

# Um Método de Dois Níveis para a Alocação de Compensações Reativas Monofásicas visando Redução de Perdas em Sistemas de Distribuição Desequilibrados

Antônio S. C. Martins\*, Fernando R. M. S. Costa\*\*  
Leandro R. Araujo\*\*\*, Débora R. R. P. Araujo\*\*\*\*

\*Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF)  
Juiz de Fora, Brasil (e-mail: antonio.sobrinho@engenharia.ufjf.br)  
\*\* Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF)  
Juiz de Fora, Brasil (e-mail: fernando.costa@engenharia.ufjf.br)  
\*\*\* Departamento de Energia Elétrica, UFJF,  
Juiz de Fora, Brasil (e-mail: leandro.araujo@ufjf.edu.br)  
\*\*\*\* Departamento de Energia Elétrica, UFJF,  
Juiz de Fora, Brasil (e-mail: debora.rosana@ufjf.edu.br)

---

**Abstract:** The improvement of the computational technology allows a better representation of distribution networks. Considering this scenario, this paper proposes the development of a tool capable to solve an Optimal Power Flow problem, where the modeling is appropriate, based on N-phase Current Injection Method. The objective function is the minimization of total electrical losses. Therefore, it is suggested capacitor allocation. The optimal location for those elements is determined by Genetic Algorithms. Then the size of the banks is calculated by the Interior Point Method. The use of two optimization methods guarantee good results with an acceptable computational time. For validation, the methodology is tested on the test feeders IEEE 4 Node System, IEEE 13 Node System, and IEEE 34 Node System.

**Resumo:** O avanço da tecnologia computacional permite o detalhamento cada vez mais completo dos sistemas elétricos de distribuição. Nesse sentido, o artigo propõe o desenvolvimento de uma ferramenta capaz de resolver um problema de Fluxo de Potência Ótimo, cujas redes de distribuição são modeladas apropriadamente, por meio do Método de Injeção de Correntes a N Condutores. A Função Objetivo consiste na minimização de perdas elétricas totais. Para que tal propósito seja alcançado, é sugerida a estratégia de alocação de um banco de capacitores. Para averiguar a melhor localização desse elemento, é efetuada uma otimização heurística, via Algoritmos Genéticos. Posteriormente, a capacidade do banco é definida via Método dos Pontos Interiores. A união de dois métodos de otimização visa buscar bons resultados mediante um tempo computacional aceitável. Para validação, a metodologia foi testada em topologias baseadas nos sistemas-teste IEEE 4 Barras, IEEE 13 Barras e IEEE 34 Barras.

**Keywords:** Distribution systems; three-phase power flow; optimal power flow; genetic algorithms; interior-point method; capacitor allocation.

**Palavras-chaves:** Sistemas de distribuição; fluxo de potência trifásico; fluxo de potência ótimo; algoritmos genéticos; método dos pontos interiores; alocação de capacitores.

---

## 1. INTRODUÇÃO

Os Sistemas de Distribuição (SD) eram comumente modelados de forma equilibrada (Monticelli, 1983) ou via componentes simétricas (Li *et al.*, 2017). À medida que os sistemas operam mais próximos de suas margens de carregamento, entretanto, os índices de desequilíbrio aumentam e as imprecisões cometidas pelo modelo tendem a crescer (Penido *et al.*, 2010). Tendo em vista essa perspectiva de aumento de carga e objetivando uma operação econômica e segura, é imprescindível que a modelagem esteja apta a

representar as características próprias de SD, tais como acoplamentos entre fases, cargas desequilibradas, conexões não usuais de transformadores, representação adequada do condutor neutro, dentre tantas outras (Garcia *et al.*, 2001).

A consideração dessas particularidades impacta significativamente nas análises de fluxo de potência, de forma que a maneira através da qual os sistemas são modelados foi se desenvolvendo ao longo dos anos. Em Monticelli (1983), é apresentada uma metodologia de resolução de fluxo de potência dedicada a sistemas de transmissão, por meio do

método de Newton-Raphson em coordenadas polares. Luo e Semlyen (1990) formulam uma abordagem de resolução trifásica, através do método *Forward/Backward Sweep* (FBS). Tal técnica foi aprimorada por Cheng e Shirmohammadi, anos mais tarde, em 1995, mas ainda havia limitações com respeito a topologias e controles. Costa *et. al.* (1999) contribuiu com o desenvolvimento do Método de Injeção de Correntes (MIC), que utiliza coordenadas retangulares no fluxo de potência. Garcia *et. al.* (2001) adaptou essa metodologia para instaurar o Método de Injeção de Correntes Trifásico (MICT), possibilitando uma melhor representação de topologias e controles. Para representar os SD desequilibrados da maneira mais autêntica possível, Penido *et. al.* (2008) elaborou o Método de Injeção de Correntes a Quatro Condutores (MICQ) e, posteriormente, o Método de Injeção de Correntes a N Condutores (MICN), em 2010.

O desenvolvimento do equacionamento do fluxo de potência pode ser aplicado nos problemas de Fluxo de Potência Ótimo (FPO). Nesse caso, o estado ótimo da rede em regime permanente é determinado sob o ponto de vista de alguma Função Objetivo (FOB). Ao se utilizar uma metodologia trifásica no emprego de tais estudos, é possível obter uma configuração de operação fidedigna.

Em Araujo *et. al.* (2013a), o equacionamento de injeção de correntes é utilizado para otimizar custo de geração e reduzir perdas. Também foi empregado para limitar os índices de desequilíbrio em Araujo *et. al.* (2013b). A estratégia de alocação de capacitores para redução de perdas e aprimorar o perfil de tensão pode ser vista em Araujo *et. al.* (2018). Esses trabalhos utilizaram modelagens multifásicas e alcançaram bons resultados.

No âmbito do FPO, a estratégia de alocação de capacitores é utilizada para diversos propósitos, tais como redução de perdas elétricas totais, aumento da confiabilidade do sistema, correção do fator de potência, melhora da margem de estabilidade, dentre outras aplicações.

Muitos trabalhos presentes na literatura abordam a aplicabilidade da alocação de bancos de capacitores. No trabalho de Esmacilian e Fadaeinnedjad (2014), é proposta uma lógica de otimização baseada em algoritmos *fuzzy*, com o intuito de aumentar a confiabilidade do sistema e apresentar melhoras referentes à qualidade de energia. Já em Gholami *et. al.* (2015), uma otimização meta-heurística é efetuada com o objetivo de reduzir perdas e melhorar o fator de potência. Mohamed *et. al.* (2017) apresenta uma forma simples e eficiente de determinar tanto a localização ótima dos bancos quanto sua capacidade. Para isso, são utilizados Algoritmos Genéticos (AG).

A contribuição deste trabalho é a proposta de um método de dois níveis para a alocação de compensações reativas monofásicas (capacitores, células fotovoltaicas, STATCOM são alguns exemplos) em SD, visando redução de perdas e manutenção do perfil de tensão. No primeiro nível de otimização, são utilizados Algoritmos Genéticos (AG) para identificar a localização e a potência da compensação reativa necessária. No segundo passo, a posição da compensação

reativa é mantida fixa, considerando os valores informados no primeiro nível, e novos valores de compensação reativa são calculados utilizando técnicas clássicas de otimização. Trata-se de uma etapa de verificação e busca avaliar se o resultado determinado pelo AG é suficientemente preciso. O método proposto reduz o esforço computacional e se apresenta como uma alternativa ao método exaustivo.

O artigo está estruturado da seguinte forma: na seção 2 são introduzidos os conceitos básicos; na seção 3 é discutida a formulação do problema de otimização; a seção 4 apresenta ao leitor a metodologia sugerida para resolver o FPO e a seção 5 revela os principais resultados obtidos por meio dela. Por fim, a seção 6 encerra o trabalho com as considerações finais.

## 2. CONCEITOS BÁSICOS

Serão apresentados, a seguir, os conceitos básicos acerca dos principais pontos tratados no presente trabalho, cuja compreensão corrobora para o entendimento geral do artigo.

### 2.1 Método de Injeção de Correntes a N Condutores (MICN)

O MICN (Penido *et. al.*, 2010) é um método capaz de analisar qualquer sistema elétrico, independentemente de sua topologia. É ideal para modelar SD, pois os nós são tratados de maneira individualizada, o que favorece a representação multifásica. A determinação da fase é feita através da conexão dos elementos. Logo, o conceito de nó engloba qualquer ponto de conexão entre dois elementos.

### 2.2 OpenDSS

O OpenDSS (do inglês: *Open Distribution System Simulator*) consiste em um *software* aberto de simulação de sistemas multifásicos. Nele, o usuário programa a topologia desejada para efetuar diversas análises elétricas. Cabe ao programador especificar as características de cada elemento do sistema elétrico, sendo as possibilidades abrangentes no que se refere às topologias.

## 3. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

O problema consiste na elaboração de uma ferramenta capaz de resolver FPO, cujo objetivo é a minimização de perdas elétricas através de alocação de capacitores. Foram consideradas compensações monofásicas, podendo até formar bancos trifásicos.

A FOB adotada é a minimização da potência gerada, expressa por (1). Essa função traduz minimização de perdas para os casos em que a carga é do tipo “potência constante”.

$$FOB = \min \sum_{s \in \{a,b,c,n\}} \sum_{i=1}^{N_T} P_i^s \quad (1)$$

Onde  $P_i^s$  indica cada potência ativa despachada por uma unidade geradora ou entregue pelo ponto de alimentação  $i$  na

fase  $s$ .  $N_T$  indica o número total de pontos de geração ou de alimentação.

As restrições foram divididas em dois grupos. O primeiro grupo é formado pelas restrições de igualdade, que são aquelas que efetivamente modelam a topologia trabalhada. Trata-se das equações de injeção de corrente e as equações de controle, denotadas por (2) e (3).

$$I_k(\mathbf{z}) = 0 \quad (2)$$

$$g(\mathbf{z}) = 0 \quad (3)$$

Onde  $I_k$  é o conjunto de equações de injeção de correntes,  $g$  é o conjunto de equações de controle e  $\mathbf{z}$  são as variáveis de estado, que são as componentes reais e imaginárias dos fasores de tensão nodais, além das potências ativa e reativa entregues pelos pontos de alimentação e as admitâncias dos capacitores que formam o banco. As equações de controle ( $g$ ) empregadas no presente trabalho são as que buscam especificar a tensão da barra que representa a subestação.

O segundo grupo de restrições diz respeito às condições a partir das quais o sistema pode operar. Logo, são restrições de canalização. Estão denotadas por (4), (5), (6) e (7).

$$V_{MIN} < V_k^s < V_{MAX} \quad (4)$$

A primeira restrição operacional diz respeito ao perfil de tensão. Ou seja, as magnitudes das tensões nodais podem variar entre valores mínimos e máximos, estabelecidos de acordo com o módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição (ANEEL, 2018). O limite mínimo adotado foi 0,93 pu, enquanto o limiar máximo adotado foi 1,05 pu.

Foram adotadas restrições que se referem à capacidade de entrega de potência ativa e reativa, tanto em relação aos pontos de alimentação quanto ao despacho de geradores.

$$0 < P_i^s < P_{MAX} \quad (5)$$

$$Q_{MIN} < Q_i^s < Q_{MAX} \quad (6)$$

Onde  $P_i^s$  e  $Q_i^s$  indicam, respectivamente, a potência ativa e reativa das unidades geradoras ou entregues pelos pontos de alimentação  $i$  da fase  $s$ .

Foram adotadas, por fim, restrições que estão atreladas às admitâncias dos capacitores, podendo variar de zero, situação na qual o banco não está efetivamente conectado, até um valor máximo.

$$0 < Y_x^s < Y_{MAX} \quad (7)$$

Onde  $Y_x^s$  indica a admitância do banco  $x$  na fase  $s$ .

#### 4. METODOLOGIA

A execução da metodologia se dá por partes. Na primeira etapa, o FPO é resolvido por meio de AG, com as restrições e FOB inicializadas pelo OpenDSS com objetivo de definir a localização dos bancos de capacitores. Na segunda etapa, o valor do banco é recalculado por meio do **Matlab**®, mantida a localização ótima determinada na etapa anterior. O objetivo

dessa segunda etapa de otimização é refinar o valor da capacidade do banco, de forma que se possa encontrar um valor que minimize ainda mais as perdas no sistema, através de um algoritmo clássico de otimização. Trata-se de uma etapa de verificação. Nesse caso, as restrições de topologia são modeladas pelo MICN. A Fig. 1 revela um fluxograma que possibilita a compreensão visual da metodologia proposta neste trabalho.

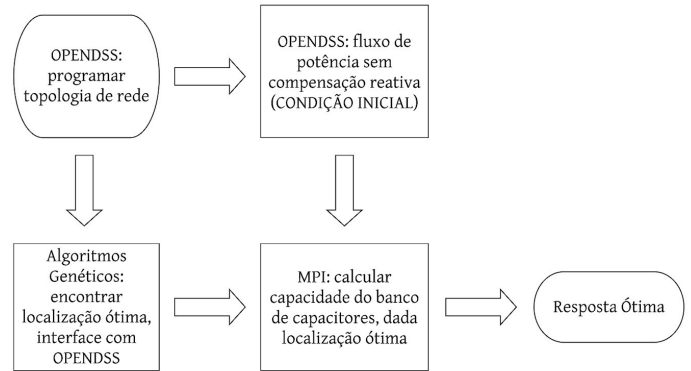


Fig. 1 Fluxograma da metodologia proposta

A primeira etapa do desenvolvimento da metodologia é caracterizada pela utilização do *software* OpenDSS, por meio da interface COM, para que ele possa ser inicializado e operado pelo Matlab. Logo, por meio deste artifício, é realizado primeiramente um fluxo de potência sem a compensação reativa, que servirá de condição inicial para a segunda etapa.

Posteriormente, o próprio FPO é efetivamente resolvido através do AG. Nesse caso, os parâmetros do algoritmo são inicializados na própria programação da topologia, via interface citada. A FOB é o indicador de perdas ativas existente na própria biblioteca do OpenDSS e as restrições de injeção de correntes são respeitadas pela sua própria programação no *script* da topologia.

É importante frisar que, nessa etapa, a modelagem completa do problema é feita por meio das ferramentas internas do OpenDSS, com exceção da otimização genética, que é inicializada e operada por meio da interface com o Matlab.

Posição Ótima	Potência Reativa (Fase A)	Potência Reativa (Fase B)	Potência Reativa (Fase C)
---------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------

Fig. 2 Estrutura do cromossomo para otimização genética.

A estrutura do cromossomo utilizado está mostrada na Fig. 2. O primeiro gene se refere à posição do banco, sendo representada por uma variável discreta, uma vez que indica a barra na qual o capacitor será alocado. Os demais genes se referem à capacidade do banco em kvar, por fase. Foram considerados valores contínuos para tais variáveis.

Sabe-se que os valores de bancos de capacitores assumem valores discretos. Contudo, visando modelar equipamentos baseados em eletrônica de potência, foi proposta a presente

otimização de dois níveis com valores de capacitores (compensação reativa) contínuos.

No que se refere às configurações do AG, foi adotada uma população de 200 cromossomos, um fator de elitismo de 5% da população e uma fração de *crossover* de 0,8.

A segunda etapa engloba a resolução do FPO considerando a localização do banco fixa na posição determinada anteriormente. Para isso, é utilizada a *toolbox* de otimização não-linear do Matlab *fmincon*. O algoritmo escolhido foi o Método dos Pontos Interiores (MPI). O objetivo desse segundo nível é refinar a capacidade do banco, em kvar.

É importante ressaltar que não há acoplamento entre o AG e o MPI. As duas etapas são resolvidas separadamente, sendo a primeira uma alternativa à busca exaustiva da melhor barra a se conectar o capacitor. Nesse sentido, a redução de esforço computacional é observada quando a metodologia sugerida é comparada à abordagem exaustiva, considerando o número de gerações do AG igual a 100 vezes o número de variáveis.

### 5. RESULTADOS

A aplicação da metodologia proposta foi efetuada em três sistemas-teste baseados em topologias disponibilizadas em IEEE (2019). São eles o sistema IEEE 4 barras modificado, o sistema IEEE 13 barras modificado e o sistema IEEE 34 barras modificado. Os sistemas precisaram ser modificados uma vez que componentes como transformadores e reguladores de tensão não foram modelados, ficando esta análise para desenvolvimentos futuros.

É importante destacar que foram estudadas as situações nas quais apenas um banco de capacitores foi alocado no sistema. Foi desenvolvido um único caso em que foram alocados dois bancos, no sistema IEEE 13 barras modificado.

Todos os casos foram simulados por meio de um computador de processador Intel®Core™ i5-7200U, CPU 2,50 GHz com dois núcleos, de memória RAM 8 GB, sendo o tipo de sistema operacional de 64 bits, com processador com base em x64. Os resultados são mostrados nesta seção.

#### 5.1 IEEE 4 Barras Modificado

A Fig. 3 mostra o primeiro sistema trabalhado. Consiste em uma topologia cuja carga total vale 1275 kW, 1800 kW e 2375 kW, respectivamente, nas fases A, B e C. As perdas, no caso base, são iguais a 76,561 kW.

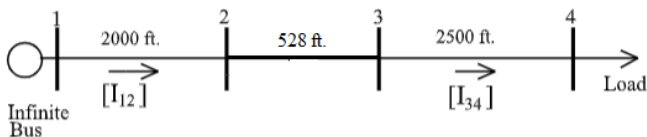


Fig. 3 Topologia IEEE 4 barras modificada.

Nesse caso, foi feita a alocação de um único banco de capacitores trifásico, na barra 4. As potências determinadas foram 656,201 kvar, 1192,258 kvar e 725,044 kvar, respectivamente, nas fases A, B e C da barra em questão.

Com a compensação reativa, as perdas do sistema sob essa nova condição são 61,852 kW, representando uma redução de 19,21%. Outro aspecto que pode ser constatado é a melhora do perfil de tensão, conforme mostrado na Fig. 4.

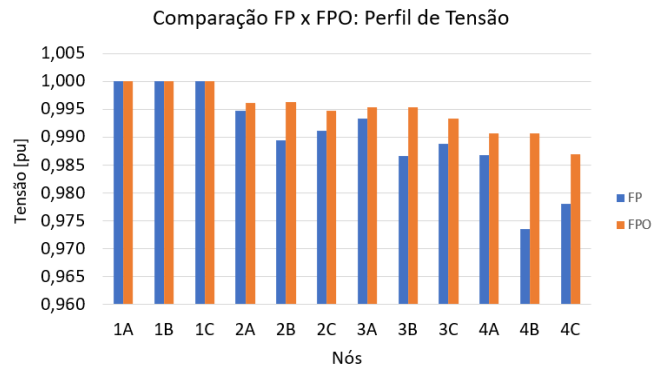


Fig. 4 Aprimoramento do perfil de tensão para topologia IEEE 4 barras modificada.

No gráfico, as barras em azul representam as magnitudes das tensões nodais no caso base, enquanto as barras em laranja representam as magnitudes após a compensação reativa. Sendo assim, é possível verificar de forma visual que o perfil de tensão foi aprimorado após a otimização.

#### 5.2 IEEE 13 Barras Modificado

A Fig. 5 mostra o sistema IEEE 13 barras com as modificações adotadas. Consiste em uma topologia cuja carga total vale 1015 kW, 919 kW e 1132 kW nas fases A, B e C, respectivamente. As perdas, no caso base, são iguais a 102,409 kW.

De forma análoga ao caso anterior, foi feita a alocação de um banco de capacitores trifásico na barra 671. As potências determinadas foram 361,656 kvar, 243,539 kvar e 593,856 kvar, respectivamente, nas fases A, B e C da barra em questão.

A melhora do perfil de tensão pode ser novamente evidenciada no gráfico da figura 6. Por motivos de limitação de espaço, optou-se por colocar os resultados referentes aos nós da fase A.

Após a compensação reativa, as perdas no sistema são iguais a 85,021 kW, representando uma redução de 16,98%.

Foi simulado também o caso em que dois bancos de capacitores foram alocados para essa topologia. O primeiro foi alocado na barra 671, sendo suas capacidades por fase iguais a 281,864 kvar, 113,800 kvar e 509,731 kvar. O segundo banco foi conectado à barra 632. As potências determinadas foram 166,198 kvar, 257,519 kvar e 167,971 kvar, nas fases A, B e C, respectivamente.

Com a compensação reativa de dois bancos, as perdas totais no sistema passaram a ser 84,208 kW, representando uma redução de 17,77%.

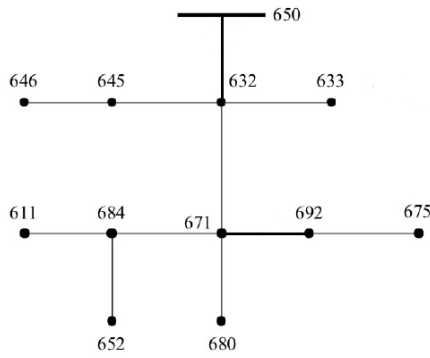


Fig. 5 Topologia IEEE 13 barras modificada.

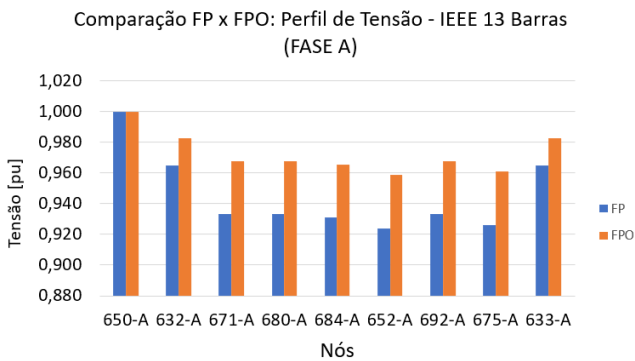


Fig. 6 Aprimoramento do perfil de tensão para topologia IEEE 13 barras modificada (fase A) – alocação de um banco de capacitores.

### 5.3 IEEE 34 Barras Modificado

A Fig. 7 mostra o sistema IEEE 34 barras com as modificações adotadas. Consiste em uma topologia cuja carga total vale 456 kW, 434 kW e 429 kW, respectivamente, nas fases A, B e C. As perdas no caso base são iguais a 129,175 kW.

O procedimento foi repetido, porém considerando uma topologia mais complexa. Foi realizada a alocação de um banco de capacitores. Nesse caso, porém, foi alocado um banco monofásico na barra 820, cuja capacidade vale 106,180 kvar.

Após a compensação reativa, as perdas totais no sistema passaram a ser 111,286 kW, totalizando uma redução percentual de 13,85%. Novamente, foi possível constatar a melhora no perfil de tensão. O menor valor existente, que era 0,874 pu no caso base, passou a ser 0,946 após a otimização.

### 5.5 Comparações entre algoritmos

Para sustentar as conclusões acerca da metodologia sugerida e visando maior compreensão crítica dos modelos adotados, foram estabelecidos quadros comparativos a respeito de três métodos: resolução do FPO através da execução única do AG, resolução do FPO via meio de uma abordagem exaustiva e a metodologia sugerida. As Tabelas 1, 2 e 3 reúnem as informações obtidas. Nelas, os títulos NB, LOC, Q, P,  $V_{MIN}$  e t indicam, respectivamente, número de barras da

topologia, a localização ótima do banco de capacitores, a potência reativa total do banco, as perdas do sistema, o menor valor de tensão determinado e o tempo para o caso convergir.

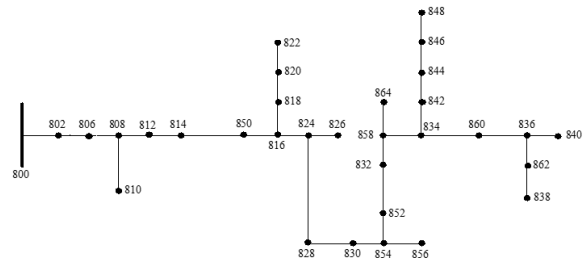


Fig. 7 Topologia IEEE 34 barras modificada.

Tabela 1. Resultados do FPO usando apenas AG

NB	LOC	Q [kvar]	P [kW]	$V_{MIN}$ [pu]	t [s]
4	4	2317,709	62,246	0,987	11
13	692	1141,081	85,086	0,939	14
34	820	95,027	110,866	0,943	18

Tabela 2. Resultados do FPO usando apenas MPI (abordagem exaustiva)

NB	LOC	Q [kvar]	P [kW]	$V_{MIN}$ [pu]	t [s]
4	4	2573,469	61,852	0,987	11
13	692	1199,050	85,021	0,959	111
34	820	106,180	111,286	0,946	861

Tabela 3. Resultados do FPO usando a metodologia sugerida no artigo (AG + MPI)

NB	LOC	Q [kvar]	P [kW]	$V_{MIN}$ [pu]	t [s]
4	4	2573,469	61,852	0,987	22
13	692	1199,050	85,021	0,959	26
34	820	106,180	111,286	0,946	59

Através da análise das tabelas, é possível verificar que a metodologia conseguiu alcançar bons resultados a um tempo computacional aceitável, sendo uma alternativa mais conveniente em relação ao método exaustivo. A segunda etapa de otimização se mostrou eficiente para melhorar os resultados obtidos na primeira etapa, nos casos das topologias de 4 e 13 barras, ou simplesmente para apontar que a solução dada pelo AG foi uma boa aproximação do ótimo local, no caso da topologia de 34 barras.

## 6. CONCLUSÃO

Foi desenvolvida uma ferramenta capaz de resolver um problema de FPO, cuja modelagem de rede é apropriada e

adequada para representar sistemas multifásicos, em consonância com a natureza de SD. O problema de otimização consiste na determinação da localização e da capacidade de banco de capacitores, com o intuito de reduzir perdas elétricas totais. A metodologia engloba a resolução do FPO via AG, em um primeiro estágio de otimização. Posteriormente, o valor do banco é recalculado via MPI, para que um resultado melhor possa ser encontrado. Através da aplicação do método nos sistemas-testes, foi possível observar que resultados bons foram alcançados. Reduções significativas de perdas foram atingidas e o consequente aprimoramento do perfil de tensão foi verificado, de forma que seus valores estão coerentes com os de referência especificados no módulo 8 de qualidade de energia do PRODIST. Portanto, os resultados encontrados atenderam aos propósitos físicos desejados.

Ressalta-se, ainda, que outras abordagens podem ser realizadas, sendo o presente estudo ponto de partida para futuras análises. Nesse aspecto, são citados como trabalhos futuros a modelagem de outros elementos como transformadores e reguladores de tensão, de forma a aproximar a análise de casos reais, além da aplicação da metodologia sugerida em sistemas de grande porte. Ademais, a automação do número de bancos de capacitores também será alvo de pesquisa.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a CNPq, CAPES, FAPEMIG, INERGE e ao PPEE/UFJF.

#### 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., 2018. Optimal Unbalanced Capacitor Placement in Distribution Systems for Voltage Control and Energy Losses Minimization. *Electric Power Systems Research*, Vol. 154, pp. 110-121.
- Araujo, L. R., Penido, D. R. R. & Vieira, F. d. A., 2013. A multiphase optimal power flow algorithm for unbalanced distribution systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, pp. 632-642.
- Araujo, L. R., Penido, D. R. R., S. Carneiro, J. & Pereira, J. L. R., 2013. A Three-Phase Optimal Power-Flow Algorithm to Mitigate Voltage Unbalanced. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 28, No. 4, pp. 2394-2402.
- Cheng, C. S. & Shirmohammadi, D., 1995. A Three-Phase Power Flow Method For Real-Time Distribution System Analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 10, No. 2, pp. 671-679.
- Costa, V. M., Martins, N. & Pereira, J. L. R., 1999. Developments in the Newton Raphson Power Flow Formulation Based on Current Injections. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 14, No. 4, pp. 1320-1326.
- Esmaeilian, H. R. & Fadaeinedjad, R., 2014. Distribution System Efficiency Improvement Using Network Reconfiguration and Capacitor Placement. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, pp. 457-468.
- Garcia, P. A. N., Pereira, J. L. R. & Carneiro, S., 2001. Fluxo de Potência Trifásico por Injeção de Corrente. *Revista Controle & Automação*, Vol. 12, No. 3, pp. 178-187.
- Gholami, R., Shahabi, M. & Haghifam, M.-R., 2015. An efficient optimal capacitor allocation in DG embedded distribution networks with islanding operation capability of micro-grid using a new genetic based algorithm. *International Journal of Power and Energy Systems*, pp. 335-343.
- IEEE, 2019. *IEEE PES AMPS DSAS Test Feeder Working Group* [Online] Available at: <https://site.ieee.org/pes-testfeeders/resources/>
- Li, H., Xiang, M., Jiang, J. & Shen, X., 2017. A Three-phase Unsymmetrical Distribution Power Flow Solution Based on Symmetrical Component Theory. *J. Electrical Systems*, 3(4), pp. 742-751.
- Luo, G. X. & Semlyen, A., 1990. Efficient Load Flow For Large Weakly Meshed Networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 5, No. 4, pp. 1309-1316.
- Mohamed, A. A., Kamel, S. & Aly, M. M., 2017. *A simple analytical technique for optimal capacitor placement in radial distribution systems*. Egypt, s.n., pp. 928-933.
- Monticelli, A. J., 1983. *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*. São Paulo: Editora Edgar Blücher LTDA.
- Penido, D. R. R. et al., 2008. Three-Phase Power Flow Based on Four-Conductor Current Injection Method for Unbalanced Distribution Networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 23, No. 2, pp. 494-503.
- Penido, D. R. R., Araujo, L. R., Pereira, J. L. R. & Carneiro Jr, S., 2010. Metodologia para Análise de Sistemas Elétricos a N Condutores Pelo Método de Injeção de Correntes. *Revista Controle & Automação*, pp. 308-321.