# MODELO MULTIOBJETIVO PARA O PROBLEMA DE RECONFIGURAÇÃO DE REDES ELÉTRICAS UTILIZANDO OTIMIZAÇÃO POR NUVEM DE PARTÍCULAS

**Laerty João dos Santos Damião**
Universidade Federal de Ouro Preto
Rua 36, 115, 35931-008, João Monlevade, MG, Brasil
laertyjs@gmail.com

**Wilingthon Guerra Zvietcovich**
Universidade Federal de Ouro Preto
Rua 36, 115, 35931-008, João Monlevade, MG, Brasil
wilingthon@decea.ufop.br

**Francisco Ricardo Abrantes Couy Baracho**
Universidade Federal de Ouro Preto
Rua 36, 115, 35931-008, João Monlevade, MG, Brasil
f_baracho@deelt.ufop.br

**RESUMO**

Neste trabalho, a meta-heurística Otimização por Nuvem de Partículas (ONP) é aplicada ao problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica na presença de cargas não-lineares visando a redução da distorção harmônica total e a maximização do carregamento do sistema através de um índice de estabilidade de tensão. A ONP baseia-se no comportamento de um bando de pássaros em voo à procura de alimento. Para garantir a convergência para as redes radiais de grande porte utilizou-se uma regra heurística para aumentar a eficiência da metodologia. A metodologia proposta foi testada no sistema radial IEEE 33 barras. Os resultados obtidos demonstraram a eficiência do método proposto em encontrar configurações de boa qualidade em relação ao nível de distorção harmônica e ao máximo carregamento suportado pelo sistema.

**PALAVRAS CHAVE. Algoritmo ONP. Distorção Harmônica. Estabilidade de Tensão.**

**Tópico: EN - PO na Área de Energia**

**ABSTRACT**

In this work, the meta-heuristic Particle Swarm Optimization (PSO) is applied to the problem of reconfiguration of power distribution systems in the presence of non-linear loads with the objective of minimizing the total harmonic distortion and maximize loading in network using a stability index. PSO is based on the behavior of a flock of birds when flying in search of food. In order to guarantee the convergence when the distribution power network is radial and large, a heuristic rule is deployed to improve the methodology efficiency. The methodology was applied to the IEEE 33-bus radial system. The results demonstrate the efficiency of the proposed method to find good quality topologies of the distribution system in relation to the level of harmonic distortion and the maximum loading supported by the network.

**KEYWORDS. Harmonic Distortion. PSO Algorithm. Voltage Stability.**

**Paper topic: EN - OR Area of Energy**

https://proceedings.science/p/85454?lang=pt-br

## 1. Introdução

Em sistemas de distribuição, a crescente utilização de cargas não-lineares é um fator que atinge diretamente a Qualidade da Energia (QE) devido à grande quantidade de correntes harmônicas injetada. A presença de componentes de alta frequência na rede pode provocar baixo fator de potência, sobreaquecimento de transformadores, linhas e motores e indevida atuação de dispositivos de proteção. Por essa razão, as regras de mercado quanto à QE criam a necessidade das empresas concessionárias se adaptarem através do desenvolvimento de novos métodos para análise, planejamento e operação de um sistema elétrico.

Nesse contexto, uma vez que as redes de distribuição são construídas em malha, mas operam de maneira radial, a reconfiguração, isto é, a alteração da topologia da rede através do fechamento e abertura de chaves de interconexão e seccionamento, é uma ferramenta importante e de baixo custo.

Entretanto, como as topologias radiais existentes nos sistemas de distribuição podem chegar a ser milhares, dependendo do porte da rede, a reconfiguração enquadra-se em um modelo de programação não-linear inteiro misto (PNLIM) que apresenta uma alta explosão combinatória.

Existem diversos métodos para resolver este problema. Um primeiro grupo está baseado na experiência dos operadores, como são as heurísticas [Civanlar et al., 1988; Shirmohammadi e Hong, 1989; Baran e Wu, 1989]. Esses métodos solucionam o problema, mas não garantem sua otimalidade. Devido ao desenvolvimento tecnológico dos computadores, foi crescendo a atenção em técnicas baseadas na observação de fenômenos naturais. Estas técnicas ajudam a resolver problemas combinatórios complexos e são denominadas meta-heurísticas (Algoritmos Genéticos, Busca em Vizinhança Variável, Busca Tabu, Grasp entre outros). Estes algoritmos são usados para resolver o problema da reconfiguração de sistemas de distribuição [Lin et al., 2000].

Nesse sentido, em sistemas de distribuição, a melhoria da QE e da estabilidade da rede é uma tarefa bastante pertinente que pode ser alcançada através das meta-heurísticas. Na bibliografia pesquisada, no entanto, poucos trabalhos vislumbram a melhoria das condições de estabilidade de tensão. Já em relação aos índices que avaliam tal estabilidade em sistemas radiais, encontram-se diversas metodologias. Em [Nema et al., 1996], apresenta-se um método que analisa todas as combinações possíveis entre os estados de chaves de interconexão (aberta ou fechada). Verifica-se qual dos trechos vizinhos deve ser aberto objetivando a redução de um determinado índice de estabilidade. Em [Moghavvemi e Faruque, 2001], o índice é obtido a partir da rede reduzida numa linha. Com os parâmetros equivalentes dessa linha é formulada uma equação que avalia o índice de colapso de tensão. Em [Eminoglu e Hocaoglu, 2007], os autores apresentam um índice desenvolvido a partir da transferência de carga ativa e reativa em uma linha de distribuição. As cargas foram modeladas de diferentes tipos. Os resultados mostram a mesma eficiência deste índice quanto comparado com outros da literatura. Em [Pujara e Vaidya, 2011], os autores implementam um algoritmo para identificar as barras mais críticas, considerando condições de estabilidade. Para isso, utilizam a metodologia referenciada em [Ghosh e Das, 1999]. Também consideram diferentes tipos de carga. Em [Mahmoud, 2012], os autores utilizam a teoria de catástrofe para determinar um índice em redes radiais. Consideram diferentes modelos de carga. Em [Raja et al., 2013], os autores apresentam uma metodologia para melhorar a margem de estabilidade de tensão considerando geradores distribuidos. Utilizam um índice de colapso de tensão apresentado em [Vinothkumar, 2011]. Trabalhos em reconfiguração são apresentados em [Guimarães et al., 2005] e [Guerra e Romero, 2010]. O primeiro apresenta um método para maximizar o carregamento de uma rede elétrica radial. Para isso, utiliza-se um índice que avalia a estabilidade de tensão denominado *Transmission Path Stability Index* (TPSI). Este método consiste em transferir carga dos alimentadores mais carregados para os menos carregados, sempre que existir uma chave de interconexão. Já o segundo, utiliza a metaheurística Busca em Vizinhança Variável (VNS) para resolver o problema de reconfiguração objetivando a melhoria das condições de estabilidade de tensão.

Neste trabalho propõe-se uma nova aplicação da meta-heurística Otimização por Nu-

https://proceedings.science/p/85454?lang=pt-br

vem de Partículas para resolver o problema de reconfiguração visando o aumento da margem de segurança de tensão e a redução da Distorção Harmônica Total (THD) em um sistema elétrico onde existem cargas não-lineares. Essa técnica tem demonstrado ser muito eficiente na resolução de problemas da área de inteligência artificial [Del Valle et al., 2008].

*Otimização por Nuvem de Partículas* é uma técnica evolucionária inspirada na simulação de um sistema social simplificado com a intenção de simular o comportamento de um bando de pássaros em voo com seu movimento aleatório, mas globalmente determinado [Kennedy e Eberhart, 1995]. Essa estratégia é empregada utilizando informação heurística própria do problema cuja metodologia é ilustrada neste trabalho, começando com a formulação do problema de reconfiguração de uma rede de distribuição. Em seguida, são ilustrados os conceitos do método, para depois, ilustrar a sua aplicação ao problema de reconfiguração e, finalmente, mostrar os resultados na rede elétrica radial IEEE 33 barras.

## 2. Estabilidade de Tensão em Sistemas de Potência

A estabilidade de tensão em redes elétricas é definida como a capacidade que um sistema tem para manter as tensões aceitáveis em todas as barras em condições normais de operação, e também após a ocorrência de uma perturbação. Um sistema de potência entra em uma instabilidade de tensão quando um distúrbio causa um decréscimo progressivo e incontrolável de tensão [Kundur et al., 1994].

É possível analisar a estabilidade de tensão por métodos dinâmicos ou estáticos. Os primeiros são usualmente lentos em muitos aspectos, enquanto os segundos são baseados em fluxo de potência, o que fornece resultados mais conservadores do que os métodos dinâmicos.

As curvas P-V e Q-V são métodos estáticos de análise que podem ser utilizados na análise da estabilidade de tensão de um sistema [Taylor, 1994]. A curva P-V, ilustrada na Figura 1, é adequada para a identificação do ponto de colapso de tensão.

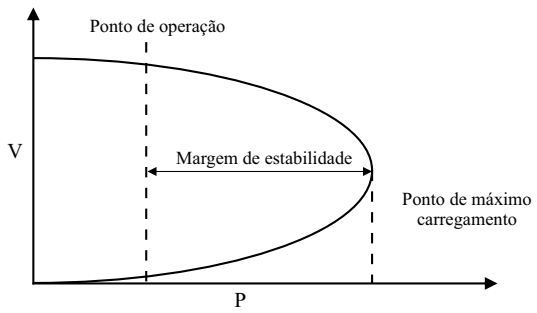



Figura 1: Curva P-V.

Os pontos da curva P-V são obtidos a partir de soluções sucessivas de fluxos de carga, onde a carga é aumentada por algum critério pré-estabelecido, obtendo-se assim a tensão "V" de uma barra para certa potência ativa "P" do sistema. Os pontos de equilíbrio da parte superior da curva P-V são estáveis (pontos de nó) e os pontos da parte inferior são instáveis (pontos de sela). A distância em porcentagem (ou MW) do ponto de operação ao limite de estabilidade de tensão define a margem de estabilidade de tensão.

Pode-se também representar o ponto de carregamento máximo pelo fator de carregamento $\lambda$, que é um escalar que pode ser multiplicado por todas as cargas do sistema, de acordo com as equações abaixo:

$$\lambda P_k^n - P_k^c = 0, \quad k \in \text{barras PQ, PV} \tag{1}$$

$$\lambda Q_k^n - Q_k^c = 0, \quad k \in \text{barras PQ} \tag{2}$$

https://proceedings.science/p/85454?lang=pt-br

em que $P_k^n$ e $Q_k^n$ são, respectivamente, as potências ativa e reativa nominais na barra $k$, e $P_k^c$ e $Q_k^c$ são as potências consideradas na análise da rede. Aumentando o valor de $\lambda$, atinge-se o ponto de fator de carregamento máximo ($\lambda^{max}$) no limite de estabilidade de tensão.

### 2.1. Índice de Estabilidade de Tensão

O comportamento extremamente não-linear do sistema na região próxima ao limite de estabilidade torna muito difícil a elaboração de um índice com comportamento linear, que seja eficaz para sistemas de grande porte, prevendo a margem de estabilidade a partir de certo ponto de equilíbrio. Entretanto, existem alguns índices que sinalizam a proximidade ao colapso de tensão.

Em [Nema et al., 1996], mostra-se que não há necessariamente uma relação entre a proximidade do colapso e a magnitude de tensão para uma barra em sistemas de transmissão. Dessa forma, não é correto considerar as magnitudes das tensões nas barras como indicadores de susceptibilidades ao colapso, tornando-se necessária a análise de índices mais confiáveis não só quanto à proximidade, mas também em relação ao próprio colapso de tensão.

Neste trabalho é utilizado o índice TPSI, proposto em [Gubina e Strmcnik, 1995], baseado apenas em fasores de tensão, demandando pequeno esforço computacional. É, portanto, adequado aos nossos propósitos na implementação da ONP para a reconfiguração.

A condição crítica para a operação estável de um determinado sistema será quando o valor do TPSI de alguma das barras alcançar um valor igual a zero (caso crítico), como ilustra [Gubina e Strmcnik, 1995]. Isso se reflete no valor de $\lambda^{max}$.

## 3. Fluxo de Potência Harmônico

O cálculo do fluxo de potência harmônico consiste na resolução do fluxo de potência convencional, isto é, considerando apenas a frequência fundamental e, após, na obtenção das admitâncias presentes na rede do sistema para todas as $h$ harmônicas, de acordo com seu modelo. Esses cálculos permitem montar uma matriz admitância barra para cada harmônica ($Y_{Bm}^h$) através da qual obtém-se as tensões nodais de ordem $h$ da rede ($V_{Bm}^h$) conforme o método da penetração harmônica apresentado em [Herraiz et al., 2003].

## 4. Formulação Genérica do Problema de Reconfiguração Para Aumento da Margem de Segurança de Tensão e Redução da Distorção Harmônica

O problema da reconfiguração de sistemas de distribuição pode ser formulado dentro da otimização não-linear inteira mista, com duas funções objetivo: (*i*) maximizar o carregamento da rede sem perder a estabilidade de tensão, avaliado por:

$$f_1 = \lambda_k^{max} \tag{3}$$

e (*ii*) minimizar a distorção harmônica de tensão, através da equação:

$$f_2 = \frac{1}{n}\left[\sum_{i=1}^{n} \text{THD}_{i,k}\right] \tag{4}$$

onde

$$\text{THD}_{i,k} = \frac{\sqrt{\sum_{h=h_0}^{h_{max}} |V_i^h|^2}}{|V_i^1|} \tag{5}$$

Esses objetivos são representados, em conjunto, através da equação (6). O índice de carregamento passa a ser a minimização da inversa deste, obtendo, desta forma, uma função de minimização compatível com $f_2$. No modelo foi utilizado o método da soma ponderada [Rego, 2013], que é adequado para este problema.

$$\text{Minimizar F}_k = w_1\left(\frac{1}{f_1}\right) + w_2\left(f_2\right) \tag{6}$$

https://proceedings.science/p/85454?lang=pt-br

sujeito a:
- Restrições de fluxo de carga;
- Radialidade;
- Níveis de tensão;
- Confiabilidade do sistema;
- Balanço de carga dos alimentadores.

Nas equações (3) a (6), $w_1$ e $w_2$ são, respectivamente, pesos atribuidos à primeira e à segunda parcela da função objetivo; $\lambda_k^{max}$ é o máximo carregamento da configuração $k$; $\text{THD}_{i,k}$ é a distorção harmônica total da barra $i$ na configuração $k$; $|V_i^h|$ é o módulo da tensão da barra $i$ na ordem harmônica $h$; $h_0$ e $h_{max}$ são a menor e a maior ordem harmônica, respectivamente; e $n$ é o número total de barras da rede.

No problema de reconfiguração de sistemas elétricos considera-se que em cada linha de distribuição (ramo) existe uma chave, sendo que nos ramos energizados as chaves estão fechadas (chaves de seccionamento) e nos ramos de ligação as chaves estão abertas (chaves de interconexão). Nesse contexto, reconfigurar um sistema de distribuição consiste em alterar sua topologia e, para cada nova configuração, avaliar o custo de acordo com o objetivo definido. O chaveamento, no entanto, não se dá de maneira randômica, uma vez que a radialidade é uma restrição imposta.

Um sistema é radial se sua topologia consiste em uma árvore, ou seja, não há possibilidade de existir laços na estrutura. Entretanto, devido a dificuldade de verificar a radialidade através de relações algébricas, garantir essa restrição é, contudo, um ponto conflitante do problema retratado.

## 5. Otimização por Nuvem de Partículas – ONP

A Otimização por Nuvem de Partículas é uma meta-heurística evolucionária que tem se mostrado bastante eficiente para encontrar soluções ótimas em diversos tipos de problemas, principalmente nos não-lineares na área de engenharia. Esse método foi desenvolvido por Kennedy e Eberhart [1995] inspirado no comportamento de um bando de pássaros em voo à procura de um ambiente favorável.

Essa técnica de otimização é fundamentada nas ciências sociais e da computação, sendo seus pilares descritos a seguir: [Del Valle et al., 2008]

*Conceitos Sociais:* o comportamento de cada partícula é guiado por uma ponderação da experiência própria e de suas companheiras. Nesse contexto, a comunicação dos indivíduos do enxame possui fundamental importância.

*Inteligência do enxame:* é descrita pela consideração dos princípios de (*i*) proximidade, que revela a capacidade da partícula armazenar informações de seu espaço; (*ii*) qualidade, que revela a capacidade da partícula responder à qualidade de seu ambiente; (*iii*) diversidade, que evidencia a busca por todo o espaço considerado; (*iv*) estabilidade, que impede mudanças bruscas de posição da partícula toda vez que o ambiente muda; (*v*) adaptabilidade, que mostra a capacidade da partícula em atualizar sua posição com base no seu atual local de busca.

*Características computacionais:* na ONP, cada partícula é tratada como um ponto em um espaço $d$-dimensional. O número de partículas em um enxame (ou nuvem), o número de enxames no espaço de soluções e os critérios de convergência relacionam-se diretamente à eficiência do processo de otimização.

Matematicamente, a $i$-ésima partícula é representada por sua posição e velocidade, dadas, respectivamente, por $X_i = (X_{i1}, X_{i2}, \ldots, X_{id})$ e $V_i = (V_{i1}, V_{i2}, \ldots, V_{id})$. A melhor posição já encontrada pela $i$-ésima partícula é representada como $P_i = (P_{i1}, P_{i2}, \ldots, P_{id})$. A melhor posição global de uma partícula do bando é registrada por $P_g = (P_{g1}, P_{g2}, \ldots, P_{gd})$. Os valores de fitness de $P_i$ e $P_g$, são chamados de *pbest* e *gbest*, respectivamente. Dessa forma, a dinâmica das partículas no espaço de busca se dá pelas seguintes equações:

$$V_{id} = W \cdot V_{id} + c_1 \cdot r_1(P_{id} - X_{id}) + c_2 \cdot r_2(P_{gd} - X_{id}) \tag{7}$$

$$X_{id} = X_{id} + V_{id} \tag{8}$$

https://proceedings.science/p/85454?lang=pt-br

onde $c_1$ e $c_2$ são duas constantes positivas relacionadas às componentes cognitiva e social; $r_1$ e $r_2$ são valores aleatórios com distribuição normal de média 0 e desvio padrão 1; e $W$ é o peso de inércia [Oliveira et al., 2004].

A equação (7) pode ser analisada pela sua composição em três parcelas. A primeira, referida como *componente de inércia* do enxame, modela, através do peso de inércia, a tendência da partícula em continuar na mesma direção de busca. Um peso de inércia maior influencia em uma busca mais refinada enquanto, por outro lado, um peso de inércia menor tende a levar a partícula para uma nova região. A segunda parcela, referida como *componente cognitivo*, modela a atração da partícula para sua melhor posição já encontrada. Já a terceira parcela, denominada *componente social*, revela, por sua vez, a atração da partícula pela melhor posição já encontrada por qualquer outra partícula do enxame.

### 5.1. Codificação

Um pseudocódigo para a representação da ONP é apresentado da seguinte forma:

**Pseudocódigo:** Otimização por Nuvem de Partículas

```
1  Gerar enxame inicial e configurar os parâmetros para cada partícula
2  Num_Gerações ← 1;
3  Enquanto Num_Gerações < Num_Max_Gerações, faça
4    Para cada partícula i, faça
5      Atualizar a velocidade e a posição utilizando as equações (7) e (8);
6      Se F(X_i) < F(P_i)
7        P_i ← X_i;
8        pbest ← F(X_i);
9        Se F(X_i) < F(P_g)
10         P_g ← X_i;
11         gbest ← F(X_i);
12       Fim se
13       Se F(X_i) <= Fitness ótimo
14         Sai do laço e encerra processo;
15       Fim se
16     Fim se
17   Fim para
18   Num_Gerações ← Num_Gerações + 1;
19 Fim enquanto
```

### 5.2. ONP Aplicada a Problemas Discretos

A ONP Discreta representa uma evolução do modelo anterior para o tratamento de problemas discretos, como é o caso da reconfiguração de redes, onde as chaves são representadas por números inteiros.

O desenvolvimento da ONP Discreta é semelhante ao caso contínuo apresentado, continuando, portanto, válidas as equações (7) e (8). As únicas modificações necessárias são obtidas pela discretização dos operadores utilizados no espaço de busca, visto que esse não é mais contínuo [Del Valle et al., 2008]. Assim, a posição de uma partícula é dada por um vetor cujos termos são as arestas, truncadas em valores inteiros, do espaço $d$-dimensional do enxame e seu movimento no espaço consiste apenas na troca de posições desse vetor. Já a velocidade, no caso discreto, consiste nas trocas de informações realizadas nos vetores posições das partículas, também com valores truncados em números inteiros [Oliveira et al., 2004].

## 6. Aplicação da Metodologia ao Problema de Reconfiguração de Redes Elétricas

### 6.1. Codificação

Utiliza-se um vetor para representar as chaves que estão abertas (chaves de interconexão). A codificação para a rede da Figura 2 é ilustrada na Figura 3.

https://proceedings.science/p/85454?lang=pt-br

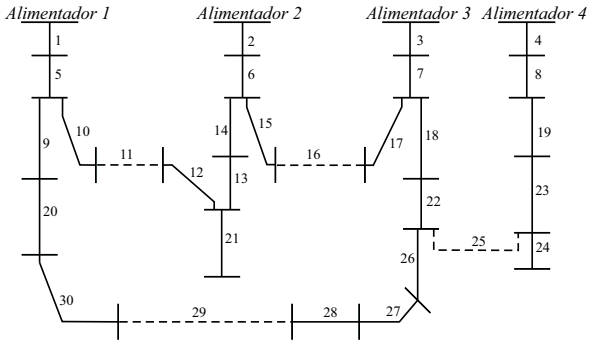



Figura 2: Rede elétrica radial.

| *Partícula* = | 11 | 16 | 25 | 29 |
|---|---|---|---|---|

Figura 3: Codificação da partícula.

### 6.2. Avaliação da Função Objetivo

Na avaliação da qualidade da função objetivo de cada configuração, utiliza-se o fluxo de potência harmônico apresentado em [Herraiz et al., 2003] que utiliza o método de varredura [Rupa e Ganesh, 2014] e a penetração harmônica para determinar as variáveis de estado da rede na presença de cargas não-lineares e obter o custo da função objetivo representada em (6).

### 6.3. Distância Entre Configurações

Sejam *conf. A* e *conf. B* duas configurações radiais da rede representada na Figura 2. Para a determinação da distância entre duas partículas adota-se o procedimento de fechar cada chave de interconexão de *conf. A*, de modo a formar um laço de chaves candidatas a serem abertas. Estas chaves formam listas de trechos *LTREC(m,n)*, em que $m$ é o número de trechos que forma o laço e $n$ é o número de chaves de interconexão.

Nessa lista procuram-se as chaves da outra partícula avaliada (*conf. B*), como ilustrado na Figura 4, e preenche-se o vetor distância começando pela chave que aparece menos vezes em *LTREC(m,n)*.

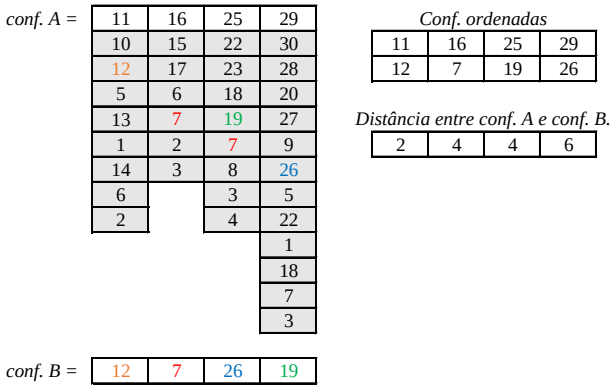



Figura 4: Distância entre duas configurações.

### 6.4. Desenvolvimento do Algoritmo ONP

*Primeira etapa*: Consiste na inicialização dos parâmetros do método.

A função aptidão de cada partícula é determinada utilizando-se (6). Os valores de $V_{id}$ são inicializados com zeros, assim como os valores máximos das listas *LTREC*.

https://proceedings.science/p/85454?lang=pt-br

*Segunda etapa*: É gerada a população inicial de partículas de forma aleatória com a finalidade de preservar a diversidade da busca. Em seguida, calcula-se a função objetivo e determinam-se $pbest$ e $gbest$ para a população inicial.

*Terceira etapa*: Para cada configuração avaliada ($X_{id}$) são calculadas as distâncias $pbest - X_{id}$ e $gbest - X_{id}$ utilizando o critério detalhado na seção 6.3. Em seguida é utilizada a equação (7). O valor desta equação é um número real e, por essa razão, torna-se necessário extrair sua parte inteira para o uso na reconfiguração que é, essencialmente, um problema discreto. Caso não se encontre alguma das chaves em *LTREC*, deve-se considerar a última chave da coluna restante para determinar a velocidade atual da partícula.

A nova posição é determinada fechando-se, uma a uma, as chaves da configuração avaliada pela equação (8), de modo a gerar laços. Com o intuito de guiar a busca no espaço de soluções é utilizada uma regra heurística apresentada por Goswami e Basu [1992]. Após, avalia-se a função objetivo e atualizam-se os valores de $pbest$ e $gbest$, reiniciando o processo da estrutura repetitiva. O processo termina quando o número de iterações alcança um valor máximo pré-estabelecido ou quando o valor de $gbest$ não se altera durante um determinado número de iterações.

Em redes de grande porte, o algoritmo pode não convergir para as soluções procuradas devido aos altos valores de $V_{id}$. Para solucionar este problema, é necessário fazer uma busca local na nova posição da partícula (configuração) utilizando uma regra heurística [Goswami e Basu, 1992] que consiste em construir uma lista de chaves que formam o laço e ordená-las de acordo com um índice de sensibilidade denominado Padrão de Fluxo Ótimo (PFO). Optou-se em percorrer uma porcentagem $(Nlocal)\%$ do número de chaves desta lista. Com essa alteração no algoritmo, foram encontradas soluções de melhor qualidade.

## 7. Resultados

A metodologia desenvolvida foi aplicada à rede da Figura 5, que possui 32 chaves de seccionamento e 5 chaves de interconexão. A potência total das cargas ativas e reativas são 3715 kW e 2300 kVAr, respectivamente [Rao et al., 2013]. Nesse sistema, foram consideradas cargas não-lineares nas barras 5, 8 e 32, modeladas como um PWM-ASD, retificador de seis pulsos de frequência variável (SPVFD) e retificador de seis pulsos (SPR), respectivamente, como mostra a Tabela 1. Os dados referentes aos espectros harmônicos de cada modelo são dados em [Esmaeili et al., 2014].

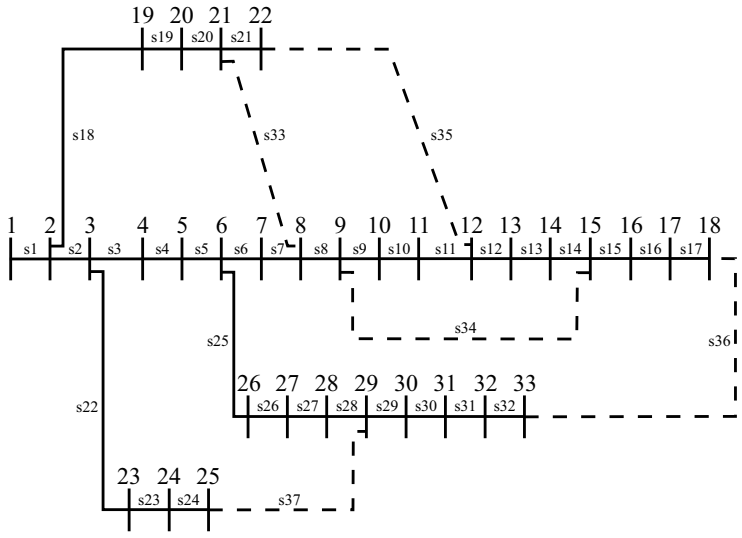



Figura 5: Sistema de distribuição radial IEEE 33 barras [Andervazh et al., 2013].

https://proceedings.science/p/85454?lang=pt-br

Tabela 1: Dados das cargas não-lineares.

| **Barra** | **Modelo da carga não-linear** | **kW** | **kVAr** |
|---|---|---|---|
| 5 | PWM-ASD | 60 | 30 |
| 8 | SPVFD | 200 | 100 |
| 32 | SPR | 210 | 100 |

No algoritmo implementado, as contantes da função objetivo, dada em (6), foram, experimentalmente, determinadas, sendo $w_1 = 0,7$ e $w_2 = 0,3$. Em situações reais, tais pesos são definidos pelo operador do sistema elétrico de acordo com a necessidade da rede. Já para as contantes das equações básicas da ONP, foram utilizados os valores dos parâmetros conforme mostra a Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros do algoritmo ONP.

| **Parâmetro** | **Valor** |
|---|---|
| Número de partículas | 50 |
| Coeficiente cognitivo | 1 |
| Coeficiente social | 2 |
| Peso de inércia | 1 |

A Tabela 3 ilustra os melhores resultados obtidos pela metodologia, com $w_1 = 0,7$ e $w_2 = 0,3$ como já indicado. Observa-se que o melhor resultado é a configuração 4 com carregamento igual a 4,0840 vezes o valor inicial das cargas e com THD igual a $5,50\%$.

Tabela 3: Resultados do processo de reconfiguração.

| **Configuração** | **Chaves abertas** | $\boldsymbol{\lambda_k^{max}}$ | **THD(%)/100** | $\mathbf{F_k}$ |
|---|---|---|---|---|
| 1 (inicial) | s33, s34, s35, s36, s37 | 3,6243 | 0,0907 | 0,1463 |
| 2 | s7, s9, s13, s23, s31 | 3,8291 | 0,0708 | 0,1279 |
| 3 | s7, s9, s13, s24, s31 | 3,9718 | 0,0606 | 0,1179 |
| 4 | s4, s14, s21, s23, s28 | 4,0840 | 0,0550 | 0,1120 |

A Figura 6 mostra o comportamento da metodologia de otimização visando o número de iterações (enxames de partículas).

A THD de cada barra calculada para a configuração inicial e a melhor configuração obtida (configuração 4) é mostrada na Figura 7. Como observa-se, após a reconfiguração, todas as barras apresentaram uma distorção harmônica significativamente menor, estabelecendo-se próxima ou abaixo de 5%. Essa atenuação da distorção harmônica permite que a IEEE-519 *standart* seja atendida pela maioria das barras do sistema.

## 8. Conclusões

A técnica Otimização por Nuvem de Partículas implementada neste trabalho constitui uma ferramenta alternativa para a solução do problema de reconfiguração de redes de distribuição visando o aumento da margem de segurança ao colapso de tensão e à minimização da distorção harmônica do sistema.

O modelo matemático proposto para a otimização multiobjetivo faz uso de índices amplamente utilizados na literatura e adequado para o problema tratado. Os valores dos pesos $w_1$ e $w_2$ da soma ponderada podem variar de acordo com as necessidades do planejamento e operação da rede elétrica.

https://proceedings.science/p/85454?lang=pt-br

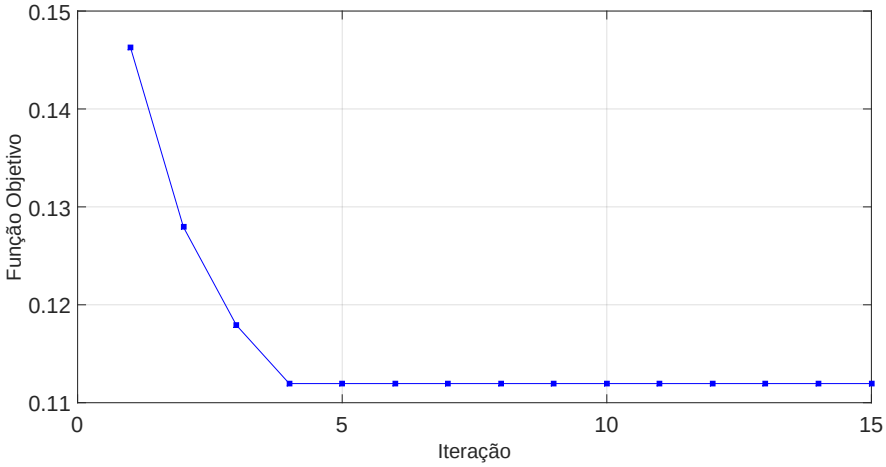



Figura 6: Convergência do processo de reconfiguração.

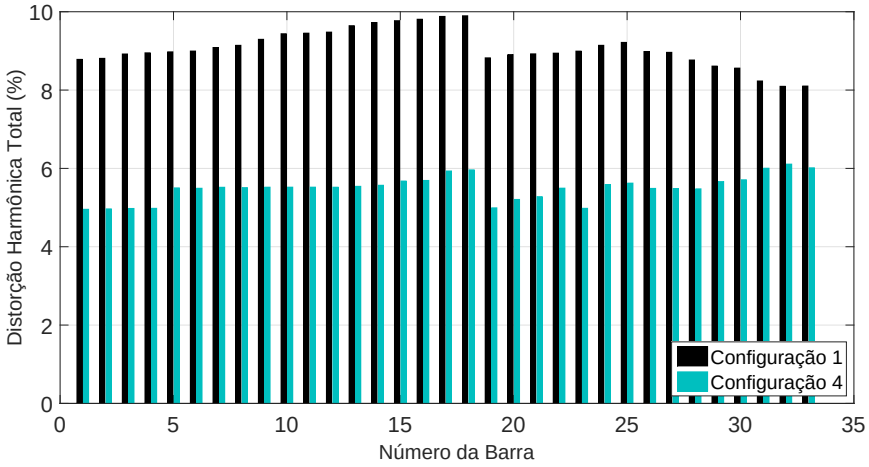



Figura 7: THD nas barras para as configurações 1 (inicial) e 4.

Os resultados obtidos mostraram a eficiência do método de reconfiguração desenvolvido, uma vez que a mudança topológica através da abertura e fechamento de chaves permitiu reduzir o nível de distorção harmônica em todas as barras, além de aumentar o máximo carregamento suportado pela rede.

A estratégia utilizada para determinar a distância entre duas soluções (partículas) foi adequada, já que permitiu utilizar o método da ONP. No algoritmo implementado, a utilização de uma regra heurística de busca local ajudou a encontrar soluções de melhor qualidade em tempos razoáveis.

Contudo, o processo de reconfiguração mostra-se interessante, pois através de chaveamentos é possível melhorar a operação e o planejamento da rede elétrica, postergando investimentos como, por exemplo, construção de novos alimentadores, instalação de subestações, bancos de capacitores, reguladores de tensão, filtros em consumidores específicos, entre outros.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal de Ouro Preto pelo suporte na realização da pesquisa.

## Referências

Andervazh, M.-R., Olamaei, J., e Haghifam, M.-R. (2013). Adaptive multi-objective distribution network reconfiguration using multi-objective discrete particles swarm optimisation algorithm

and graph theory. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 7(12):1367–1382.

Baran, M. E. e Wu, F. F. (1989). Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. *IEEE Transactions on Power delivery*, 4(2):1401–1407.

Civanlar, S., Grainger, J., Yin, H., e Lee, S. (1988). Distribution feeder reconfiguration for loss reduction. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 3(3):1217–1223.

Del Valle, Y., Venayagamoorthy, G. K., Mohagheghi, S., Hernandez, J.-C., e Harley, R. G. (2008). Particle swarm optimization: basic concepts, variants and applications in power systems. *IEEE Transactions on evolutionary computation*, 12(2):171–195.

Eminoglu, U. e Hocaoglu, M. (2007). A voltage stability index for radial distribution networks. In *Universities Power Engineering Conference, 2007. UPEC 2007. 42nd International*, p. 408–413. IEEE.

Esmaeili, S., Dehnavi, H., e Karimzadeh, F. (2014). Simultaneous reconfiguration and capacitor placement with harmonic consideration using fuzzy harmony search algorithm. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(5):3859–3871.

Ghosh, S. e Das, D. (1999). Method for load-flow solution of radial distribution networks. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, 146(6):641–648.

Goswami, S. K. e Basu, S. K. (1992). A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 7(3):1484–1491.

Gubina, F. e Strmcnik, B. (1995). Voltage collapse proximity index determination using voltage phasors approach. *IEEE transactions on power systems*, 10(2):788–794.

Guerra, W. e Romero, R. (2010). Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica para aumento da margem de segurança ao colapso de tensão utilizando busca em vizinhança variaável. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*.

Guimarães, M. A. d. N. et al. (2005). Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando algoritmos de busca tabu.

Herraiz, S., Sainz, L., e Clua, J. (2003). Review of harmonic load flow formulations. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 18(3):1079–1087.

Kennedy, J. e Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. In *IEEE International Conference on Neural Networks*, volume 4, p. 1942–1948. IEEE.

Kundur, P., Balu, N. J., e Lauby, M. G. (1994). *Power system stability and control*, volume 7. McGraw-hill New York.

Lin, W.-M., Cheng, F.-S., e Tsay, M.-T. (2000). Distribution feeder reconfiguration with refined genetic algorithm. *IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, 147(6):349–354.

Mahmoud, G. (2012). Voltage stability analysis of radial distribution networks using catastrophe theory. *IET generation, transmission & distribution*, 6(7):612–618.

Moghavvemi, M. e Faruque, M. (2001). Technique for assessment of voltage stability in ill-conditioned radial distribution network. *IEEE Power Engineering Review*, 21(1):58–60.

https://proceedings.science/p/85454?lang=pt-br

Nema, O. M. S. et al. (1996). Indice de proximidade ao colapso de tensão baseado nas perdas de potencia ativa: investigação do potencial de utilização na analise de segurança em tempo real de sistemas eletricos.

Oliveira, M., Silva, T. L., e Aloise, D. J. (2004). Otimização por nuvem de partículas: diferença entre aplicações a problemas contínuos e discretos. *Proceedings of the Brazilian Symposium on Operations Research*, p. 1517–1525.

Pujara, A. J. e Vaidya, G. (2011). Voltage stability index of radial distribution network. In *Emerging Trends in Electrical and Computer Technology (ICETECT), 2011 International Conference on*, p. 180–185. IEEE.

Raja, P., Selvan, M. P., e Kumaresan, N. (2013). Enhancement of voltage stability margin in radial distribution system with squirrel cage induction generator based distributed generators. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 7(8):898–906.

Rao, R. S., Ravindra, K., Satish, K., e Narasimham, S. (2013). Power loss minimization in distribution system using network reconfiguration in the presence of distributed generation. *IEEE transactions on power systems*, 28(1):317–325.

Rego, M. F. (2013). Algoritmos multiobjetivos para o problema de sequenciamento de tarefas em uma máquina com tempo de preparação dependente da sequência e da família. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

Rupa, J. M. e Ganesh, S. (2014). Power flow analysis for radial distribution system using backward/forward sweep method. *International Journal of Electrical, Computer, Electronics and Communication Engineering*, 8(10):1540–1544.

Shirmohammadi, D. e Hong, H. W. (1989). Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 4(2):1492–1498.

Taylor, C. W. (1994). *Power system voltage stability*. McGraw-Hill.

Vinothkumar, K. (2011). Investigations on distributed generation planning and certain grid interaction issues of wind turbine generation system. *Tiruchirappalli: National Institute of Technology*.

https://proceedings.science/p/85454?lang=pt-br