



ALOCAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE BANCOS DE CAPACITORES EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO PRIMÁRIA DE ENERGIA ELÉTRICA

Miguel Monteiro Costa*¹, Carlos Henrique Nogueira de Resende Barbosa²

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil

² Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Ouro Preto
Rua 36, 115, Loanda, 35931-008, João Monlevade – MG, Brasil.

Resumo - Valores inadequados de tensão nas barras e elevadas perdas elétricas nas linhas são problemas recorrentes em redes de distribuição de energia elétrica. Este trabalho propõe a inserção de bancos de capacitores, de capacidades fixas, para minimizar estas condições operacionais indesejadas. São aplicadas duas meta-heurísticas como estratégias de otimização: a Particle Swarm Optimization (PSO) e a Variable Neighborhood Search (VNS), que têm o propósito de indicar as barras nas quais os bancos devem ser instalados e suas respectivas capacidades. Como sistemas de teste, uma rede monofásica (de 222 barras) e uma rede trifásica (de 34 barras) foram usadas e as simulações demonstraram melhor desempenho da PSO para tratar o problema modelado.

Palavras-Chave - Bancos de Capacitores, Otimização por Nuvem de Partículas, Busca em Vizinhança Variável.

PLACEMENT AND SIZING OF CAPACITOR BANKS IN PRIMARY DISTRIBUTION NETWORKS OF ELECTRICAL ENERGY

Abstract - Inadequate voltage values in the bars and high electrical losses in the lines are recurrent problems in electricity distribution networks. This work proposes the insertion of capacitor banks with fixed capacities to minimize these unwanted operating conditions. Two meta-heuristics are applied as optimization strategies: Particle Swarm Optimization (PSO) and Variable Neighborhood Search (VNS), which are intended to indicate the bars on which the banks are to be installed and their respective capabilities. As test systems, a single-phase network (222 bars) and a three-phase network (34 bars) were used and the simulations demonstrated better performance of the PSO to treat the modeled problem.

Keywords - Capacitor Banks, Particle Swarm Optimization, Variable Neighborhood Search.

I. INTRODUÇÃO

A compensação de reativos é um procedimento comum em redes de distribuição de energia elétrica que tem o

*miguelmonteirorp@yahoo.com.br

propósito de mitigar condições operacionais indesejadas como, por exemplo, níveis de tensão nas barras fora dos limites técnicos ou perdas de potência ativa elevadas nas linhas. Outras formas de mitigação dos problemas mencionados incluem a alocação de reguladores de tensão e a reconfiguração das interconexões da rede por meio de manobras de chaves.

A alocação de bancos de capacitores proporciona vantagens como o controle do fluxo de potência, a correção do fator de potência e a melhoria do perfil de tensão a partir de um dado trecho de linha pela compensação que reduz a parcela reativa.

A. Referencial Teórico

O problema de alocação de bancos de capacitores (PABC) é clássico no estudo de sistemas elétricos de potência com as seguintes características: não-linear, não-convexo, restrito e, geralmente, modelado por meio de variáveis mistas [1,2]. A literatura especializada dispõe de diversos trabalhos que propõem diferentes abordagens para resolver a compensação de reativos por alocação de bancos de capacitores.

As primeiras propostas usavam métodos analíticos [3-6], tratando o problema de forma aproximada baseando-se na inserção de capacitores em um alimentador uniforme, com carga uniformemente distribuída. Nesse cenário, o melhor ponto de instalação do capacitor seria a 2/3 do comprimento do trecho entre o nó a montante (rumo à subestação) e o nó a jusante. Algumas propostas empregaram Lógica Fuzzy (LF) para a inserção de bancos em redes de distribuição na presença de distorções harmônicas [7,8]. Em [7], a LF faz a alocação dos bancos e, posteriormente, em conjunto com o Algoritmo Imune, faz o dimensionamento destes. Já em [8], a LF é otimizada por Algoritmos Genéticos (AG) para realizar a alocação e dimensionamento dos bancos. AGs também são empregados em [9,10] para resolver o PABC.

Em [11], a Particle Swarm Optimization (PSO) foi empregada para se determinar os locais e as capacidades dos bancos de capacitores fixos e automáticos, tomando em consideração a curva diária de carga. Uma modificação na PSO foi proposta em [12] com a inserção de operadores de cruzamento e mutação para resolver o PABC. Essa meta-

heurística também foi aplicada a outros problemas a exemplo da proteção de sistema elétricos [13].

Em [14], o modelo matemático está associado a uma função objetivo e restrições lineares, juntamente com variáveis contínuas e binárias, tratando o problema por meio da programação linear inteira mista. O modelo incorpora a definição simultânea de tap ótimo para operação dos transformadores de distribuição para minimizar as violações nos limites de tensão. Em [15], foi proposto um método em dois estágios: (i) os nós a serem bancos alocados são listados a partir da verificação da máxima redução nas perdas devido à inserção gradativa de bancos e; (ii) AGs são empregados para se realizar a alocação otimizada.

Neste trabalho, o modelo matemático para o problema proposto é apresentado. Em seguida, são descritos os modelos adotados para os diversos componentes da rede aqui citados. Posteriormente, são descritas as duas meta-heurísticas empregadas e, por fim, são apresentados os resultados obtidos e as conclusões da pesquisa. Ressalta-se que a pesquisa aqui apresentada é fruto de um trabalho de conclusão de curso [16] desenvolvido na Universidade Federal de Ouro Preto e defendido no ano de 2016.

II. MODELO MATEMÁTICO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

A função objetivo modelada para o PABC envolve o custo de investimento (aquisição e instalação) e o custo das perdas de potência ativa totais no sistema elétrico, conforme (1).

$$\min F = C_{bancos} + C_{perdas} \quad (1)$$

Nesse trabalho, avalia-se a instalação de bancos de capacitores de capacidades fixas (unidades monofásicas), com valores da Tabela I. Os preços dos bancos (C_{bancos}), em dólares, referem-se ao ano de 2015 cuja cotação foi admitida ser igual a R\$ 3,77, considerando a operação dos mesmos em tensão nominal de 13,8 kV e frequência de 60 Hz.

Tabela I - Custo dos Bancos de Capacitores

Valor (kVAr)	Custo (US\$)	Valor (kVAr)	Custo (US\$)
150	693	400	1218
200	798	450	1321
300	1012		

A parcela C_{perdas} refere-se ao custo das perdas de energia ativa nos condutores que compõem as linhas, representadas como valor agregado em MWh. Esse custo foi estimado com base no valor médio comercializado pelas empresas geradoras de energia em leilão realizado no ano de 2007, equivalente a R\$ 123,95 por MWh. Para fins de comparação, o valor médio do MWh comercializado pelas distribuidoras de energia elétrica em 2014, para a região Sudeste, correspondeu a R\$ 282,21 [17]. Com base nesse valor, o custo das perdas pôde ser atualizado para um contexto atual. O período de validade da alocação proposta não é superior a 15 anos, o que equivale ao tempo médio de vida útil dos bancos, conforme [11], a partir do qual a demanda dos consumidores esboça variações significativas. Portanto, tal período de tempo é tido como referência para o cálculo das perdas. O custo das perdas foi calculado conforme (2).

$$C_{perdas} = (CustodaEnergia) * (PerdasMW) * (Período) \quad (2)$$

$$C_{perdas} = 123,95 * (Perdas) * 10^{-6} * 15 * 365 * 24 \quad (3)$$

$$C_{perdas} = 16,287 * Perdas \quad (4)$$

em que $Custodaenergia$ refere-se ao custo do MWh, $PerdasMW$ ($Perdas$) denota o total de perdas ativas verificado na rede em MW (em W) e $Período$ corresponde ao tempo de validade da solução proposta, igual a 15 anos, já visto anteriormente. O fator 10^{-6} deve-se à representação das perdas em W.

Em (5) e (6), são apresentadas as restrições para o PABC, que estabelecem limites para o perfil de tensão de acordo com a legislação vigente [18]:

$$\min(V_{ak}, V_{bk}, V_{ck}) \geq 0,93p.u. \quad (5)$$

$$\max(V_{ak}, V_{bk}, V_{ck}) \leq 1,05p.u. \quad (6)$$

em que V_{ak}, V_{bk}, V_{ck} são as tensões das fases A, B e C para a k-ésima barra, dadas em 'por unidade'.

A restrição apresentada em (7) implica que a soma das potências das cargas de todas as barras acrescidas às perdas nos trechos deva ser igual ou inferior à capacidade da subestação fornecedora de potência à rede.

$$Perdas + \sum_{k=1}^{n_{barras}} S_k \leq S_{max} \quad (7)$$

em que n_{barras} corresponde ao número total de barras da rede de distribuição, S_k corresponde à potência da carga, em kVA, ligada à barra k e S_{max} corresponde à máxima potência, em kVA, que pode ser fornecida pela subestação.

III. MODELAGEM DOS COMPONENTES DA REDE ELÉTRICA

Capacitores de potência são elementos estáticos inseridos nos circuitos de transmissão e distribuição (primária e secundária) do sistema elétrico com o intuito de reduzir o consumo de potência reativa [19]. Os principais parâmetros que definem um capacitor são a Tensão de Utilização e a Potência de Serviço. A norma NBR 5282 é aplicada para regulamentar o uso dos bancos de capacitores *shunt* com tensão acima de 1000 V.

Os bancos de capacitores são geralmente tratados como susceptâncias constantes, conectadas em estrela ou delta [19], ou como impedâncias constantes [20]. Em redes de distribuição, os comprimentos médios das linhas não ultrapassam algumas dezenas de quilômetros, o que torna aceitável o modelo de linha curta [21]. O método de cálculo de fluxo de potência por varreduras (MFPV) [22] é mais apropriado quando desenvolvido na modalidade trifásica uma vez que alimentadores operam de modo desequilibrado. Ainda que iterativo, o MFPV é de fácil implementação, fornece resultados satisfatórios e tem convergência rápida. Em [22], o MFPV é descrito em detalhes.

IV. ESTRATÉGIAS DE OTIMIZAÇÃO

A. Particle Swarm Optimization - PSO

Segundo [22], a PSO é uma meta-heurística evolucionária que visa simular o comportamento de um bando de pássaros em voo cujo padrão de movimento é localmente aleatório,

mas globalmente coeso e, portanto, determinado. É uma técnica muito utilizada em sistemas contínuos não-lineares, mas pouco explorada para problemas discretos. Para este método, existe um grupo de indivíduos ou partículas que juntos formam a nuvem (ou enxame) de partículas e evoluem através da cooperação e não da competição entre si. As partículas beneficiam-se de sua própria experiência e da experiência alheia durante o processo de busca pelo melhor compromisso entre os critérios considerados na função objetivo do modelo matemático sondado.

Usa-se (8) para calcular a nova velocidade da partícula, tendo como referência sua velocidade anterior e as distâncias entre sua posição atual, sua melhor posição já visitada e a melhor posição do grupo conhecida. Assim, define-se a nova posição de cada partícula i de acordo com (9). A avaliação de cada partícula é feita usando-se uma função de aptidão que avalia cada partícula. O efeito do fator de inércia W existe para controlar o grau de influência da velocidade anterior na velocidade atual. A meta-heurística PSO é descrita em detalhes em [23,24].

$$V_i = w * V_i + c_1 * rand() * (P_{best_i} - X_i) + c_2 * rand() * (G_{best} - X_i) \quad (8)$$

$$X_i = X_i + V_i \quad (9)$$

em que V_i é a velocidade atual da partícula i , X_i é a posição atual, P_{best_i} corresponde à melhor posição já visitada pela partícula i , G_{best} corresponde à melhor posição já visitada pelo enxame, c_1 e c_2 são constantes positivas que correspondem a componentes cognitivas e sociais, $rand()$ é uma função aleatória no intervalo [0,1] e w é o peso de inércia de movimento das partículas.

Em termos práticos, uma solução candidata X_i equivale à i -ésima possibilidade de alocação de bancos na rede, e V_i representa a variação desta solução feita por meio de remoção/inclusão/alteração de capacidade de um ou mais bancos.

Na aplicação da PSO ao modelo do problema apresentado anteriormente, cada partícula (solução candidata) consiste em um vetor linha de dimensão equivalente ao número de barras da rede a ser analisada, em que cada entrada desse vetor é associada a uma barra da rede, indicando a capacidade do banco a ser inserido naquela barra. Para a barra que não tenha banco inserido, será associado o valor nulo.

Conforme as capacidades disponíveis para os bancos, descritas na Tabela I, números equivalentes foram codificados, conforme mostra a Tabela II. Dessa forma, o deslocamento das partículas resumiu-se a acrescentar ou diminuir um número aleatório entre 0 e 12, sendo feito posteriormente um arredondamento para o valor válido mais próximo.

Tabela II - Codificação dos bancos.

Capacidade (kVAr)	150	200	300	400	450	600
Equivalente	3	4	6	8	9	12

B. Variable Neighborhood Search - VNS

A *Variable Neighborhood Search* (Busca em Vizinhança Variável) é uma meta-heurística que realiza busca local na vizinhança de uma solução corrente [25]. A VNS é um método de busca local que consiste em explorar o espaço de

soluções por meio de trocas sistemáticas de estruturas de vizinhança. Diferentemente de outras técnicas, esse método não segue uma trajetória, mas sim explora soluções vizinhas gradativamente mais "distantes" da solução atual e concentra a busca em torno de uma nova solução se, e somente se, um movimento de melhoria é realizado. Caso não haja uma solução vizinha melhor do que a atual, busca-se, aleatoriamente, uma solução vizinha cada vez mais remota. Caso haja uma solução melhor, inicia-se uma nova busca local.

Na aplicação do método VNS ao PABC, o modo de se realizar a busca em uma vizinhança consistiu em alterar o valor agregado ao banco em determinada barra. Isto é feito por meio de uma soma ou diferença entre um valor aleatório e o valor referente ao banco, de modo a inserir, remover ou alterar o valor do banco.

As estruturas de vizinhança consistiram em limitar a quantidade de barras a serem modificadas. Para assumir o lugar da solução vigente, a vizinha tem que ser mais bem avaliada em relação à função objetivo e não violar as restrições do problema quanto ao perfil de tensão, que foram apresentadas anteriormente. O critério de parada é alcançado quando se chega a um limite de iterações sem melhoria da solução, ou quando se alcança simplesmente um limite máximo de iterações.

V. TESTES E RESULTADOS

Todas as simulações apresentadas foram implementadas no software MatlabTM, e executadas em um processador Intel Core i5 2410M, com memória RAM de 6 GB e Disco Rígido de 750 GB. As estratégias PSO e VNS empregadas foram validadas para funções analíticas de benchmark, cujos ótimos são conhecidos [26]. Foram escolhidas três funções: Easom [26], EggHolder [26] e Griewank [26]. Para dez execuções realizadas, ambas meta-heurísticas sempre encontraram os ótimos. A partir daí, as duas meta-heurísticas trataram o PABC em uma rede de distribuição primária, trifásica, de 34 barras e uma rede monofásica, de 222 barras. A dinâmica das simulações consistiu em (i) propor alocações iniciais aleatórias de bancos, (ii) executar o fluxo de potência para cada solução candidata, (iii) avaliá-las e (iv) propor novas soluções a partir das atuais por meio do método de otimização. O processo de geração e avaliação de soluções termina quando o critério de parada é satisfeito.

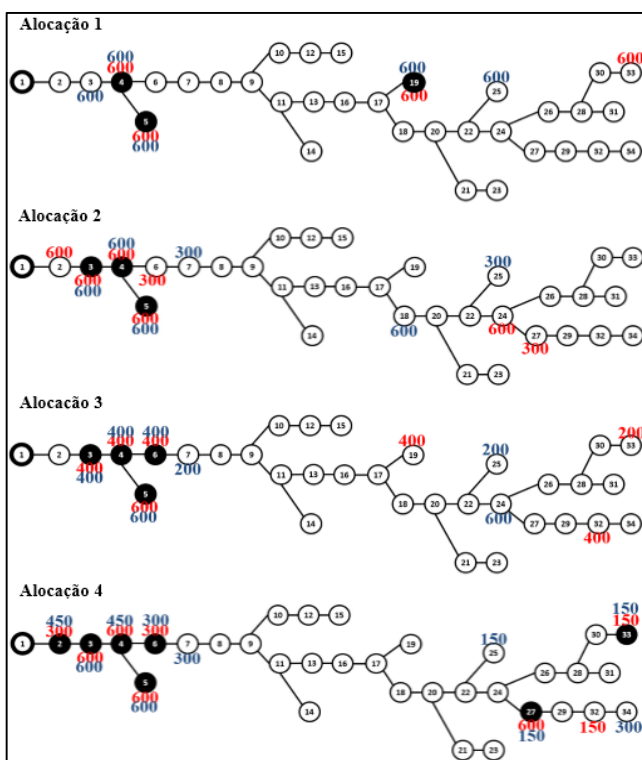
A rede de 34 barras [27] consiste em um alimentador trifásico de média tensão, do sistema IEEE. O mesmo tem tensão em sua barra de referência igual a 25,647 kV. Esta rede também apresenta bitolas CAA #1/0, CAA #2 e CAA #4. A relação X/R nas impedâncias próprias das fases varia entre 0,68 e 1,81. Já a rede de 222 barras consiste em um alimentador monofásico que possui tensão de 69 kV, uma barra de subestação e 221 barras de carga. Esta rede foi retirada de uma base [28] de uso público REDS: Repository of Distribution Systems (<http://www.dejazzer.com/reds.html>), criada por Rajesh Kavasseri e Cristinel Ababei.

A. Rede Trifásica de 34 Barras

Para esta rede, foram realizadas quatro simulações. Na simulação do tipo 'Alocação 1' somente um valor para a

capacidade do banco era disponibilizado - 600 kVAR. Na simulação do tipo ‘Alocação 2’ estavam disponíveis dois valores - 300 kVAR e 600 kVAR. A ‘Alocação 3’ permitia 200 kVAR, 400 kVAR e 600 kVAR. E finalmente, na ‘Alocação 4’ eram permitidos quatro valores - 150 kVAR, 300kVAR, 450kVAR e 600kVAR. O propósito para a criação desses quatro tipos de alocações era o de constatar a coerência dos resultados encontrados pelos dois algoritmos ao lidar com espaços de busca diferentes para um mesmo PABC. As dispersões dos bancos na rede são apresentadas na Figura 1, onde os valores estão em kVAR. As barras destacadas em preto foram os locais onde ambas as técnicas de otimização indicaram a instalação de banco de capacitores.

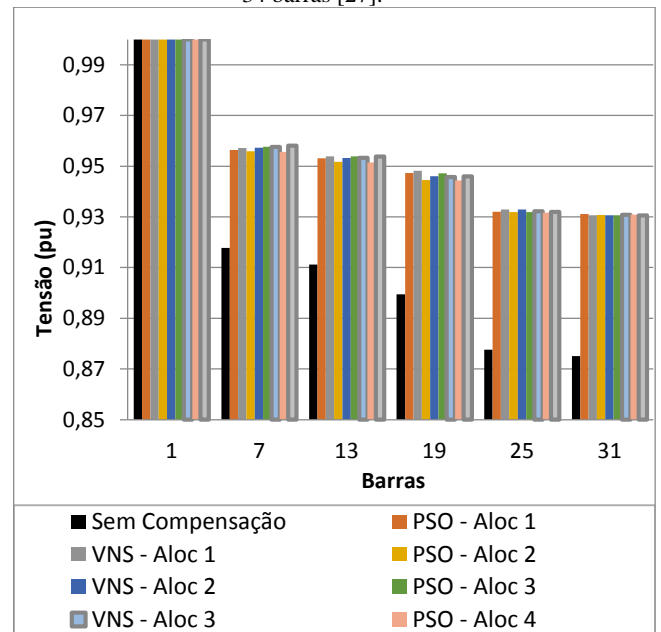
Figura 1: Soluções encontradas para a rede de 34 barras [27] pela PSO (vermelho) e pela VNS (azul).



Para os quatro tipos de alocação, nota-se que a quantidade e a disposição dos bancos definidas pelos dois algoritmos são semelhantes. Nas simulações realizadas, destaca-se a concentração de bancos na região inicial do alimentador, próxima à subestação, e também a coincidência na indicação das barras pelos dois métodos, onde na simulação ‘Alocação 4’, 7 das 11 barras compensadas foram coincidentes. A Figura 2 apresenta o perfil de tensão para uma das fases, de algumas barras da rede testada. Os perfis para as demais fases foram bem similares a esta.

Na Figura 2 destaca-se a proximidade dos níveis de tensão verificados nas barras provenientes das oito soluções encontradas (quatro obtidas pela PSO e quatro pela VNS), e todas as soluções propostas atendem às restrições de perfil de tensão descritas em (5) e (6). As barras em preto mostram o perfil de tensão da rede sem a inserção de BCs.

Figura 2: Perfis de tensão encontrados para a fase A da rede de 34 barras [27].



As Tabelas III e IV resumem, respectivamente, as perdas elétricas na rede (percentual em relação à potência total, estimado através da razão entre a soma das potências ativas dissipadas nas linhas das três fases e a soma das potências ativas das cargas das três fases) e os custos totais das melhores soluções representadas na função objetivo proposta.

Tabela III - Análise das perdas para rede de 34 barras [27].

	PSO	VNS	Sem Bancos Inseridos
Alocação 1	6,84%	6,81%	
Alocação 2	6,65%	6,82%	
Alocação 3	6,64%	6,69%	9,18%
Alocação 4	6,61%	6,63%	

Tabela IV - Análise da Função Objetivo para rede de 34 barras [27].

	PSO	VNS
Alocação 1	R\$ 3.603.523,34	R\$ 3.604.256,49
Alocação 2	R\$ 3.543.827,44	R\$ 3.612.607,38
Alocação 3	R\$ 3.522.715,65	R\$ 3.545.979,33
Alocação 4	R\$ 3.516.490,36	R\$ 3.545.440,28

Destaca-se o melhor desempenho da PSO de modo geral, em que o melhor resultado foi obtido na simulação do tipo ‘Alocação 4’, em que se tem disponíveis quatro valores para as capacidades dos bancos, permitindo o refinamento da solução similar encontrada na ‘Alocação 3’. As Figuras 3 e 4 apresentam a evolução do valor da Função Objetivo para as duas meta-heurísticas.

B. Rede Monofásica de 222 Barras

Para a rede de 222 barras foi realizada apenas a simulação ‘Alocação 4’. As Tabelas V e VI apresentam os resultados encontrados pelas duas meta-heurísticas.

As duas estratégias de otimização encontraram soluções distintas entre si. A PSO propôs uma alocação onde a maioria dos bancos, 44 de um total de 46, deva possuir uma

Figura 3: Evolução da Função Objetivo na simulação ‘Alocação 4’ da PSO para a rede de 34 barras [27].

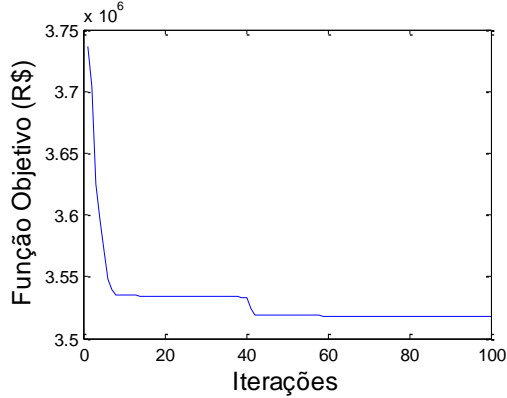


Figura 4: Evolução da Função Objetivo na simulação ‘Alocação 4’ da VNS para a rede de 34 barras [27].

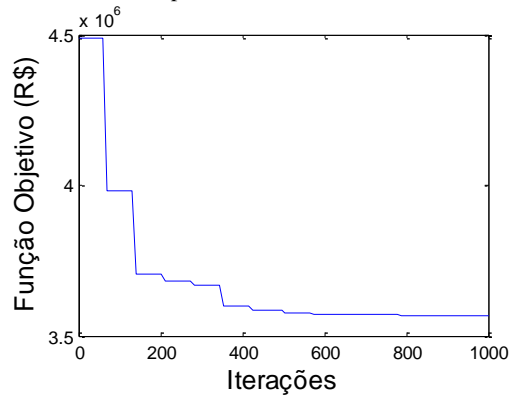


Tabela V - Solução encontrada pela PSO para a rede de 222 barras [28].

Barra	Banco (kVAr)	Barra	Banco (kVAr)	Barra	Banco (kVAr)
12	600	62	600	149	600
13	600	71	600	160	600
19	600	73	600	172	600
21	600	75	600	174	600
22	600	76	600	176	600
28	600	90	600	182	600
34	300	100	600	183	600
39	600	103	600	189	600
42	600	109	600	190	600
44	600	110	600	205	600
47	600	124	600	206	600
48	600	128	600	214	600
49	600	135	600	218	600
52	600	136	300	219	600
60	600	141	600		
61	600	147	600		

capacidade de 600 kVAr, e apenas dois deles de capacidade igual a 300 kVAr. A VNS, por sua vez, alocou um total de 64 bancos, sendo as capacidades dos mesmos mais diversificadas, conforme mostra a Tabela VI. A Figura 5 apresenta os perfis de tensão resultantes nas barras deste alimentador, antes e após as inserções de bancos propostas.

Embora as duas soluções, quando vistas nas Tabelas V e VI, pareçam muito distintas, elas de fato propõem alocações de efeito de compensação reativa muito próximas entre si, sendo 27000 kVAr propostos pela solução encontrada pela PSO e 27150 kVAr propostos pela VNS, conforme mostra a Tabela VII. Os perfis de tensão nas barras, resultantes das duas soluções, se apresentam bem similares, com valores de

tensão bem próximos entre si (as duas curvas estão praticamente sobrepostas), conforme Figura 5.

Tabela VI - Solução encontrada pela VNS para a rede de 222 barras [28].

Barra	Banco (kVAr)	Barra	Banco (kVAr)	Barra	Banco (kVAr)
10	450	74	450	158	450
20	450	75	450	162	300
21	150	81	300	164	450
22	450	85	300	169	300
24	450	90	600	172	600
25	150	95	300	174	300
26	300	96	150	179	300
28	450	97	600	180	300
36	600	102	600	186	600
37	450	109	300	193	300
38	150	110	600	199	450
44	600	111	450	201	600
47	600	116	600	205	600
48	600	121	150	206	600
49	600	122	450	209	600
53	300	125	600	211	600
60	600	129	600	213	450
61	600	132	300	215	140
62	150	133	150	217	300
65	150	135	600		
68	450	141	600		

Figura 5: Perfis de tensão encontrados para a rede de 222 barras [28].

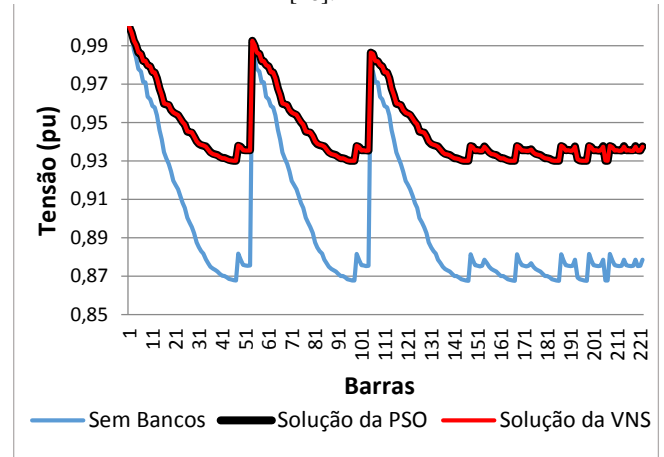


Tabela VII - Análise Financeira para a rede de 222 barras [28].

	Sem Bancos	PSO	VNS
Quantidade de Bancos	0	46	64
kVAr Instalado	0	27000	27150
Custo dos Bancos	0	R\$ 278.014,88	R\$ 305.539,65
Custo das Perdas	R\$ 52.288.662,29	R\$ 33.403.812,23	R\$ 33.423.307,76
Custo Total	R\$ 52.288.662,29	R\$ 33.681.827,11	R\$ 33.728.847,41

A preferência da solução obtida pela PSO por bancos de 600 kVAr, permitiu a ela alocar quase a mesma potência reativa que a solução da VNS, porém a um custo consideravelmente menor. Isto ocorre pelo fato desses bancos apresentarem o menor custo por kVAr, conforme pode ser verificado na Tabela I. Além de obter um menor custo de investimento em bancos, a solução da PSO também obteve um custo das perdas inferior ao obtido pela solução da VNS, obtendo, conseqüentemente, um menor custo total,

mostrando que esta meta-heurística se apresentou mais eficiente para o caso simulado. Em relação ao percentual de perdas de potência ativa nas linhas, a rede sem a inserção de bancos apresentava 9,96%. A solução proposta pela PSO gerou um percentual de 6,36%, e já a da VNS, 6,37%.

VI. CONCLUSÕES

A modelagem proposta neste trabalho mostrou-se efetiva, aplicável a redes monofásicas e trifásicas, o que permite o estudo de redes de distribuição desequilibradas. As soluções obtidas por ambas às estratégias resultaram em uma redução das perdas de potência ativa nas linhas em torno de 27% para a rede de 34 barras, e em torno de 36% para a rede de 222 barras, percentuais estes obtidos a partir da condição de operação da rede sem bancos alocados. Em relação aos níveis de tensão nas barras, todas as soluções obtidas para as duas redes proporcionaram perfis de tensão adequados. O bom desempenho dos métodos foi propiciado, em parte, pela codificação dos bancos proposta, favorecendo o desempenho da PSO. Para as redes avaliadas, as curvas de perfil de tensão para as soluções encontradas por ambas as meta-heurísticas se apresentaram muito próximas entre si, o que revela coerência entre as duas estratégias. Ambas as meta-heurísticas apresentaram-se satisfatórias frente ao problema de alocação formulado, mas a PSO sobressaiu-se.

REFERÊNCIAS

- [1] S.A. Taher, M. Hasani, A. Karimian, "A Novel Method for Optimal Capacitor Placement and Sizing in Distribution Systems with Nonlinear Loads and DG using GA", *Commun Nonlinear Sci Numer Simulat*, vol. 16, pp. 851-862, 2011.
- [2] F.G. Duque, L.W. Oliveira, E.J. Oliveira, A.L.M. Marcato, I.C.S. Junior, "Allocation of Capacitor Banks in Distribution Systems through a Modified Monkey Search Optimization Technique", *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 73, pp. 420-432, 2015.
- [3] N.M. Neagle, D.R. Samson, "Loss Reduction from Capacitors Installed on Primary Feeders", *AIEE Trans*, vol.75, pp. 950-959, 1956.
- [4] R.F. Cook, "Analysis of Capacitor Application as Affected by Load Cycle", *AIEE Trans*, vol.78, pp. 950-957, 1959.
- [5] J.V. Schmill, "Optimum Size and Location of Shunt Capacitors on Distribution Feeders," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 84, pp. 825-832, 1965.
- [6] N.E. Chang, "Locating Shunt Capacitors on Primary Feeder for Voltage Control and Loss Reduction", *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. 88, no. 10, pp. 1574-1577, 1969.
- [7] G.W. Chang, W.C. Chang, C.S. Chuang, D.Y. Shih, "Fuzzy Logic and Immune-Based Algorithm for Placement and Sizing of Shunt Capacitor Banks in a Distorted Power Network", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, no. 4, pp. 2145-2153, 2011.
- [8] M. Ladjavardi, M.A.S. Masoum, "Genetically Optimized Fuzzy Placement and Sizing of Capacitor Banks in Distorted Distribution Networks", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 1, pp. 449-456, 2008.
- [9] M.A.S. Masoum, M. Ladjavardi, A. Jafarian, E.F. Fuchs, "Optimal Placement, Replacement and Sizing of Capacitor Banks in Distorted Distribution Networks by Genetic Algorithms", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 4, pp. 1794-1801, 2004.
- [10] B.A. Souza, H.N. Alves, H.A. Ferreira, "Microgenetic Algorithms and Fuzzy Logic applied to the Optimal Placement of Capacitor Banks in Distribution Networks", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, pp. 942-947, 2004.
- [11] S. Singh, A.R. Rao, "Optimal Allocation of Capacitors in Distribution Systems using Particle Swarm Optimization", *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 43, pp. 1267-1275, 2012.
- [12] I. Ziari, G. Ledwich, A. Ghosh, D. Cornforth, M. Wishart, "Optimal Allocation and Sizing of Capacitors to Minimize the Transmission Line Loss and to Improve the Voltage Profile", *Computers and Mathematics with Applications*, vol. 60, pp. 1003-1013, 2010.
- [13] W. M. S. Bernardes, F. M. P. Santos, E. N. Asada, S. A. Sousa, M. J. Ramos, "Application of Discrete PSO and Evolutionary PSO to the Coordination of Directional Overcurrent relays", *IEEE XVII International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems*, 2013.
- [14] S. Haffner, L.A. Pereira, L.V. Gasperin, L. Barreto, "Alocação de Bancos de Capacitores em Redes de Distribuição de Energia Visando Eliminar Violações de Tensão", *Revista Controle e Automação*, vol. 20, no. 4, pp. 546-563, 2009.
- [15] A.R. Abul'wafa, "Optimal Capacitor Allocation in Radial Distribution Systems for Loss Reduction: A Two Stage Method", *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 95, pp. 168-174, 2013.
- [16] M. M. Costa, "Alocação Ótima de Bancos de Capacitores em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica: Abordagem para Redes Monofásicas e Trifásicas", *Monografia (Graduação)*, Universidade Federal de Ouro Preto, 2016.
- [17] EPE-Empresa de Pesquisa Energética, "Anuário Estatístico de Energia Elétrica-2015". 2015.
- [18] ANEEL, "Proc. de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST", [S.l.], 2008.
- [19] A.A. Godoi, "Alocação de Bancos de Capacitores em Redes Primária e Secundária de Energia Elétrica", *Dissertação (Mestrado)*, Universidade Federal do Paraná, 2009.
- [20] N. Kagan, "Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica". [S.l.]: Blucher, 2009.
- [21] W.H. Kersting, "Distribution System Modeling and Analysis", [S.l.]: CRC Press, 2001.
- [22] M.R. Carvalho, "Estudo Comparativo de Fluxo de Potência para Sistemas de Distribuição Radial", *Dissertação (Mestrado)*, Universidade de São Paulo, 2006.
- [23] D.J. Aloise, M.C.S. Oliveira, T.L. Silva, "Otimização Discreta por Nuvem de Partículas Aplicada ao Problema do Caixeiro Viajante", *Revista Controle e Automação*, vol. 1, no. 2, pp. 87-95, 2006.
- [24] R.C. Eberhart, J.A. Kennedy, "New Optimizer using Particles Swarm Theory", *Proc. Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*. Service Center, Piscataway, no. 1, pp. 39-43, 1995.
- [25] J.A. Reis, "Meta-Heurísticas Baseadas em Busca em Vizinhança Variável Aplicadas a Problemas de Operação de Transportes", *Dissertação (Mestrado)*, Universidade de São Paulo, 2013.
- [26] G.P. Singh, A. Singh, "Comparative Study of Krill Herd, Firefly and Cuckoo Search Algorithms for Unimodal and Multimodal Optimization", *I.J. Intelligent Systems and Applications*, no. 3, pp. 35-49, 2014.
- [27] L.F.O. Pizzali, "Cálculo de Fluxo de Potência em Redes de Distribuição com Modelagem a Quatro Fios", *Dissertação (Mestrado)*, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2003.
- [28] R. Kavasseri, C. Ababei, "Repository of Distribution Systems", disp. em: <http://www.dejazzer.com/reds.html>, Acesso em: Agosto de 2016.