

Reconfiguração de Sistemas de Distribuição Trifásicos Desequilibrados com Demanda Variável por meio de uma Técnica Meta-heurística Bioinspirada

Cassio Gerez*, Edmarcio A. Belati**, Eduardo C. M. Costa*, Alfeu J. Sguarezi Filho**

*Escola Politécnica, Universidade de São Paulo – EPUSP

São Paulo, Brasil (emails: cassio.gerez@usp.br; educosta@usp.br)

** Universidade Federal do ABC

Santo André, Brasil (emails: edmarcio.belati@ufabc.edu.br; alfeu.sguarezi@ufabc.edu.br).

Abstract: This paper presents a study on the unbalanced three-phase distribution network reconfiguration (DNR) with variable load, using a bioinspired metaheuristic technique for mitigation of electrical power losses. Several researches approach the DNR problem in balanced three-phase systems, which does not completely represent the operational characteristics and particularities of a real distribution grid. Furthermore, most DNR researches considers the loading only into a limited normal range, i.e., without concerns to the seasonal demand behavior. In these terms, DNR represents a combinatory and probabilistic problem that can be solved through metaheuristic optimization techniques. It is also important to highlight that modeling of unbalanced three-phase distribution grids requires an adequate method to calculate the load flow. Given this context, a bioinspired metaheuristic (Firefly Algorithm) is applied to solve the DNR problem alongside with the load flow results obtained from the OpenDSS.

Resumo: Este artigo apresenta um estudo sobre reconfiguração de sistemas de distribuição (RSD) trifásicos desequilibrados com demanda variável, fazendo uso de uma técnica meta-heurística bioinspirada para minimização das perdas. Diversas pesquisas abordam o problema da RSD equilibrados, não refletindo completamente as características e particularidades de uma rede de distribuição real. Ademais, a maioria das pesquisas sobre RSD abordam o carregamento apenas dentro de uma faixa restrita de operação normal, ou seja, sem considerar a variação sazonal da demanda. Nesses termos, a RSD trata-se de um problema com características combinatórias e probabilísticas, representando um campo amplo para utilização de técnicas de otimização meta-heurísticas. Vale ressaltar também, que a modelagem da rede de distribuição trifásica desequilibrada e com as demais peculiaridades, requer a escolha adequada do método de cálculo do fluxo de potência. Dado o contexto, propõe-se a solução do problema de RSD por meio de uma meta-heurística bioinspirada (Firefly Algorithm) de fácil implementação e a partir de resultados de fluxo de carga obtidos via OpenDSS.

Keywords: Distribution Network Reconfiguration, Unbalanced Three-Phase Systems, Bioinspired Metaheuristic, Variable Demand, OpenDSS.

Palavras chaves: Reconfiguração de Sistemas de Distribuição, Redes Trifásicas Desequilibradas, Meta-heurísticas Bioinspiradas, Demanda Variável, OpenDSS.

1. INTRODUÇÃO

A distribuição é o terço final e, atualmente, o mais complexo no fornecimento de energia elétrica. A partir de uma visão ampla de Sistemas Elétricos de Potência (SEP), a distribuição de energia elétrica pode ser dividida em primária e secundária, cada uma com suas peculiaridades em termos operacionais e de arquitetura. Dentre essas características, vale destacar a presença de cargas desequilibradas, trechos com diferentes números de fases, parâmetros mútuos entre fases, trechos subterrâneos, disposição de equipamentos ao longo dos sistemas, operação majoritariamente radial (distribuição primária) e variação da demanda ao longo do tempo. Com a inserção de diferentes elementos de geração distribuída (GD) e a introdução do conceito de redes inteligentes (*smart grids*), a distribuição de energia elétrica tornou-se definitivamente a frente de pesquisa mais explorada em SEP.

As características operacionais e de arquitetura das redes de distribuição primária e secundária têm influência direta nos índices operativos (e.g. níveis de tensão nas barras, perdas nas linhas, equilíbrio entre fases) e no horizonte de planejamento (expansão da rede e custos). A manutenção de tais índices pode ser alcançada em função do monitoramento e conjunto de estratégias adotadas na distribuição. Uma das alternativas é a reconfiguração dos sistemas de distribuição (RSD), visando alteração da topologia da rede de distribuição através da abertura e fechamento de chaves de manobra para atender um ou mais índices de desempenho. A melhor solução para o problema da RSD, dada sua natureza altamente combinatória, pode ser obtida por meio de técnicas meta-heurísticas.

Convencionalmente, na maioria dos estudos sobre RSD, os sistemas, por serem trifásicos equilibrados, são representados por uma aproximação monofásica e com demanda constante, assumindo os valores nominais da rede. Essa abordagem é

adotada desde o início dos anos 1970, quando algumas técnicas determinísticas e heurísticas foram propostas para a resolução de problemas de RSD (Merlin & Back, 1975). Desde então, uma grande quantidade de pesquisas foi desenvolvida levando-se em conta sistemas de distribuição equilibrados e estáticos do ponto de vista da demanda e carregamento (Chang & Kuo, 1994; Jin, Zhao, & Sun, 2005; Kim, Ko, & Jung, 1993; Nara, Shiose, Kitagawa, & Ishihara, 1992). Muitas dessas pesquisas foram desenvolvidas a partir de métodos meta-heurísticos. Atualmente, a maior parte das metodologias de solução para RSD continuam sendo desenvolvidas em redes trifásicas equilibradas e com carregamento invariável em função do tempo, porém, utilizando meta-heurísticas bioinspiradas (Flaih, Xiangning, Dawoud, & Mohammed, 2016; Nguyen & Truong, 2015; Pegado, Ñaupari, Molina, & Castillo, 2019). Apenas alguns trabalhos recentes consideram o sistema equilibrado com a demanda variável com o tempo (Possagnolo, 2015).

Verifica-se então, um menor volume de trabalhos desenvolvidos a partir de redes trifásicas e desequilibradas, em comparação aos com a representação trifásica e equilibrada. Os primeiros artigos considerando sistemas trifásicos desequilibrados, foram publicados a partir do início da década de 90 (Abur, 1996; Borozan, 1997; Zimmerman, 1992). Alguns trabalhos foram publicados nas décadas seguintes, considerando, em sua maioria, o carregamento constante em função do tempo (Ding & Loparo, 2016; Kaur & Ghosh, 2016; Swarnkar, Gupta, & Niazi, 2011).

Nesse contexto, propõe-se a representação do problema de RSD em uma forma mais completa, visando refletir as reais características das redes em análise. A modelagem é desenvolvida considerando-se redes trifásicas desequilibradas e demanda variável com o tempo. A técnica meta-heurística bioinspirada proposta é de fácil implementação, sendo baseada no comportamento dos vaga-lumes. Em conjunto, para análise das topologias e determinação das perdas, utilizam-se os resultados de fluxo de carga gerados via OpenDSS. Os testes foram realizados em sistemas de 19 e 25 nós disponíveis na literatura.

2. MODELO MATEMÁTICO DO PROBLEMA DE RSD

O problema de RSD foi modelado como um problema de minimização considerando dois casos distintos: a minimização das perdas totais (demanda fixa) e os custos das perdas totais em um horizonte diário (demanda variável), ambos para sistemas trifásicos desequilibrados. Os casos são representados respectivamente pelas equações (1) e (2). As restrições apresentadas consideram apenas a demanda variável. Nos casos onde a demanda é fixa, as restrições são as mesmas, porém considerando apenas um nível de demanda. O modelo é baseado no visto em (Possagnolo, 2015)

$$\text{Min} \rightarrow \sum_{ij \in \Omega_{i,f}} [g_{ij,f} x_{ij} (V_{i,f}^2 + V_{j,f}^2 - 2V_{i,f}V_{j,f} \cos \theta_{ij,f})] \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{Min} \\ \rightarrow \sum_{d \in \Omega_d} \sum_{ij \in \Omega_{i,f}} [c_d^{ls} \Delta_d [g_{ij,f} x_{ij} (V_{i,d,f}^2 + V_{j,d,f}^2 \\ - 2V_{i,d,f}V_{j,d,f} \cos \theta_{ij,d,f})] \end{aligned} \quad (2)$$

s.a.:

$$P_{i,d,f}^S - P_{i,d,f}^D - \sum_{j \in \Omega_{b_i,f}} x_{ij} P_{ij,d,f} = 0 \quad (3)$$

$$Q_{i,d,f}^S - Q_{i,d,f}^D - \sum_{j \in \Omega_{b_i,f}} x_{ij} Q_{ij,d,f} = 0 \quad (4)$$

$$V_{min} \leq V_{i,d,f} \leq V_{max} \quad (5)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad (6)$$

$$\sum_{ij \in \Omega_i} x_{ij} = n_b - 1 \quad (7)$$

$$\det(Inc) = 1 \text{ ou } -1 \quad (8)$$

$$I_{r_{ij,d,f}}^2 + I_{m_{ij,d,f}}^2 \leq x_{ij} \bar{I}_{ij,f}^2 \quad (9)$$

Sendo:

$g_{ij,f}$: condutância do ramo ij na fase f ; Ω_i : conjunto de ramos; x_{ij} : estado da chave (aberto=0 fechado=1); $V_{i,f}$: tensão no nó i na fase f ; $V_{j,f}$: tensão no nó j na fase f ; $\theta_{ij,f}$: diferença angular entre a tensão nos nós i, j na fase f ; Ω_d : conjunto de níveis de demanda d ; c_d^{ls} : custo das perdas no nível de demanda d ; Δ_d : período de duração do nível de demanda d ; $V_{i,d,f}$: tensão no nó i no nível de demanda d e na fase f ; $V_{j,d,f}$: tensão no nó j no nível de demanda d e na fase f ; $\theta_{ij,d,f}$: diferença angular entre a tensão nos nós ij no nível de demanda d e na fase f ; Ω_{b_i} : conjunto de nós conectados ao nó i ; $P_{i,d,f}^S$: potência ativa fornecida pela subestação no nó i , no nível de demanda d e na fase f ; $P_{i,d,f}^D$: demanda de potência ativa no nó i , no nível de demanda d e na fase f ; $P_{ij,d,f}$: fluxo de potência ativa no ramo ij , no nível de demanda d e na fase f ; $Q_{i,d,f}^S$: potência reativa fornecida pela subestação no nó i , no nível de demanda d e na fase f ; $Q_{i,d,f}^D$: demanda de potência reativa no nó i , no nível de demanda d e na fase f ; $Q_{ij,d,f}$: fluxo de potência reativa no ramo ij , no nível de demanda d e na fase f ; V_{min} : limite de tensão inferior; V_{max} : limite de tensão superior; n_b : número de nós existentes no sistema em estudo; Inc : matriz de incidências do sistema; $I_{r_{ij,d,f}}$: parcela real do fluxo de corrente no ramo ij , no nível de demanda d e na fase f ; $I_{m_{ij,d,f}}$: parcela imaginária do fluxo de corrente no ramo ij , no nível de demanda d e na fase f ; $I_{ij,f}$: fluxo máximo de corrente no ramo ij na fase f .

As restrições (3) a (9) elencadas, representam respectivamente o balanço de potências ativa e reativa (3) e (4), os limites máximo e mínimo de tensão que devem ser atendidos conforme órgãos reguladores (5), a condição das chaves (6) (abertas 0 ou fechadas 1), o número de chaves que devem compor o sistema após a RSD para mantê-lo radial (7). A restrição (8) relaciona-se também com a radialidade, onde a matriz de incidência deve ter seu determinante igual a 1 ou -1 para garanti-la (Abdelaziz, Mohammed, Mekhamer, & Badr, 2009). A restrição de capacidade de condução de corrente (9), normalmente é desconsiderada em trabalhos de RSD para redução de perdas, pois as correntes nos condutores tendem a diminuir juntamente com as perdas (Possagnolo, 2015). Outra característica, a capacidade das subestações, também é desconsiderada no problema de RSD (redução de perdas), possibilitando a interconexão de subestações formando apenas um nó (Possagnolo, 2015).

O cálculo do fluxo de potência foi realizado através do software *open source* OpenDSS, que é uma alternativa viável

devido a sua facilidade de utilização e robustez no tratamento de sistemas trifásicos desequilibrados e de portes variados.

Por fim, é necessário definir qual será a metodologia aplicada na resolução do problema de RSD. No presente trabalho foi escolhida uma meta-heurística baseada no comportamento dos vaga-lumes, ou, *firefly algorithm* (FA), devido à facilidade de implementação e ao uso cada vez maior de meta-heurísticas bioinspiradas na solução de problemas de engenharia elétrica.

3. META-HEURÍSTICA DO VAGA-LUME

O FA foi desenvolvido por (Yang, 2010), inspirado na avaliação sócio comportamental de vaga-lumes. Três características são inferidas da observação do fenômeno: o gênero do inseto não influi na atratividade; proporcionalidade entre brilho e atratividade (atração de insetos em direção ao mais brilhante) / aleatoriedade de movimento (quando a comparação entre maior e menor inexistente); função objetivo determina o brilho.

Além dessas características, existem dois parâmetros de suma importância: a atratividade β e a variação da intensidade luminosa I . A equação (10) expressa a proporcionalidade de I ao inverso do quadrado da distância r , onde I_0 é a intensidade luminosa na fonte. Considerando o meio onde os insetos estão inseridos, I é expressa por (11), onde γ é o coeficiente de absorção do meio.

$$I(r) = I_0/r^2 \quad (10)$$

$$I(r) = I_0 e^{-\gamma r^2} \quad (11)$$

Como β é proporcional ao brilho (intensidade luminosa), pode ser determinada por (12) em função de γ , r e β_0 (atratividade na fonte).

$$\beta(r) = \beta_0 \cdot e^{-\gamma r^2} \quad (12)$$

A distância r pode ser expressa por (13), onde é calculada através do módulo da diferença de posicionamento entre dois vaga-lumes i e j no espaço em que se encontram dispostos, até a d -ésima coordenada espacial.

$$r_{i,j} = \|x_i - x_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^d (x_{i,k} - x_{j,k})^2} \quad (13)$$

A equação geral do movimento e posicionamento dos vaga-lumes é definida (14), correlacionando o posicionamento atual das partículas com sua atratividade e, assim, definindo a nova posição de cada uma.

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (x_j^t - x_i^t) + \alpha \left(rand - \frac{1}{2} \right) \quad (14)$$

A equação (14) divide-se basicamente em três parcelas: x_i^t representa a atual posição da partícula, $\beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (x_j^t - x_i^t)$ a atratividade de duas partículas entre si e $\alpha \left(rand - \frac{1}{2} \right)$ o movimento aleatório, onde $\alpha \in [0,1]$ e $rand - \frac{1}{2}$ gera valores aleatórios no intervalo 0 e 1.

Para o problema de RSD formulado, uma modificação se faz necessária para possibilitar a compressão dos valores de posicionamento definidos por (14), em uma faixa de valores seletivos e discretos d_n . No caso em estudo, cada vaga-lume representará uma solução que atenda a função objetivo, e cada coordenada indica a abertura de uma chave. Para isso, foi adotada uma aproximação similar a apresentada em (Khalil & Gorpinich, 2012), com essa conversão feita em função da equação (15) e da relação (16).

$$\sigma(x_i^{t+1}) = d_n \frac{1}{1 + e^{-(x_i^{t+1})}} \quad (15)$$

$$x_i^{t+1} \begin{cases} S_{d1} \text{ se } \sigma(x_i^{t+1}) < 1 \\ \dots \\ S_{dn} \text{ se } \sigma(x_i^{t+1}) < d_n \end{cases} \quad (16)$$

Ao levar-se em consideração que d_n representa o número de colunas de um vetor determinado como $S = [S_{d1}, \dots, S_{dn}]$, a relação (16) indica, em função do valor obtido em (15), qual será o valor escolhido no vetor apresentado.

Variações da equação (15) existem e podem ser utilizadas para melhor se adequar a alguns casos, alterando o contorno da função. Isso é realizado alterando-se o expoente de seu denominador. Aqui, todos os casos utilizaram o expoente $-2x_i^{t+1}$.

4. IMPLEMENTAÇÃO DO FA AO PROBLEMA DE RSD

A proposta apresentada no presente artigo foi implementada na linguagem Python em conjunto com o OpenDSS, utilizado para determinação do fluxo de potência. A estruturação e os passos necessários para que o algoritmo seja aplicado ao problema de RSD são apresentados a seguir.

4.1 Considerações básicas

Para determinar e solucionar o problema de RSD, inicialmente deve-se estabelecer o conjunto de chaves candidatas, ou seja, o espaço de busca do problema. Essa característica pode ser extraída de uma análise das malhas formadas nos sistemas em estudo. As malhas indicam quais chaves serão passíveis de abertura, ao considerar que cada ramo possui uma chave que permite a mudança da topologia do sistema, sempre respeitando as restrições impostas na seção 2. A formação detalhada dessas malhas pode ser encontrada em (Nguyen, Truong, & Phung, 2016).

Através dessa análise, um sistema simples e equilibrado de 5 nós e 7 linhas (Pereira, 2010), ilustrado na Figura 1., apresenta um conjunto de 3 malhas, compostas por 3 ramos com 1 chave cada (linhas pontilhadas indicam chaves normalmente abertas - NA), totalizando 9 chaves candidatas. Essas chaves passam então a compor vetores que indicam as opções de chaveamento possíveis. O número de vetores será igual a quantidade de malhas formadas, no caso, 3. Esse valor, também equivale ao total de chaves que devem ser abertas para que o sistema se mantenha radial, atendendo às restrições apresentadas.

$$\begin{aligned} Vec_1 &= [1 \ 2 \ 3] \\ Vec_2 &= [3 \ 4 \ 5] \\ Vec_3 &= [5 \ 6 \ 7] \end{aligned}$$

Como os sistemas estudados são trifásicos desequilibrados, foi considerado que nos trechos trifásicos as chaves serão abertas em conjunto nas 3 fases, não havendo possibilidade de que uma fase no trecho permaneça desconectada e outra conectada. Além disso, as cargas são consideradas concentradas em cada uma das fases.

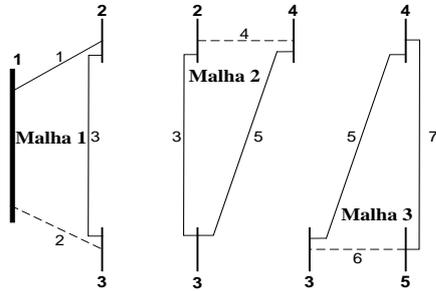


Figura 1. Malhas Formadas Sistema de 5 nós e 7 ramos.

4.2 FA aplicado à RSD

Para aplicação do FA à RSD, é necessária uma analogia do brilho dos insetos com a função objetivo a ser minimizada. No caso em estudo, as perdas (demanda fixa) e os custos de perda (demanda variável), seriam correlacionadas ao brilho, aproximando assim, cada partícula das que apresentam menores valores de perdas e custos, ou seja, maior brilho. A Figura 2 traz o fluxograma do algoritmo implementado em Python nomeado de FA-DNR3.

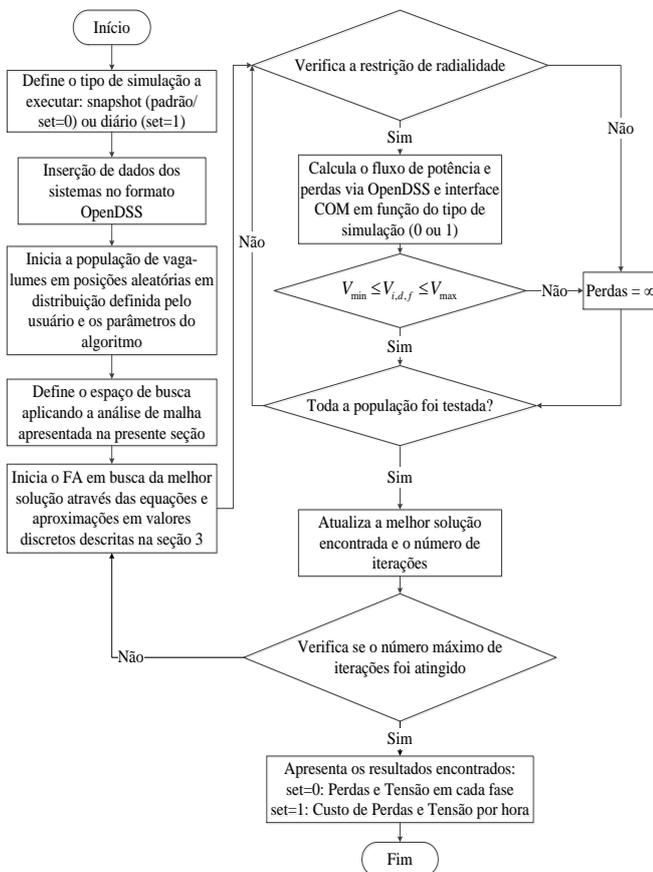


Figura 2. Fluxograma FA-DNR3.

Os passos do algoritmo desenvolvido são descritos como: **Passo 1:** Todos os dados do sistema estudado são inseridos no OpenDSS (tensão de base, características das linhas, carregamentos, níveis de demanda, etc.); **Passo 2:** Inserção dos parâmetros do FA: α, β, γ , número de partículas e de iterações (critério de parada). Distribuem-se as partículas aleatoriamente no espaço através de uma distribuição normal de valores contínuos em uma faixa pré-estabelecida. Definem-se também: o número de chaves que devem ser abertas para o sistema permanecer radial, conforme restrições descritas na seção 2, e, o espaço de busca, composto pelos vetores estabelecidos através da análise de malhas descrita na seção 4.1.; **Passo 3:** Início da execução do FA, aproximando as partículas (maiores perdas/custos em direção a menores perdas/custos). O processo de aproximação é realizado inicialmente com valores contínuos de posicionamento que, posteriormente, são comprimidos e correlacionados com as chaves apresentadas nos vetores formados através das equações (15) e (16) da seção 3. Cada coordenada de posicionamento é representada por uma chave de cada um dos vetores e, cada partícula, uma solução; **Passo 4:** Execução do fluxo de potência e verificação das restrições na nova configuração. Armazenamento dos valores da função objetivo para posterior aproximação entre as partículas; **Passo 5:** Verificar se toda a população foi testada, caso não, voltar para o Passo 4. Se positivo, verificar se todas as iterações foram realizadas. Em caso negativo, voltar ao Passo 2, em caso afirmativo finalizar o algoritmo e apresentar os resultados.

5. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Os testes foram realizados em dois sistemas trifásicos desequilibrados conhecidos da literatura, um de 19 nós e outro de 25 nós. Para cada um, 100 simulações foram efetuadas. Todos os dados dos sistemas encontram-se em (Subrahmanyam & Radhakrishna, 2010). Além disso, foram consideradas demanda fixa e variável (24 horas). As características da variação da demanda foram retiradas de (Possagnolo, 2015).

Os parâmetros fixos α, β e γ foram considerados respectivamente como 0,9, 1 e 1, sendo α e γ definidos empiricamente e β adotado segundo o descrito em (Yang, 2010). Já a população e o número de iterações (definidos empiricamente) são respectivamente dados como 4 e 8 vezes o número de chaves à serem abertas. Todas as simulações foram executadas em notebook com processador i7.

5.1 Sistema de 19 nós e 20 linhas

O sistema desequilibrado de 19 nós e 20 linhas possui apenas um nível de tensão ao longo de sua configuração (11 kV) e apresenta desequilíbrio de cargas entre fases. Os resultados determinados através da RSD para o FA-DNR3 se encontram na Tabela 1, indicando a posição inicial, a melhor posição, as perdas e custos totais iniciais e finais para a melhor execução, médio para 100 execuções e totais iniciais e finais por fase. Na Figura 3 são apresentados os níveis de tensão (configuração inicial/final) em cada um dos nós e fases (demanda fixa) e, na Figura 4, por hora (demanda variável). Para a demanda

variável, as cargas foram definidas da seguinte forma em cada nó: residencial (2-4,7-9,10,15-16), comercial (5-6,12-13,17) e industrial (1,11,14,18), conforme premissas estabelecidas em (Possagnolo, 2015).

Tabela 1. Resultados Sistema 19 nós.

Demanda Fixa	Perdas Totais (kW)		Chaves Abertas		Redução (%)	Perdas Médias (kW)	Convergência para o melhor (%)
	Inicial	Final	Inicial	Final	Final	Final	Final
	13,21	8,06	19-20	10-11	38,98	8,40	68
Demanda Variável	Perdas Iniciais e Finais Totais Fase A (kW)		Perdas Iniciais e Finais Totais Fase B (kW)		Perdas Iniciais e Finais Totais Fase C (kW)		
	4,37 / 2,78		4,37 / 2,48		4,48 / 2,80		
Demanda Variável	Custo Total (US\$)		Chaves Abertas		Redução (%)	Custo Médio (US\$)	Convergência para o melhor (%)
	Inicial	Final	Inicial	Final	Final	Final	Final
	11,23	7,02	19-20	13-11	37,49	7,18	88
Demanda Variável	Custo Inicial e Final Total 24h Fase A (US\$)		Custo Inicial e Final Total 24h Fase B (US\$)		Custo Inicial e Final Total 24h Fase C (US\$)		
	3,69 / 2,40		3,69 / 2,14		3,85 / 2,48		

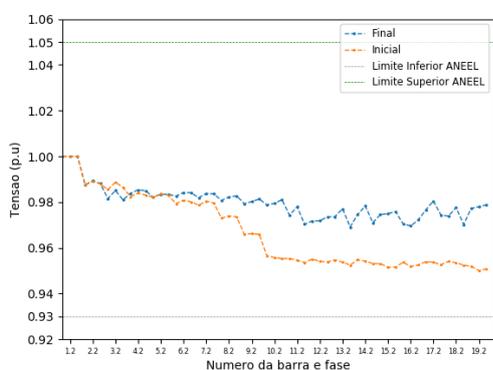


Figura 3. Níveis de tensão sistema de 19 nós (Fixa)

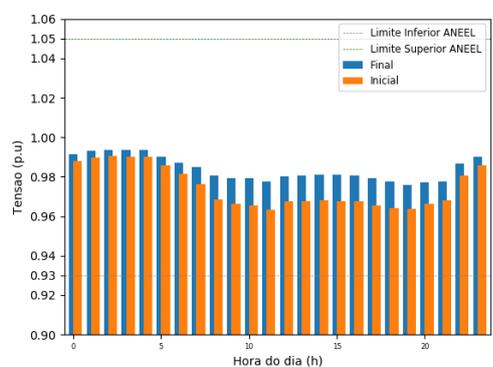


Figura 4. Tensões mínimas sistema de 19 nós (Variável)

É possível verificar pela análise da Tabela 1 e das Figuras 3 e 4, que houve uma melhora nos níveis de perdas (demanda fixa/redução 38,98 %), custos (demanda variável/redução 37,49 %) e tensões mínimas (configuração final/0,969 p.u. na demanda fixa e 0,976 p.u. na variável), respeitando a (ANEEL, 2009). Também, nota-se a diferença entre a abertura de chaves de uma demanda para a outra, 10-11 na fixa e 13-11 na variável. Os resultados para demanda fixa vão ao encontro a (Subrahmanyam & Radhakrishna, 2010). Para a demanda variável, não há parâmetro de comparação. O tempo computacional médio é de 0,39 segundos para o FA-DNR3 na demanda fixa. Para a demanda variável, o tempo computacional médio é de 8,79 segundos.

5.2 Sistema de 25 nós e 27 linhas

O sistema de 25 nós e 27 linhas apresenta um nível de tensão (4,16 kV) ao longo de sua topologia. Também apresenta um desequilíbrio das cargas entre as fases e diferentes tipos de condutores em sua estrutura. Os resultados determinados através do FA-DNR3 se encontram na Tabela 2, indicando a posição inicial, a melhor posição, as perdas e custos totais iniciais e finais para a melhor execução, médios para 100 execuções e totais iniciais e finais por fase. Na Figura 5 são apresentados os níveis de tensão (configuração inicial/final) em cada uma das fases (demanda fixa) e, na Figura 6, por hora (demanda variável). Para a demanda variável, as cargas foram definidas conforme o seguinte em cada nó: residencial (1,5,7,9-11,16-18,21,23,25), comercial (15,20,22,24) e industrial (3-4,6,8,12-13,19) conforme premissas estabelecidas em (Possagnolo, 2015).

Tabela 2. Resultados Sistema 25 nós.

Demanda Fixa	Perdas Totais (kW)		Chaves Abertas		Redução (%)	Perdas Médias (kW)	Convergência para o melhor (%)
	Inicial	Final	Inicial	Final	Final	Final	Final
	150,69	133,96	25-26-27	22-15-17	10,79	136,23	52
Demanda Variável	Perdas Iniciais e Finais Totais Fase A (kW)		Perdas Iniciais e Finais Totais Fase B (kW)		Perdas Iniciais e Finais Totais Fase C (kW)		
	53,01 / 47,7		55,65 / 49,63		42,02 / 36,63		
Demanda Variável	Custo Total (US\$)		Chaves Abertas		Redução (%)	Custo Médio (US\$)	Convergência para o melhor (%)
	Inicial	Final	Inicial	Final	Final	Final	Final
	131,58	117,51	25-26-27	22-15-17	10,71	119,56	44
Demanda Variável	Custo Inicial e Final Total 24h Fase A (US\$)		Custo Inicial e Final Total 24h Fase B (US\$)		Custo Inicial e Final Total 24h Fase C (US\$)		
	45,96 / 41,5		48,82 / 43,79		36,80 / 32,22		

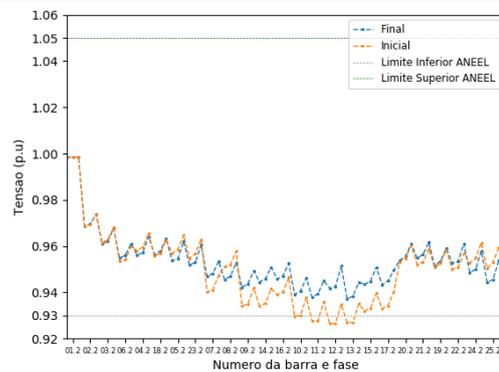


Figura 5. Níveis de tensão do sistema de 25 nós (Fixa)

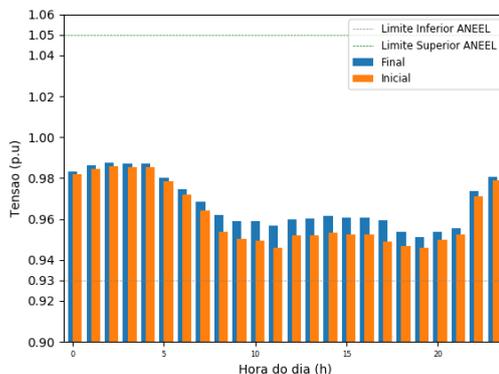


Figura 6. Tensões mínimas sistema de 25 nós (Variável)

Novamente, verifica-se a melhora nos níveis de perdas (redução 10,79 %), custos (redução 10,71 %) e tensões mínimas (configuração final/0,937 p.u. na demanda fixa e 0,951 p.u. na variável). As soluções vão ao encontro a (Subrahmanyam & Radhakrishna, 2010) no caso da demanda fixa. O tempo computacional médio para demanda fixa é de 1,30 segundos e para demanda variável, 30,1 segundos.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho possibilitou o estudo da RSD em sistemas trifásicos desequilibrados com demanda fixa e variável. Essa abordagem é diferente à comumente aplicada ao problema e mais próxima das características reais dos sistemas.

O uso da meta-heurística bioinspirada FA em conjunto com o OpenDSS, possibilitou bons resultados em um tempo computacional aceitável. Ainda, foram ao encontro aos resultados da literatura nos casos passíveis de comparação.

Esse tratamento permite a expansão do estudo para sistemas maiores e na presença de diversos equipamentos. Além disso, recentes implementações nestes sistemas podem ser consideradas, como, unidades de GD e *smart-grids*, visando, cada vez mais, aproximar-se dos casos existentes na realidade.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico-CNPq (142049/2018-2).

REFERÊNCIAS

- Abdelaziz, A. Y., Mohammed, F. M., Mekhamer, S. F., & Badr, M. A. L. (2009). Distribution Systems Reconfiguration using a modified particle swarm optimization algorithm. *Electric Power Systems Research*, 79(11), 1521–1530. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2009.05.004>
- Abur, A. (1996). A modified linear programming method for distribution system reconfiguration. *International Journal Electr. Power Energy Systems*, 18(7), 469–474.
- ANEEL. AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica.*, (2009).
- Borozan, V. (1997). Minimum loss reconfiguration of unbalanced distribution networks. *IEEE Power Engineering Review*, 17(1), 64. <https://doi.org/10.1109/MPER.1997.560711>
- Chang, H.-C., & Kuo, C.-C. (1994). Network reconfiguration in distribution systems using simulated annealing. *Electric Power Systems Research*, 29(3), 227–238. [https://doi.org/10.1016/0378-7796\(94\)90018-3](https://doi.org/10.1016/0378-7796(94)90018-3)
- Ding, F., & Loparo, K. A. (2016). Feeder Reconfiguration for Unbalanced Distribution Systems with Distributed Generation: A Hierarchical Decentralized Approach. *IEEE Transactions on Power Systems*, 31(2), 1633–1642. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2015.2430275>
- Flaih, F. M. F., Xiangning, L., Dawoud, S. M., & Mohammed, M. A. (2016). Distribution System Reconfiguration for Power Loss Minimization and Voltage Profile Improvement Using Modified Particle Swarm Optimization. *2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Conference*, 120–124. Xi'an, China.
- Jin, X., Zhao, J., & Sun, Y. (2005). Distribution network reconfiguration for load balancing using binary particle swarm optimization. *International Conference on Power System Technology*.
- Kaur, M., & Ghosh, S. (2016). Network reconfiguration of unbalanced distribution networks using fuzzy-firefly algorithm. *Applied Soft Computing Journal*, 49, 868–886. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.09.019>
- Khalil, T. M., & Gorpinich, A. V. (2012). Selective Particle Swarm Optimization. *International Journal of Multidisciplinary Sciences and Engineering*, 3(4), 2–5.
- Kim, H., Ko, Y., & Jung, K. H. (1993). Artificial neural-network based feeder reconfiguration for loss reduction in distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 8(3), 1356–1366. <https://doi.org/10.1109/61.252662>
- Merlin, A., & Back, H. (1975). *Search for a Minimal-Loss Operating Spanning Tree Configuration in an Urban Power Distribution System*. Proceedings 5th Power System Computation Conference (PSCC).
- Nara, K., Shiose, A., Kitagawa, M., & Ishihara, T. (1992). Implementation of Genetic Algorithm for Distribution Systems Loss Minimum Re-Configuration. *IEEE Transactions on Power Systems*, 7(3), 1044–1051. <https://doi.org/10.1109/59.207317>
- Nguyen, T. T., & Truong, A. V. (2015). Distribution network reconfiguration for power loss minimization and voltage profile improvement using cuckoo search algorithm. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 68, 233–242. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.12.075>
- Nguyen, T. T., Truong, A. V., & Phung, T. A. (2016). A novel method based on adaptive cuckoo search for optimal network reconfiguration and distributed generation allocation in distribution network. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 78, 801–815. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.12.030>
- Pegado, R., Ñaupari, Z., Molina, Y., & Castillo, C. (2019). Radial distribution network reconfiguration for power losses reduction based on improved selective BPSO. *Electric Power Systems Research*, 169(January), 206–213. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.12.030>
- Pereira, F. S. (2010). *Reconfiguração ótima de sistemas de distribuição de energia elétrica baseado no comportamento de colônias de formigas* (Tese de Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo - USP, São Carlos - SP.
- Possagnolo, L. H. F. M. (2015). *Reconfiguração de sistemas de distribuição operando em vários níveis de demanda através de uma meta-heurística de busca em vizinhança variável*. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - UNESP, Ilha Solteira - SP, Brasil.
- Subrahmanyam, J. B. V., & Radhakrishna, C. (2010). A simple method for feeder reconfiguration of balanced and unbalanced distribution systems for loss minimization. *Electric Power Components and Systems*, 38(1), 72–84. <https://doi.org/10.1080/15325000903273270>
- Swarnkar, A., Gupta, N., & Niazi, K. R. (2011). Adapted ant colony optimization for efficient reconfiguration of balanced and unbalanced distribution systems for loss minimization. *Swarm and Evolutionary Computation*, 1(3), 129–137. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2011.05.004>
- Yang, X.-S. (2010). *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms* (Second Edi). United Kingdom: Luniver Press.
- Zimmerman, R. D. (1992). *Network Reconfiguration for Loss Reduction in Three-Phase Power Distribution Systems*. Cornell University.