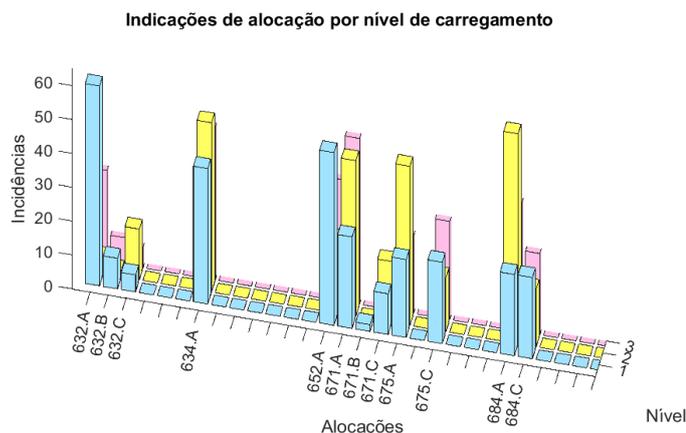


Fig. 5 – Indicações de alocação por nível de carregamento para IEEE 13 – segunda etapa.

A Fig. 5 apresenta as quantidades de indicações pelo AG das possibilidades de alocações (barra e fase) por nível de carregamento para o sistema IEEE 13.

A Tabela 1 exibe os resultados obtidos pelas simulações realizadas.

TABELA 1 - SISTEMA IEEE 13 BARRAS
 RESULTADOS

	<i>Caso Base</i>	<i>Alocação</i>
Violações de deseq.	5	0
Perdas (kW)	127,72	103,09
Redução (%)	19,28	

Conforme exposto, o método foi capaz de minimizar as perdas ativas do sistema e ainda reduzir a zero as violações de desequilíbrio de tensão considerando mil cenários de carga diferentes, em que a cada cenário um valor aleatório era multiplicado para simular a variabilidade da carga. Além disso, em todas as simulações para o caso sem a alocação ótima dos capacitores ocorreu pelo menos uma violação de algum dos limites de tensão, enquanto para todas as simulações com a alocação ótima, em nenhuma houve violação de tensão.

4.2 Sistema IEEE 37 Node Test feeders modificado

O sistema IEEE 37 é um alimentador de distribuição real localizado na Califórnia, com tensão nominal de operação de 4,8 kV. É caracterizado por sua configuração delta, segmentos de linha subterrâneos, regulação de tensão da subestação, cargas pontuais e muito desequilibradas.

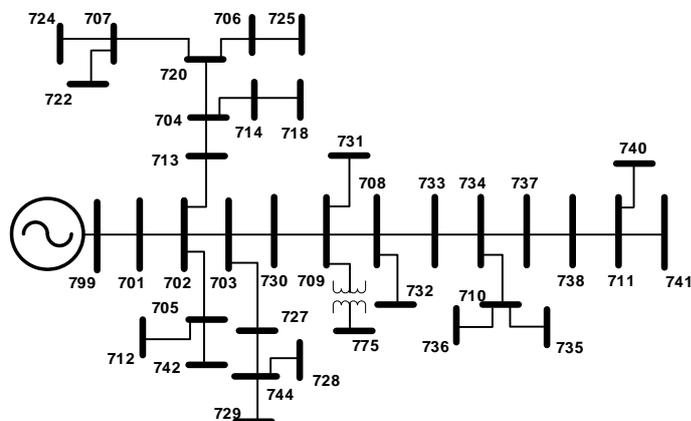


Fig. 6 – Diagrama unifilar do sistema IEEE de 37 barras.

A partir do total de simulações executadas, considerando os três níveis de carregamento simulados para o sistema, tem-se que as barras mais indicadas para alocação de capacitores são as barras 712, 713, 720, 727, 728 e 730. Ao final da segunda etapa tem-se que as alocações mais indicadas são 713.A, 730.A, 712.A, 727.A, 720.A e 728.A.

As Fig. 7 e Fig. 8 apresentam os resultados obtidos na primeira e segunda etapa, respectivamente. Sendo estes as quantidades de indicações (incidências) das alocações indicadas pelo AG por nível de carregamento. Em seguida a Tabela 2 mostra os resultados para as simulações de validação da metodologia no sistema.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposto um método em duas etapas para a alocação ótima de capacitores em sistemas de distribuição de energia elétrica através da técnica de algoritmos genéticos, considerando durante o processo de otimização as aleatoriedades e incertezas do carregamento. O objetivo da alocação ótima dos capacitores foi a minimização das perdas técnicas totais e mitigação do desequilíbrio de tensão, respeitando as restrições operacionais dos sistemas.

Com o método foi possível observar que uma análise de sensibilidade para redefinir o espaço de busca melhorou a qualidade das soluções do AG e reduziu consideravelmente o tempo computacional nos casos testados. A média das perdas foi potencialmente reduzida e ainda reduziu as violações de desequilíbrio de tensão nos alimentadores considerando as diversas possibilidades de cenários de carga que acontecem nos sistemas reais de distribuição.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem ao CNPq, FAPEMIG, PPEE/UFJF e CAPES.

REFERÊNCIAS

- ANEEL, 2018. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST.
- Araujo, L. R., Penido, D. R. R., Carneiro, S., & Pereira, J. L. R. (2013). A three-phase optimal power-flow algorithm to mitigate voltage unbalance. *IEEE transactions on power delivery*, 28(4), 2394-2402.
- Araujo, L. R., Penido, D. R. R., Carneiro, S. & Pereira, J. L. R., 2018. Optimal Unbalanced Capacitor Placement in Distribution Systems for Voltage Control and Energy Losses Minimization. *Electric Power Systems Research*, Vol. 154, pp. 110-121.
- Baysal, Y. A., & Altas, I. H. (2016, August). Cuckoo search algorithm for power loss minimization by optimal capacitor allocation in radial power systems. In *2016 International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA)* (pp. 1-5). IEEE.
- Bhatt, Yagnesh H., Dhruvkumar V. Bhatt, and Vijayanarasimha H. Pakka. "Voltage Stability Index and Voltage Deviation Improvements using Intelligent Algorithms for Capacitor Sizing and Placement." 2018 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). IEEE, 2018.
- Ceylan, O., & Paudyal, S. (2017, June). Optimal capacitor placement and sizing considering load profile variations using moth-flame optimization algorithm. In *2017 International Conference on Modern Power Systems (MPS)* (pp. 1-6). IEEE.
- Duque, F. G., de Oliveira, L. W., de Oliveira, E. J., Marcato, A. L., & Silva Jr, I. C. (2015). Allocation of capacitor banks in distribution systems through a modified monkey search optimization technique. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 73, 420-432.
- IEEE Radial Distribution Test Feeders. *Distribution Systems Analysis Subcommittee* [online]: <http://sites.ieee.org/pes-testfeeders/>. Accessed: Maio/2021.
- Neagu, Bogdan Constantin, Mihai Gavrilăș, and Gheorghe Ghiocel Matei. "Voltage/VAR Control with Reactive Power Injection in Distribution Networks using a Proper Metaheuristic Approach." 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe). IEEE, 2018.
- Pranitha, M. P., and KRM Vijaya Chandrakala. "Optimal capacitor placement based improved reliability assessment of a distribution system." 2017 International Conference on Intelligent Computing and Control (I2C2). IEEE, 2017.
- Upadhyay, Garvita, Rachit Saxena, and Gaurav Joshi. "Optimal capacitor placement and sizing in distribution system using hybrid approach of PSO-GA." 2017 International Conference on Advances in Electrical Technology for Green Energy (ICAETGT). IEEE, 2017.

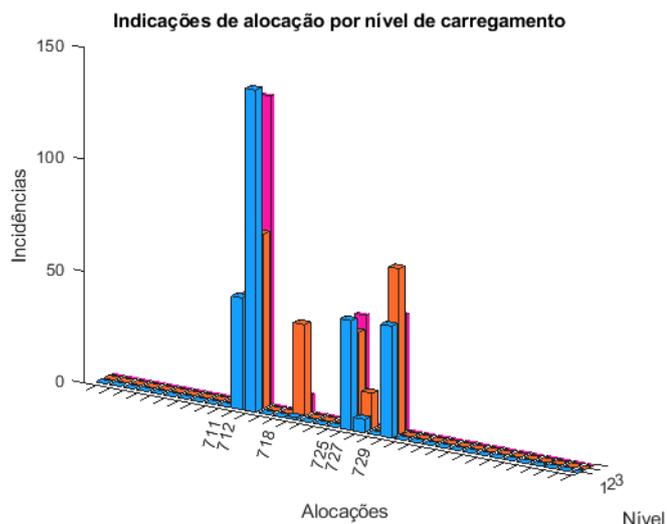


Fig. 7 – Indicações das barras por nível de carregamento para IEEE 13 – primeira etapa.

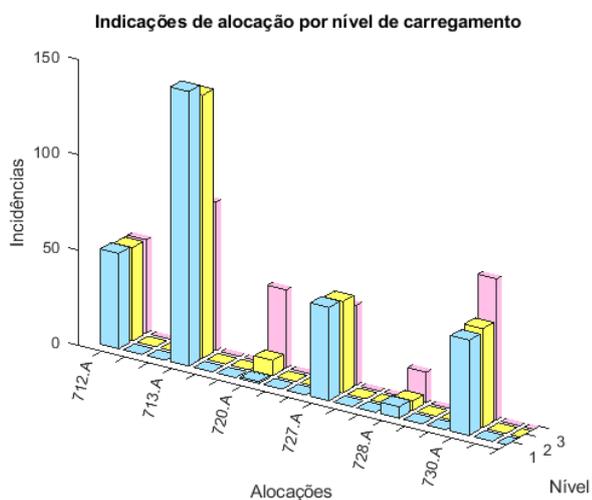


Fig. 8 – Indicações das alocações por nível de carregamento para IEEE 37 – segunda etapa.

TABELA 2 - SISTEMA IEEE 37 BARRAS
 RESULTADOS

	<i>Caso Base</i>	<i>Alocação</i>
Violações de deseq.	5938	14
Perdas (kW)	152,83	124,57
Redução (%)	18,49	

Da mesma forma que no sistema anterior, o método foi capaz de reduzir as perdas ativas totais e ainda reduzir a as violações de desequilíbrio considerando mil cenários diferentes de carga. Novamente, em todas as simulações para o caso sem a alocação dos capacitores, pelo menos um dos limites de tensão foi violado, enquanto em todas as simulações com a alocação ótima não houve nenhuma violação de tensão.

Todos os casos foram simulados considerando a população inicial calculada conforme o método proposto e utilizando a população inicial calculada aleatoriamente. O ganho de desempenho computacional foi aproximadamente 14,57 %.