

APLICAÇÃO DA META-HEURÍSTICA DO VAGA-LUME AO PROBLEMA DE RECONFIGURAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DE UM ESPAÇO DE BUSCA REDUZIDO.

CASSIO GEREZ¹, EDMARCIO A. BELATI², RICARDO C. SANTOS²

¹Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas, Universidade de São Paulo, Avenida Prof. Luciano Gualberto, Travessa 3, 158 – Butantã, São Paulo – SP, 05508-010.

²Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas, Universidade Federal do ABC, Avenida dos Estados, 5001 – Bangú, Santo André-SP, 09210-580.

E-mails: cassio.gerez@usp.br, edmarcio.belati@ufabc.edu.br, ricardo.santos@ufabc.edu.br

Abstract— The paper here presented deals with the distribution network reconfiguration (DNR) problem aiming to reduce active losses. Due to the problem complexity, the use of computational techniques to solve the problem is needed. In this paper is proposed an alternative to solve the DNR problem based on the fireflies behavior, and in its social and environmental interaction. To adequate it to the DNR problem, modifications were performed on its structure, using a sigmoid function to discretize the switches positions into open (zero) and closed (one). Also, a sensitivity criterion was used to diminish the set of maneuverable switches to increase the algorithm accuracy. To validate and consolidate the technique, simulations were performed on 5, 33 and 70 bus systems. The results were analyzed and compared with the ones presented on the specialized literature.

Keywords— Distribution Network Reconfiguration, Optimization, Firefly Algorithm, Metaheuristics, Active Losses.

Resumo— O presente artigo trata do problema da reconfiguração de redes de distribuição (RRD) objetivando a redução das perdas ativas. Devido à complexidade do problema, é necessário o uso de técnicas computacionais para obter a solução. Neste artigo é proposta uma alternativa para solução do problema de RRD baseada no comportamento dos vaga-lumes, e sua interação com o meio e com os seus semelhantes. A fim de adequá-la ao problema de RRD, modificações foram realizadas em sua estrutura, utilizando-se de uma função sigmoide para discretizar as posições das chaves em abertas (zero) ou fechadas (um). Também foi utilizado um critério de sensibilidade para diminuir o conjunto de chaves manobráveis, a fim de aumentar a eficiência do algoritmo. De forma a validar e consolidar a técnica, foram realizadas simulações em sistemas de 5, 33 e 70 nós. Os resultados foram analisados e comparados com outros disponibilizados na literatura especializada.

Palavras-chave— Reconfiguração de Redes de Distribuição, Otimização, Algoritmo do Vaga-Lume, Meta-heurísticas, Perdas Ativas.

1 Introdução

As redes de distribuição de energia elétrica representam parte fundamental dos Sistemas Elétricos de Potência, sendo responsáveis pela entrega da energia aos consumidores finais. Devido às suas características construtivas e operacionais, estas estão sujeitas a diversas complicações, que podem afetar seu desempenho, bem como o desempenho dos sistemas adjacentes a esta rede.

Alguns dos obstáculos, comumente enfrentados na área de distribuição, referem-se às perdas técnicas e aos seus limites de operação. Tais questões interferem na qualidade e na confiabilidade dos sistemas de distribuição, acarretando muitas vezes no comprometimento da sua operação, o que pode inviabilizar o fornecimento de energia aos consumidores.

Nesse contexto, existem diversas alternativas possíveis que buscam soluções para os referidos problemas, como por exemplo: aumento do nível de tensão da rede; troca de condutores; instalação de bancos de capacitores; e a reconfiguração da rede de distribuição (RRD) de energia elétrica (Pereira, 2010). De forma a propor uma alternativa cuja viabilidade seja mais atrativa do ponto de vista técnico e econômico, a RRD acaba sendo a melhor opção na maior parte dos casos, pois permite a utilização de

recursos já existentes no sistema, sem a necessidade inicial de novos investimentos com sua implementação (Pereira, 2010).

A RRD trata da busca pela melhor configuração possível, através da alteração da topologia de um determinado sistema. Essa reconfiguração é realizada com base na abertura e fechamento de chaves seccionadoras de forma a determinar o ponto de operação em que um sistema apresente o menor nível de perdas ativas, sem, no entanto, violar os seus limites operacionais.

Em face da natureza desta alternativa, onde as referidas chaves admitem dois estados (aberto e fechado), existe uma barreira a ser superada, que é relacionada ao número de soluções possíveis. Esse valor é representado por 2^n combinações, em que n é o número de chaves de um determinado sistema. Percebe-se que em sistemas onde n possui um valor muito elevado, o número de combinações torna-se extremamente grande.

Para solução deste problema, técnicas computacionais são normalmente aplicadas. Dentro deste contexto, existem diversas técnicas para a busca das melhores topologias, como os métodos exatos (determinísticos) e os aproximados (probabilísticos). Os últimos normalmente são representados por meta-heurísticas.

Os primeiros trabalhos de RRD datam da década de 70, como os apresentados por (Merlin & Back, 1975), onde os autores utilizam-se de técnicas exatas e heurísticas na solução do problema mencionado. Já no começo da década de 90, alguns artigos propuseram a utilização de algoritmos evolutivos e meta-heurísticas como técnicas para a solução dos problemas de RRD, como se pode perceber nos trabalhos de (H. D. Chiang & Jean-Jumeau, 1990; H.-D. Chiang & Jean-Jumeau, 1990; Nara et al., 1992; Kim et al., 1993; Chang & Kuo, 1994). A partir dos anos 2000 até os trabalhos mais recentes, as meta-heurísticas bioinspiradas passaram a ser utilizadas nessa área, como verificado nos trabalhos propostos por (Jin et al. 2005; Su et al. 2005), e recentemente por (Nguyen & Truong 2015; Naveen et al. 2015; Flaih et al. 2016). Isso mostra que, apesar de tratar-se de um problema clássico, sendo estudado há vários anos, ainda existe um campo de pesquisas na busca por melhores soluções e alternativas no tratamento do problema, devido a sua complexidade.

O objetivo deste trabalho é apresentar uma meta-heurística bioinspirada baseada no comportamento dos vaga-lumes (Yang, 2010) e aplicá-la na resolução do problema de RRD. De forma a minimizar as perdas ativas, a técnica foi utilizada em conjunto com um Fluxo de Carga AC. Também, é apresentada uma proposta para a diminuição do espaço de busca, através de um critério de sensibilidade que possibilita a exclusão de um grande número de chaves do conjunto inicial, tornando a busca pelo ótimo mais eficiente. Assim, a contribuição do trabalho está em testar a meta-heurística do vaga-lume no problema de RRD e aplicar um critério de sensibilidade para diminuir o espaço de busca.

2 Modelo matemático do problema de RRD

Basicamente, o problema de RRD visando a diminuição das perdas de potência ativa pode ser tratado genericamente, como um problema de minimização de uma função objetivo (perdas de potência ativa), sujeito à um conjunto de restrições.

A equação (1) apresenta a forma matemática genérica do problema de reconfiguração estudado:

$$\text{Minimizar} \rightarrow P_{\text{perdas}} \quad (1)$$

Em que P_{perdas} representa as perdas ativas do sistema.

Essa função objetivo está sujeita às seguintes restrições impostas pelo problema:

- Níveis de tensões admitidos em cada nó: limites de tensões entre 0,93 p.u e 1,05 p.u, dado pela ANEEL, considerando a faixa de operação adequada para sistemas de distribuição com operação nominal entre 1kV e 69kV (ANEEL, 2009); Essa restrição é representada matematicamente em (2).

$$V_k^{\min} \leq V_k \leq V_k^{\max} \quad (2)$$

- Manutenção da radialidade do sistema e ilhamento de cargas: Os sistemas de distribuição de energia elétrica normalmente operam de forma radial, ou seja, um caminho único entre a subestação e as cargas. Todas as cargas devem permanecer alimentadas por uma subestação, conforme apresentado em (3).

$$\det(A) = 1 \text{ ou } -1 \quad (3)$$

- Balanço de potência dos nós: o balanço das potências (ativas e reativas) em cada nó do sistema deve refletir (4).

$$g(x) = 0 \quad (4)$$

Em que:

V_k : tensão na barra k ;

$V_k^{\min}$ e $V_k^{\max}$: limites inferior e superior da tensão na barra k ;

A : matriz de incidência nodal;

$x(V, \theta)$: vetor das variáveis de estado, sendo V e θ , respectivamente, a magnitude e o ângulo de fase do fasor de tensão das barras.

Por se tratar de um problema de Programação Não Linear Inteira Mista (PNLIM) e, devido a sua natureza, este possui um processo de solução complexo. Neste caso, técnicas exatas e analíticas acabam por demandar um grande esforço computacional, ao contrário das baseadas em algoritmos evolutivos. Estas últimas apresentam um melhor desempenho do ponto de vista computacional, apresentando também bons resultados em comparação com as técnicas exatas, justificando a sua utilização na solução do problema de RRD (Lavorato et al. 2012; Schmidt 2005).

Através da aplicação da técnica escolhida (meta-heurística do vaga-lume) busca-se a melhor configuração possível para sistemas de distribuição, de forma a encontrar a topologia que apresente o menor valor de perdas ativas de acordo com os chaveamentos estabelecidos, respeitando as restrições impostas. As perdas são avaliadas por meio da execução do fluxo de carga para a topologia candidata.

3 Meta-heurística do vaga-lume

Meta-heurísticas podem ser definidas como técnicas onde uma heurística determinada é aprimorada, na busca de uma solução mais assertiva para determinado problema. Estas são aplicadas em diversos campos de estudo, visando sempre à obtenção de soluções ótimas (Glover e Kochenberger, 2003). Algumas dessas meta-heurísticas são denominadas bioinspiradas, ou seja, inspiradas em fenômenos da natureza, como por exemplo, Colônia de Formigas (Su et al., 2005), *Particle Swarm Optimization* ou Otimização por Enxame de Partículas (PSO) (Flaih et al., 2016) e Colônia de Bactérias (Naveen et al., 2015).

Seguindo estes estudos, o pesquisador Yang (Yang, 2010) da Universidade de Cambridge desen-

volveu um algoritmo baseado na observação do comportamento dos vaga-lumes e sua interação com o meio onde estão inseridos. A técnica é fundamentada nos três princípios definidos a seguir:

- todos os vaga-lumes são do mesmo gênero, assim, os mesmos serão atraídos independentemente;
- atratividade é proporcional ao brilho, portanto, o que possui o menor brilho será atraído pelo que possui o maior. Devido à sua proporcionalidade, ambas decrescem com o aumento da distância. Caso não haja um vaga-lume com maior brilho, o mesmo irá mover-se aleatoriamente;
- o brilho de um vaga-lume é afetado ou determinado pela forma (valor) definida pela função objetivo.

Ainda há dois parâmetros de extrema importância na formulação do algoritmo do vaga-lume: a) a variação da intensidade luminosa e b) a formulação da atratividade (Yang, 2010). A variação da luminosidade é proporcional ao inverso do quadrado da distância, podendo ser definida pela equação (5). Partindo dessa equação, Yang (Yang, 2010) determina que a intensidade luminosa em função de uma distância r pode ser dada pela equação (6), onde r é a distância entre dois pontos no espaço podendo ser encontrado através da equação (7).

Baseado nas equações (5) e (6), Yang (Yang, 2010) apresenta uma formulação para a intensidade luminosa, dada pela equação (8), onde se leva em consideração o coeficiente de absorção do meio.

$$I \propto 1/r^2 \quad (5)$$

$$I(r) = I_0/r^2 \quad (6)$$

$$r_{i,j} = \|x_i - x_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^d (x_{i,k} - x_{j,k})^2} \quad (7)$$

$$I(r) = I_0 \cdot e^{-\gamma r^2} \quad (8)$$

Em que:

I : intensidade luminosa;

r : distância do ponto de observação até a fonte de iluminação;

I_0 : intensidade luminosa na fonte;

x : é a k -ésima componente da coordenada espacial x_i e x_j do i -ésimo vaga-lume e do j -ésimo vaga-lume, respectivamente;

d : última coordenada espacial (dimensão) do i -ésimo e do j -ésimo vaga-lume.

γ : coeficiente de absorção do meio.

Também, partindo da premissa que a intensidade luminosa em função da distância, é proporcional à atratividade, pode-se definir a última como:

$$\beta(r) = \beta_0 \cdot e^{-\gamma r^2} \quad (9)$$

Em que:

β_0 : atratividade de um vagalume na fonte.

Por meio desse equacionamento e modelagem, o autor da técnica propõe uma equação geral (10), a qual determina o movimento dos vaga-lumes.

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \beta_0 \cdot e^{-\gamma r_{ij}^2} \cdot (x_j^t - x_i^t) + \alpha V_i \quad (10)$$

A equação (10) representa o novo posicionamento do vaga-lume, ou seja, no instante $t+1$, e pode ser dividida basicamente em três termos distintos representativos, respectivamente, da posição do vagalume no instante t , da atratividade das partículas definida através da equação (9), e da aleatoriedade do movimento. Neste caso, α é um parâmetro aleatório normalmente definido entre 0 e 1 e V_i representa um vetor de números aleatórios, tirados de uma distribuição Gaussiana ou uniforme, normalmente substituído nas aplicações por um gerador de números aleatórios dado por $rand - \frac{1}{2}$ onde $rand$ varia entre 0 e 1. O valor de β_0 na maior parte dos casos, tem seu valor definido como 1.

Devido à particularidade e necessidade de certas aplicações, alguns autores apresentam estudos utilizando-se de uma aproximação binária (Crawford et al., 2014) para a discretização do posicionamento dos vaga-lumes. Esse é um processo análogo ao aplicado às outras técnicas de otimização bioinspiradas, como o apresentado por Kennedy e Eberhart (Kennedy & Eberhart, 1997) para a meta-heurística PSO. A referida aproximação é realizada através de uma função sigmoide e da relação (11).

$$\sigma(x_i^{t+1}) = \frac{1}{1 + e^{-x_i^{t+1}}} \quad (11)$$

$$x_i^{t+1} \begin{cases} 1 & \text{se } rand < \sigma(x_i^{t+1}) \\ 0 & \text{caso o contrário} \end{cases}$$

A natureza do problema em estudo demanda uma modificação no algoritmo binário, sendo necessária a inclusão de uma aproximação análoga à apresentada por Khalil e Gorpínich (Khalil & Gorpínich, 2012) para o PSO, onde a equação (11) passa a ser comprimidas em uma dimensão d_n e a ser representadas por (12). Esta alteração faz com que a aproximação antes binária, agora possa ser utilizada para discretizar uma dimensão d_n .

$$\sigma(x_i^{t+1}) = d_n \frac{1}{1 + e^{-x_i^{t+1}}} \quad (12)$$

$$x_i^{t+1} \begin{cases} S_{d1} & \text{se } \sigma(x_i^{t+1}) < 1 \\ S_{d2} & \text{se } \sigma(x_i^{t+1}) < 2 \\ \dots & \dots \\ S_{dn} & \text{se } \sigma(x_i^{t+1}) < n \end{cases}$$

4 Determinação do espaço de busca

Fundamentado na conceituação teórica apresentada anteriormente, o algoritmo pode ser desenvolvido e a técnica implementada. Através da determina-

ção de novas topologias, as perdas são calculadas através de um Fluxo de Carga CA (Método de Newton-Raphson) e comparadas com a da literatura especializada. Para que a aplicação atenda às restrições impostas e, seu desenvolvimento seja executado de forma satisfatória, determinadas considerações devem ser feitas e certas condições impostas aos sistemas que serão analisados. A técnica aqui desenvolvida para satisfazer estas imposições pode ser subdividida nas duas etapas apresentadas na sequência.

4.1. Primeira Etapa

Primeiramente, devido à maioria dos sistemas de distribuição operar de forma radial, é necessário estabelecer um número mínimo de chaves que podem ser abertas para que essa condição seja mantida. Para essa determinação considera-se inicialmente o sistema em sua forma malhada e define-se a quantidade de chaves através da equação (13).

$$n_{os} = n_s - n_b + 1 \quad (13)$$

Em que:

n_{os} : número de chaves a serem abertas;
 n_s : número de chaves totais do sistema;
 n_b : número total de nós do sistema.

O valor estabelecido pela equação (13) define a dimensão do problema, determinando o número de chaves que devem ser abertas. Tal valor coincide com o número de malhas, considerando o sistema com todas as chaves fechadas. A partir de uma análise do sistema com todas as chaves inicialmente fechadas, é possível determinar um conjunto de vetores com chaves candidatas a abertura para cada uma das malhas. Cada vetor é composto pelos ramos da malha analisada e sua dimensão pode variar em função do número de ramos que compõem cada malha. A representação individual dos vetores pode ser dada por (14).

$$V_n = [C1_n, C2_n \dots Cx_n] \quad (14)$$

Em que:

n : indica qual a malha em análise, onde n varia de 1 até n_{os} ;
 V_n : indica o vetor referente à malha n em análise;
 Cx_n : indica a última chave candidata à abertura na malha n em análise.

Após a determinação dos vetores que farão parte da primeira etapa, uma segunda etapa é efetuada com o objetivo de reduzir o número de chaves candidatas nos vetores estabelecidos anteriormente.

4.2. Segunda Etapa

A proposta desta etapa é de estabelecer um critério de sensibilidade que leva em consideração o fluxo de potência no sistema de distribuição com todas as chaves fechadas. A partir da execução desse fluxo é possível determinar as perdas em cada um dos ramos

dos sistemas em estudo e realizar uma classificação dos ramos representativos de cada uma das chaves em função das perdas. Análises executadas apontaram que as chaves que correspondem aos maiores valores de perda, permanecem em estado normalmente fechado, o que permite excluí-las do conjunto de chaves manobráveis.

O percentual de chaves à serem excluídas é determinado em função do caso que proporciona o menor valor de exclusão (verificado no sistema de 70 nós), e de resultados encontrados considerando apenas as chaves definidas na primeira etapa, visando estabelecer um montante único aplicável a todos os casos testados, sem que haja comprometimento dos resultados.

4.3. Exemplo Ilustrativo 5 nós e 7 linhas

Com a finalidade de demonstrar técnica proposta, é apresentado na Figura 1 um sistema de 5 nós e 7 linhas (Pereira, 2010), com suas respectivas malhas.

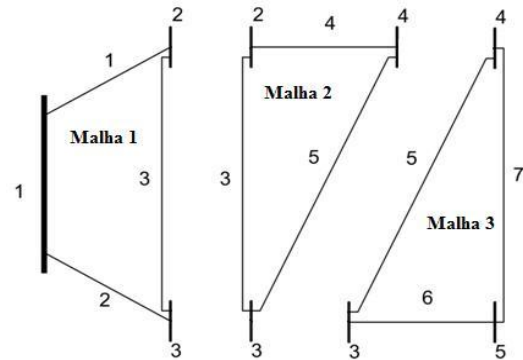


Figura 1. Formação de Malhas Sistema 5 nós e 7 linhas

A partir da análise do sistema, é possível determinar a dimensão do problema através da equação (13), onde se obtém o valor 3 e os vetores representativos das malhas, conforme a equação (14) apresentada na primeira etapa:

$$\begin{aligned} V_1 &= [1 \ 2 \ 3] \\ V_2 &= [3 \ 4 \ 5] \\ V_3 &= [5 \ 6 \ 7] \end{aligned}$$

De posse desses vetores, parte-se para a segunda etapa, que executa um fluxo de carga CA no referido sistema com todas as chaves fechadas, para determinação das perdas em cada um dos ramos. Os valores encontrados permitem a classificação dos ramos em ordem decrescente de perdas, conforme apresentado na Tabela 1:

Tabela 1. Classificação das chaves conforme perdas nos ramos (sistema malhado).

Ramo	Perdas (MW)
2	2,12
1	0,52
5	0,16
6	0,10
3	0,03
4	0,02
7	0,01

Os testes realizados para o presente trabalho permitem a seleção de 30% do total dos ramos (chaves) com base na classificação efetuada, conforme as maiores perdas e, posteriormente, a exclusão dos mesmos de cada um dos vetores formados na primeira etapa da técnica proposta.

A partir da análise para o caso de 5 nós e 7 linhas é possível realizar a exclusão das chaves 2 e 1, restando a seguinte configuração de chaves passíveis de abertura para a solução:

$$\begin{aligned} V_1 &= [3] \\ V_2 &= [3 \ 4 \ 5] \\ V_3 &= [5 \ 6 \ 7] \end{aligned}$$

O novo conjunto de vetores contém as chaves candidatas a compor a solução do problema, representando assim, o espaço de busca do problema em questão. A técnica aqui apresentada determina a escolha de uma chave para abertura em cada um dos vetores restantes, possibilitando a solução do problema de reconfiguração de sistemas de distribuição.

5 Algoritmo F-RRD

O algoritmo aqui desenvolvido, denominado F-RRD (*Firefly-Reconfiguração de Redes de Distribuição*), foi implementado no software Matlab e executado em um notebook com processador Intel I7 com sistema operacional de 64 bits. Para a determinação das perdas, foi utilizado em conjunto com a técnica aqui apresentada o pacote de algoritmos MATPOWER, utilizado para análise de fluxo de carga em sistemas elétricos de potência. Esse pacote também foi desenvolvido na plataforma Matlab pelos pesquisadores Zimmerman, Murillo-Sanchez e Thomas (Zimmerman et al., 2011) da Universidade de Cornell dos Estados Unidos.

O fluxograma da Figura 2 representa o algoritmo F-RRD desenvolvido para solução do problema em análise, incluindo as etapas básicas de sua lógica de funcionamento. O algoritmo considera que cada vaga-lume representa uma solução (cada coordenada de posição destes vaga-lumes é uma chave a ser aberta) e que seu brilho é representativo das perdas associadas a ele. Cada vaga-lume se aproxima do que possui o menor valor de perdas e a viabilidade da solução é verificada através das restrições citadas na seção 2. Assim, novas topologias são determinadas de forma que as perdas se encontrem em um valor mínimo ao fim de cada execução. Para soluções que não atendam às restrições impostas, atribui-se uma constante k de valor elevado. Os resultados são apresentados e comparados com o estado inicial do sistema de distribuição, possibilitando a determinação da redução percentual de perdas para cada um dos casos estudados, bem como o menor nível de tensão apresentado pela nova topologia do sistema.

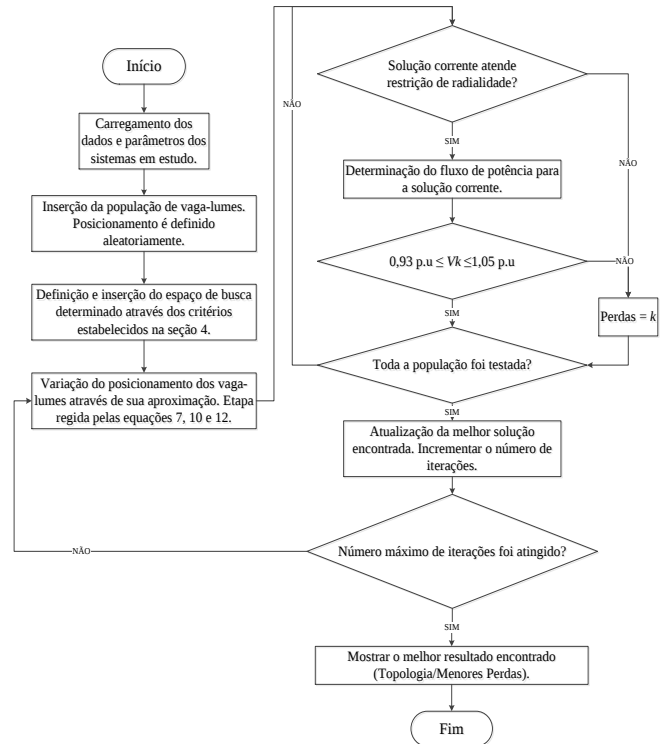


Figura 2. Fluxograma representativo F-RRD.

6 Simulações e resultados

De forma a validar o algoritmo desenvolvido e a técnica aqui proposta, inicialmente foi considerado o sistema de 5 nós e 7 linhas (Pereira, 2010) apresentado anteriormente, sendo a técnica posteriormente aplicada a sistemas maiores de 33 nós e 37 linhas (Baran e Wu, 1989), e finalmente um sistema de 70 nós e 74 linhas (Chiang & Jean-Jumeau, 1990). Todos os resultados encontrados foram comparados com outras técnicas já implementadas, permitindo comprovar a eficiência do método proposto. Em todos os casos, os parâmetros β_0 , γ e α foram fixados, respectivamente, em 1, 1 e 0,95. Já a população e o número máximo de iterações determinados para cada um dos casos foram, respectivamente, 4 e 8 vezes a dimensão do problema (n_{os}). O algoritmo foi executado 10 vezes para cada um dos sistemas, sendo os melhores resultados apresentados e comparados com o da literatura especializada.

6.1. Sistema de 5 nós e 7 linhas

O sistema de 5 nós apresentado na seção 3 é o mesmo encontrado no trabalho de Pereira (Pereira, 2010), tendo o nó 1 como referência e tensão expressa como $V_1 = 1,05 + 0j$ pu. Os demais nós são compostos apenas por cargas (nós de carga).

O melhor resultado encontrado é apresentado na Tabela 2. A comparação com os resultados utilizados em técnicas desenvolvidas por outros autores é apresentada na Tabela 3.

Tabela 2. Sistema de 5 Nós - Resultados

Sistema 5 Nós	Inicial	Final
Chaves Abertas	2 - 4 - 6	3 - 4 - 7
Perdas Ôhmicas (pu)	0,15161	0,0362
Redução Percentual Perdas	-	76,12%
Mínima Tensão (pu)	1,01	1,04

Tabela 3. Sistema de 5 Nós - Comparativo

Técnica	Perdas Ôhmicas (pu)	Chaves Abertas
F-RRD	0,0362	3 - 4 - 7
Colônia de Formigas (Pereira, 2010)	0,0362	3 - 4 - 7

O tempo computacional médio foi da ordem de 2,356 segundos. Na melhor execução, do total de 10, o algoritmo apresentou o resultado esperado na 2ª iteração, com um tempo computacional de 0,181 segundos até atingir este ponto.

6.2. Sistema de 33 nós e 37 linhas

O sistema de 33 nós e 37 linhas utilizado neste trabalho é apresentado na Figura 3, sendo adotado inicialmente no trabalho desenvolvido por Baran e Wu(Baran & Wu, 1989).

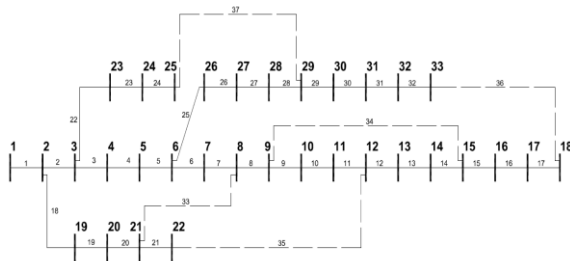


Figura 3. Sistema de Distribuição 33 nós e 37 linhas baseado no presente em (Baran & Wu, 1989).

O conjunto de vetores determinado na primeira etapa e na segunda etapa (considerando a exclusão de 30% das chaves com maiores perdas) é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4. Sistema de 33 Nós – Vetores - Primeira e Segunda Etapas

Vetores	Primeira Etapa	Segunda Etapa
V_1	[8 9 10 11 21 33 35]	[8 9 10 11 21 33 35]
V_2	[2 3 4 5 6 7 18 19 20 33]	[6 7 18 33]
V_3	[9 10 11 12 13 14 34]	[9 10 11 12 13 14 34]
V_4	[6 7 8 15 16 17 25 26 27 28 29 30 31 32 34 36]	[6 7 8 15 16 17 25 26 27 28 30 31 32 34 36]
V_5	[3 4 5 22 23 24 25 26 27 28 37]	[25 26 27 28 37]

As Tabelas 5 e 6 apresentam, respectivamente, o melhor resultado encontrado pelo algoritmo F-RRD, bem como uma comparação entre este e outras soluções apresentadas por autores que utilizam técnicas diversas para tratar o problema da reconfiguração.

Tabela 5. Sistema de 33 Nós – Resultados

Sistema 33 Nós	Inicial	Final
Chaves Abertas	33 - 34 - 35 - 36 - 37	7 - 9 - 14 - 32 - 37
Perdas Ôhmicas (kW)	202,67	139,55
Redução Percentual Perdas	-	31,15%
Mínima Tensão (pu)	0,913	0,937

Tabela 6. Sistema de 33 Nós – Comparativo

Técnica	Perdas Ôhmicas (kW)	Chaves Abertas
F-RRD	139,55	7 - 9 - 14 - 32 - 37
Heurístico (Gomes et al., 2005)	136,57	7 - 9 - 14 - 32 - 37
PSO Modificado - (Flaih et al., 2016)	139,55	7 - 9 - 14 - 32 - 37
Algoritmo Genético - (Tomoiağa et al., 2013)	139,55	7 - 9 - 14 - 32 - 37
Heurística - (Martín & Gil, 2008)	139,55	7 - 9 - 14 - 32 - 37
Colônia de Formigas (Pereira, 2010)	139,98	7 - 9 - 14 - 28 - 32
Heurístico (Baran e Wu, 1989)	160,99	7 - 10 - 14 - 27 - 30

Percebe-se pela análise da Tabela 6, que os resultados estão próximos aos apresentados por outros autores para o mesmo sistema, com a mesma configuração de chaves na maior parte dos casos. Há algumas divergências nos valores de perdas para alguns casos (considerando a mesma configuração), que podem ser devido a bases de dados utilizadas, ou precisão do fluxo de carga.

O tempo computacional médio para execução de todas as iterações foi de 8,121 segundos. Na melhor execução dentre as 10 realizadas, o algoritmo apresentou o resultado esperado na 6ª iteração, com um tempo computacional de 1,338 segundos até atingir a solução.

6.3. Sistema de 70 nós e 74 linhas

Por fim, é realizada a simulação de um sistema composto por 70 nós e 74 linhas, apresentado inicialmente no trabalho de Chiang e Jean-Jumeau (Chiang & Jean-Jumeau, 1990). A Figura 4 representa o referido sistema de distribuição:

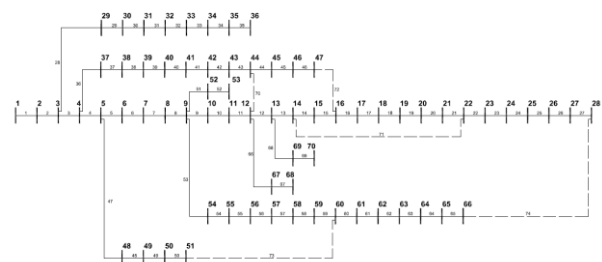


Figura 4. Sistema de 70 nós e 74 linhas baseado no presente em (Chiang & Jean-Jumeau, 1990).

O conjunto de vetores determinado na primeira etapa e na segunda etapa (considerando a exclusão de 30% das chaves com maiores perdas) é apresentado na Tabela 7.

Tabela 7. Sistema de 70 Nós – Vetores - Primeira e Segunda Etapas

Vetores	Primeira Etapa	Segunda Etapa
V_1	[4 5 6 7 8 9 10 11 36 37 38 39 40 41 42 43 70]	[4 5 9 11 36 37 38 39 40 43 70]
V_2	[12 13 14 15 44 45 46 70 72]	[14 15 44 45 46 70]
V_3	[14 15 16 17 18 19 20 21 71]	[14 15 16 17 18 19 20 21 71]
V_4	[10 11 12 13 22 23 24 25 26 27 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 71 74]	[11 22 23 24 26 27 53 54 56 62 63 64 71]
V_5	[4 5 6 7 8 9 47 48 49 50 53 54 55 56 57 58 59 73]	[4 5 9 47 53 54 56]

A Tabela 8 apresenta os resultados encontrados para o sistema de 70 nós e 74 linhas. A Tabela 9 apresenta uma comparação entre a técnica proposta e a solução de outros autores que utilizam diversas para tratar o problema da reconfiguração.

Tabela 8. Sistema de 70 Nós – Resultados

Sistema 70 Nós	Inicial	Final
Chaves Abertas	70 - 71 - 72 - 73 - 74	15 - 56 - 62 - 70 - 71
Perdas Ohmicas (kW)	20,87	9,43
Redução Percentual Perdas	-	54,83%
Mínima Tensão (p.u)	0,973	0,982

Tabela 9. Sistema de 70 Nós – Comparativo

Técnica	Perdas Ohmicas (kW)	Chaves Abertas
F-RRD	9,43	15 - 56 - 62 - 70 - 71
Colônia de Formigas (Pereira, 2010)	9,34	15 - 57 - 62 - 70 - 71
Heurística (Mantovani et al., 2000)	9,34	15 - 57 - 62 - 70 - 71
Busca Tabu (Guimarães, 2005)	9,41	15 - 59 - 62 - 70 - 71
Algoritmo Genético - (Tomoiaga et al., 2013)	9,43	15 - 59 - 62 - 70 - 71
Heurística - (Martín & Gil, 2008)	9,43	15 - 58 - 62 - 70 - 71

A análise dos resultados da Tabela 9 permite concluir que os resultados se encontram próximos aos apresentados por outros autores para o sistema em estudo. Especificamente para o sistema de 70 nós aqui apresentado, mais de uma solução apresenta perdas da mesma ordem, ou seja, 9,43 kW, como por exemplo a abertura das chaves 15-59-62-70-71 e 15-58-62-70-71. As diferenças nos valores de perdas para as mesmas configurações devem-se às divergências entre bancos de dados ou precisão do fluxo de carga.

O tempo computacional médio para execução de todas as iterações foi da ordem de 14,679 segundos. Em sua melhor execução, o algoritmo apresentou o resultado desejado já na 5ª iteração do total de iterações programadas, com um tempo computacional de 2,282 segundos até atingir este ponto.

7 Conclusões

O presente artigo apresentou uma técnica alternativa para a solução do problema da reconfiguração, utilizando a meta-heurística do vaga-lume através de um espaço de busca reduzido.

A proposta apresentada de exclusão de uma parcela de chaves do conjunto total, com base na determinação do fluxo de carga em cada um dos ramos, permitiu a diminuição de 30% do conjunto de chaves totais, sem que houvesse um comprometimento nos resultados apresentados, permitindo, assim, a diminuição do espaço de busca inicialmente proposto.

Partindo do resultado encontrado para a simulação no sistema de 5 nós e 7 linhas, foi possível validar a técnica proposta. Sua consolidação foi verificada com base nos resultados encontrados para os sistemas de 33 nós e 70 nós, quando os resultados obtidos foram comparados com aqueles encontrados na literatura especializada.

A partir desses estudos e resultados espera-se que a técnica proposta seja testada frente a sistemas mais complexos, que levem em consideração outras características, como, por exemplo, a existência de geradores distribuídos e variações dos níveis de carga.

Há espaço ainda para as seguintes análises: a) analisar o comportamento da técnica proposta em conjunto com outros métodos para cálculo de fluxo de carga; b) utilizar outras funções de transferência na aproximação do posicionamento das partículas; c) realizar uma análise de sensibilidade dos parâmetros utilizados no algoritmo. Todos esses pontos são relevantes para o aprimoramento da técnica proposta para a reconfiguração de sistemas de distribuição.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal do ABC, ao CNPq - Projeto Universal n. 432423/2016-8 e à FAPESP.

Referências Bibliográficas

- ANEEL, 2009. AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica*, Available at: http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/M?dul08%7B_%7DRevis?o%7B_%7D7.pdf.
- Baran, M.E. & Wu, F.F., 1989. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 4(2), pp.1401–1407.
- Chang, H.-C. & Kuo, C.-C., 1994. Network reconfiguration in distribution systems using simulated annealing. *Electric Power Systems Research*, 29(3), pp.227–238.

- Chiang, H.-D. & Jean-Jumeau, R., 1990. Optimal network reconfigurations in distribution systems. II. Solution algorithms and numerical results. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 5(3), pp.1568–1574.
- Chiang, H.D. & Jean-Jumeau, R., 1990. Optimal network reconfigurations in distribution systems--I: A new formulation and a solution methodology. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 5(4), pp.1902–1909.
- Crawford, B. et al., 2014. A binary coded firefly algorithm that solves the set covering problem. *Romanian Journal of Information Science and Technology*, 17(3), pp.252–264.
- Flaih, F.M.F. et al., 2016. Distribution System Reconfiguration for Power Loss Minimization and Voltage Profile Improvement Using Modified Particle Swarm Optimization. In *2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Conference*. Xi'an, China, pp. 120–124.
- Glover, F. & Kochenberger, G.A., 2003. *Handbook of Metaheuristics*. Boston, MA: Kluwer Academics Publisher.
- Gomes, F.V. et al., 2005. A new heuristic reconfiguration algorithm for large distribution systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(3), pp.1373–1378.
- Guimarães, M.A. do N., 2005. *Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica utilizando algoritmos de Busca Tabu*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas - SP.
- Jin, X., Zhao, J. & Sun, Y., 2005. Distribution network reconfiguration for load balancing using binary particle swarm optimization. *International Conference on Power System Technology*.
- Kennedy, J. & Eberhart, R.C., 1997. A discrete binary version of the particle swarm algorithm. *1997 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Computational Cybernetics and Simulation*, 5, pp.4–8.
- Khalil, T.M. & Gorpnich, A. V., 2012. Selective Particle Swarm Optimization. *International Journal of Multidisciplinary Sciences and Engineering*, 3(4), pp.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), pp.1356–1366.
- Lavorato, M. et al., 2012. Imposing radiality constraints in distribution system optimization problems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 27(1), pp.172–180.
- Mantovani, J.R.S., Casari, F. & Romero, R.A., 2000. Reconfiguração de Sistemas de Distribuição Radiais Utilizando o Critério de Queda de Tensão. *SBA Controle & Automação*, 11(3), pp.150–159.
- Martín, J.A. & Gil, A.J., 2008. A new heuristic approach for distribution systems loss reduction. *Electric Power Systems Research*, 78(11), pp.1953–1958.
- Merlin, A. & Back, H., 1975. Search for a Minimal-Loss Operating Spanning Tree Configuration in an Urban Power Distribution System.
- Nara, K. et al., 1992. Implementation of Genetic Algorithm for Distribution Systems Loss Minimum Re-Configuration. *IEEE Transactions on Power Systems*, 7(3), pp.1044–1051.
- Naveen, S., Sathish Kumar, K. & Rajalakshmi, K., 2015. Distribution system reconfiguration for loss minimization using modified bacterial foraging optimization algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 69, pp.90–97.
- 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, pp.233–242.
- 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.
- Schmidt, H.P., 2005. *Reconfiguração de redes de distribuição através de programação não-linear inteira mista*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo - USP, São Paulo - SP.
- Su, C.T., Chang, C.F. & Chiou, J.P., 2005. Distribution network reconfiguration for loss reduction by ant colony search algorithm. *Electric Power Systems Research*, 75(2–3), pp.190–199.
- Tomoiaga, B. et al., 2013. Distribution system reconfiguration using genetic algorithm based on connected graphs. *Electric Power Systems Research*, 104, pp.216–225.
- Yang, X.-S., 2010. *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms* Second Edi., United Kingdom: Luniver Press.
- Zimmerman, R.D., Murillo-Sanchez, C.E. & Thomas, R.J., 2011. MATPOWER: Steady-State Operations, Planning, and Analysis Tools for Power Systems Research and Education. *IEEE Transactions on Power Systems*, 26(1), pp.12–19.