

RECONFIGURAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRÁVÉS DE UM ALGORITMO DE BUSCA DISPERSA

Diogo Rupolo

diogorupolo@hotmail.com.br

José Roberto Sanches Mantovani

mant@dee.feis.unesp.br

Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica – LaPSEE
Departamento de Engenharia Elétrica – UNESP – Ilha Solteira
Avenida Brasil, 56 – Centro
15.385-000 ILHA SOLTEIRA, SP, BRASIL

RESUMO

Neste trabalho propõe-se um algoritmo baseado na meta-heurística busca dispersa para o problema de reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica, considerando como sistema de codificação a representação nó profundidade. O problema é modelado como não linear inteiro misto e considera como objetivo principal minimizar as perdas de potência ativa nos alimentadores do sistema de distribuição. O algoritmo proposto é implementado em linguagem de programação C++ e testado em três sistemas conhecidos na literatura, 14, 84 e 135 barras. A partir dos resultados obtidos, verifica-se o bom desempenho do algoritmo, pois gera soluções de boa qualidade atendendo a todas as restrições do problema.

PALAVRAS CHAVE. Reconfiguração de redes de distribuição. Busca Dispersa.

Área Principal: EN - PO na Área de Energia.

ABSTRACT

In this paper it is proposed a scatter search algorithm to solve the electric power distribution system reconfiguration problem, considering the encoding system node depth representation. The problem is a mixed-integer nonlinear programming and the objective is to minimize the real power losses in the distribution system feeders. The proposed algorithm is implemented in C + +. The validity of the methodology is verified through three commonly case studies such as 14, 84 and 135 bus system. Results show the effectiveness and good performance of the proposed algorithm, where it obtains the good quality solution satisfying the constraints.

KEYWORDS. Reconfiguration of distribution networks. Scatter Search.

Main area: EN – OR Area of energy.

1. Introdução

Os sistemas de distribuição de energia elétrica geralmente apresentam estruturas malhadas e operam de forma radial para a obtenção de baixas correntes de curto-circuitos e redução de custo com equipamentos de controle e proteção. Esta configuração fracamente malhada permite reconfigurações da rede para redução de perdas, em caso de contingências (processo de restauração da rede de distribuição), como também no caso de realização de manutenções preventivas. A alteração de topologia para fins de reconfiguração da rede de distribuição para melhorar a regulação de tensão e reduzir as perdas pode ocorrer em horários de picos e semanalmente, de acordo com a sazonalidade, ou devido à natureza das várias cargas que compõem os alimentadores (comerciais, industriais e residenciais) (AMASIFEN, 2003).

A reconfiguração de redes aéreas de distribuição de energia elétrica é um problema de programação não linear inteiro misto (PNLIM) de natureza combinatória, que apresenta espaço de busca de soluções praticamente infinito para sistemas de distribuição reais. A restrição de radialidade é um dos fatores complicantes do problema, pois não é possível representar esta restrição utilizando relações algébricas simples e, portanto, tornando muito difícil o uso de algoritmos baseados em técnicas de otimização clássica.

Para a solução deste PNLIM são propostas na literatura diversas técnicas heurísticas e meta-heurísticas e algumas metodologias que exploram a utilização conjunta destas duas técnicas. Merlin e Back (1975) apresentaram duas propostas de solução, uma heurística construtiva e um algoritmo de otimização clássico para obter um estado de minimização de perdas. Civanlar et al. (1988) conduziram pesquisas no campo de minimização de perdas em sistemas de distribuição através de técnicas heurísticas para obter propostas de reconfiguração de redes, alterando a sua topologia operacional. No ano seguinte Baran e Wu (1989) modelaram o problema de reconfiguração e balanceamento de cargas entre alimentadores como um problema de programação inteira. Nara et al. (1992) utilizaram algoritmo genético para encontrar a configuração que possui menores perdas. Goswami et al. (1992) e Shirmohammadi (1989) apresentaram um método de fluxo de potência utilizando um algoritmo heurístico capaz de encontrar a configuração de menores perdas em um sistema de distribuição radial. Embora o problema tenha sido intensamente pesquisado, os diversos métodos e modelos apresentam a necessidade de melhorar o tempo de processamento e o uso de modelos mais realistas dos sistemas de distribuição para que se possam obter resultados satisfatórios e voltados para as reais condições de operação dos sistemas.

Neste trabalho propõe-se a utilização de um algoritmo de busca dispersa para o problema de reconfiguração de sistemas de energia elétrica, utilizando uma codificação denominada representação nó profundidade (RNP), (DELBEM, 2004). Para contornar a restrição de radialidade, uma das mais complexas do problema, utilizam-se os operadores PAO (*Preserve Ancestor Operator*) e CAO (*Change Ancestor Operator*) da representação nó profundidade, que permitem gerar topologias sempre radiais. Desta forma, a restrição de radialidade no sistema de distribuição é sempre preservada, não sendo necessário incluir no algoritmo sub-rotinas que verifiquem a formação de laços, como também não é necessária a verificação da existência de barras ilhadas no sistema.

O Operador PAO também é utilizado como critério de busca em vizinhança no algoritmo de busca dispersa. Para a combinação de soluções, utiliza-se o operador EHR (*Evolutionary History Recombination*) proposto por Sanches (2013) que também permite gerar uma combinação de duas soluções mantendo sempre a radialidade do sistema. Tais operadores são utilizados no processo de busca da meta-heurística. O desempenho do algoritmo de busca dispersa proposto para o problema de reconfiguração de redes de distribuição é avaliado através de testes em 3 sistemas da literatura: 14 barras Cinvalar et al. (1988), 84 barras Chiou et al. (2005) e 135 barras Mantovani et al. (2000).

O presente trabalho está estruturado da seguinte forma: a seção 1 é introdutória e apresenta uma breve descrição do problema de reconfiguração com a revisão bibliográfica dos principais trabalhos nesta área. A seção 2 apresenta a descrição do problema de reconfiguração juntamente com seu modelo matemático. A seção 3 apresenta a meta-heurística busca dispersa e o

algoritmo proposto para o problema de reconfiguração. A seção 4 apresenta os resultados do algoritmo. A seção 5 apresenta as considerações finais e os trabalhos futuros a serem realizados.

2. Formulação Geral do problema de Reconfiguração

O problema de reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica é um problema de Programação Não Linear Inteiro Misto (PNLIM). A reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica consiste na alteração da topologia da rede através dos estados (aberto/fechado) de chaves seccionadoras e de interconexões que se localizam em pontos estratégicos da rede.

Os objetivos principais dos problemas de reconfiguração e restauração de redes de distribuição são: minimizar as perdas ativas nos alimentadores, melhorar o perfil de tensão para os consumidores, aumentar os níveis de confiabilidade, eliminar ou isolar faltas restaurando o fornecimento de energia, isto é, buscar uma condição ótima de operação das redes de distribuição sem nenhuma violação nos limites de carregamento e de queda de tensão nos alimentadores (AMASIFEN, 2003).

Os sistemas de distribuição de energia elétrica podem ser representados através de grafos. Em uma determinada configuração do sistema de distribuição, do ponto de vista da teoria dos grafos, têm-se os ramos que estão energizados, os quais formam a configuração radial do sistema chamado de ramos de árvore e os circuitos que não estão energizados, denominados ramos de ligação. Considera-se que em cada ramo, ou seja, entre cada barra do sistema, exista uma chave, tal que nos ramos energizados estas chaves estão fechadas (chaves seccionadoras) e nos ramos de ligação as chaves estão abertas (chaves de interconexões). A Figura 1 ilustra um sistema de distribuição radial (SDR) de 14 barras com 13 chaves seccionadoras e 3 chaves de interconexões.

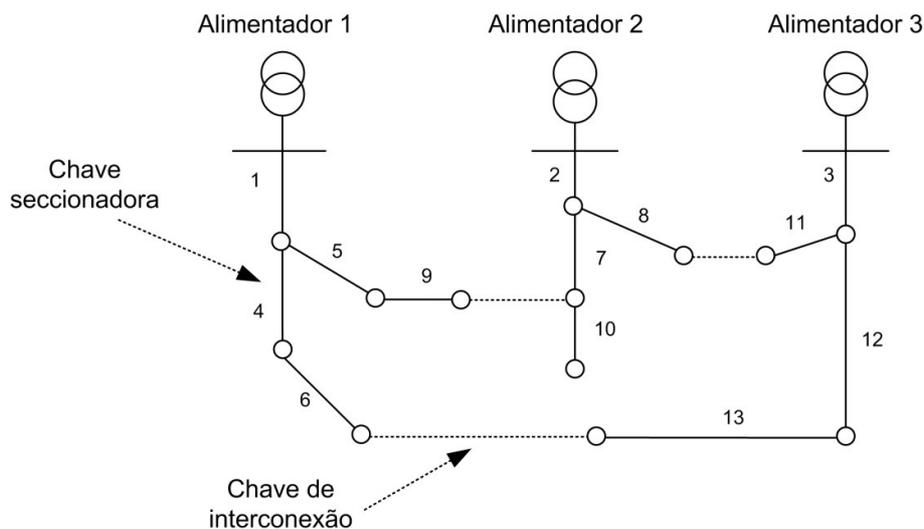


Figura 1: Sistema de distribuição de 14 barras (Amasifen, 2003).

Uma troca adequada de uma chave seccionadora por uma chave de interconexão, ou seja, uma operação de chaveamento gera outra topologia radial do sistema, conseqüentemente uma reconfiguração do sistema de distribuição.

O problema de reconfiguração de redes de distribuição busca obter dentre todas as configurações possíveis, aquela que tem menor perda de energia e satisfaça um conjunto de restrições, tais como fluxo de corrente máxima entre ramos, radialidade do sistema, máxima variação de tensão nos pontos de carga e máximo fluxo de potência ativa nos alimentadores. De forma geral o problema de reconfiguração de redes pode ser escrito como:

$$\text{Min } P_k = \sum_{ij=1}^{N_R} (R_{ij} \cdot I_{ij}^2) \quad (1)$$

s.a:

$$P_{S_i} - P_{d_i} - \sum_{(j \in \Omega_{bi})} (x_{ij} P_{ij}) = 0 \quad \forall i \in \Omega_b \quad (2)$$

$$Q_{S_i} - Q_{d_i} - \sum_{(j \in \Omega_{bi})} (x_{ij} Q_{ij}) = 0 \quad \forall i \in \Omega_b \quad (3)$$

$$V_{min} \leq V \leq V_{max} \quad \forall i \in \Omega_b \quad (4)$$

$$x_{ij} (P_{ij}^2 + Q_{ij}^2) \leq \overline{S_{ij}^2} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (5)$$

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

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

em que:

- P_k : perdas ativas em todos os ramos da configuração k ;
- R_i : resistência do i -ésimo ramo da configuração k ;
- I_i : corrente do i -ésimo ramo da configuração k ;
- N_R : número de ramos da configuração k ;
- P_{S_i} : potência ativa fornecida pela subestação da barra i ;
- P_{d_i} : demanda de potência ativa na barra i ;
- Q_{S_i} : potência reativa fornecida pela subestação da barra i ;
- Q_{d_i} : demanda de potência reativa na barra i ;
- P_{ij} : fluxo de potência ativa que sai da barra i para a barra j ;
- Q_{ij} : fluxo de potência reativa que sai a barra i para barra j ;
- x_{ij} : variável binária que determina se o circuito entre as barras i e j está aberto ou fechado;
- Ω_b : conjunto de barras;
- Ω_{bi} : conjunto de barras conectadas na barra i ;
- Ω_l : conjunto de circuitos;
- n_b : número de barras do sistema ($n_b = |\Omega_b|$);
- V_{min} : tensão mínima na barra i ;
- V_{max} : tensão máxima na barra i ;
- V_i : tensão na barra i ;
- S_{ij} : fluxo de potência aparente nos circuitos ij ;

A equação (1) representa a função objetivo do problema que é a minimização das perdas ativas nos alimentadores do sistema de distribuição. As equações (2) e (3) representam a primeira e segunda lei de Kirchoff que devem ser mantidas com vistas a atender as demandas de potência ativa e reativa do sistema. A equação (4) representa a restrição do nível de tensão permitido pelas normas reguladoras dos sistemas elétricos. A equação (5) representa o fluxo máximo de corrente nos circuitos. Essa restrição está relacionada com a máxima intensidade de corrente que pode circular pelo condutor elétrico. A equação (6) representa a variável de decisão binária do problema, na qual pode-se assumir os estados aberto ou fechado. A equação (7) juntamente com as restrições (2) e (3) garantem a restrição de radialidade do sistema.

3. Técnica de Solução

A técnica de solução proposta para o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica é um algoritmo baseado na meta-heurística busca dispersa juntamente com os operadores PAO, CAO (DELBEM, 2004) e EHR (SANCHES, 2013). Estes operadores são projetados através da representação nó profundidade e permitem realizar a transferência de barras entre os alimentadores, quando aplicados a uma topologia do sistema distribuição radial, gerando sempre configurações radiais. As configurações obtidas através destes operadores são avaliadas através de um fluxo de carga do tipo varredura direta e inversa (SHIRMOHAMMAD, 1988).

3.1. A meta-heurística Busca Dispersa

A meta-heurística Busca Dispersa (BD) é um método de busca evolucionário proposto na década de 70, que utiliza estratégias de intensificação e diversificação, mostrando-se eficaz para diversos tipos de problemas de otimização (LAGUNA, 2002). A busca dispersa utiliza uma sucessão de soluções iniciais coordenadas para gerar outras soluções. A proposta original da busca dispersa foi introduzida por Fred Glover em 1977, como uma heurística para resolver problemas de programação inteira. Nesta proposta Glover propõe que as soluções sejam geradas levando em conta as características de várias partes do espaço de busca.

A busca dispersa apesar de ser um método evolutivo, difere do algoritmo genético, pois se baseia em características determinísticas (embora possa ser utilizada aleatoriedade controlada), enquanto o algoritmo genético baseia-se em características aleatórias. Outra diferença fundamental é que a busca dispersa trabalha com um conjunto com poucas soluções, enquanto que nos algoritmos genéticos trabalha-se com a população inicial que possui dimensão relativamente grande. A busca dispersa opera com o conjunto de referência, que é denominado de *RefSet*, o qual combina suas soluções para gerar outras. A combinação dessas soluções tem por objetivo gerar melhores direções de busca, consequentemente melhores soluções.

A filosofia da primeira versão da busca dispersa pode ser visualizada no conjunto de referência da Figura 2, que traz consigo a ideia central do algoritmo. As soluções *A*, *B* e *C* são as soluções que possuem características de diferentes partes do espaço de busca e que compõem o conjunto de referência. De maneira sistemática, através do *RefSet* são formados os subconjuntos $\{A, B\}$, $\{A, C\}$, $\{C, B\}$ e $\{A, B, C\}$ e são realizadas combinações convexas entre esses subconjuntos formando os pontos 1, 2, 3 e 4 respectivamente. Essas novas soluções coordenadas geradas, juntamente com os subconjuntos criados anteriormente, são utilizadas para criar as novas soluções, 5, 6, 7, 8, 9 e 10. Por fim um método de melhoria local é aplicado nessas soluções, gerando os pontos 11, 12, 13, 14, 15 e 16.

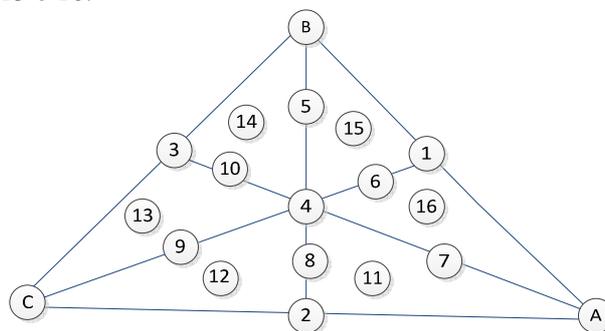


Figura 2: Proposta original da meta-heurística busca dispersa (Laguna, 2002).

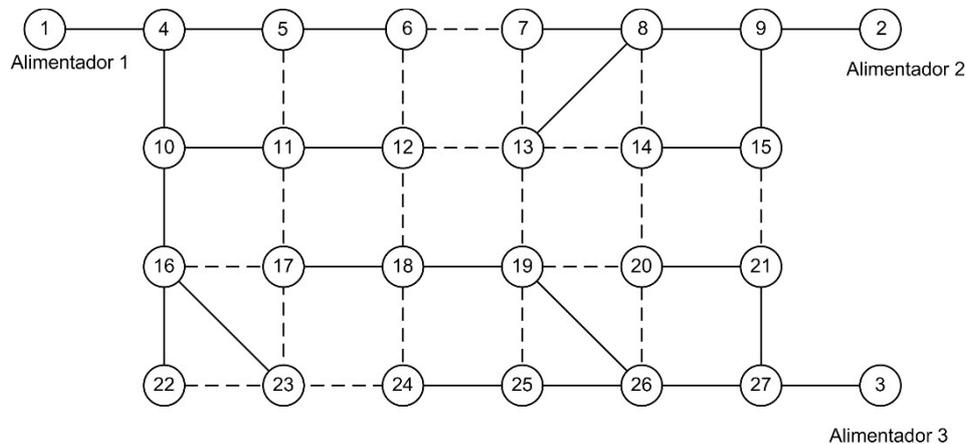
3.2. Codificação

A codificação utilizada é de fundamental importância para encontrar boas soluções para qualquer problema através de meta-heurísticas. Com o intuito de utilizar os operadores PAO e CAO que geram configurações sempre radiais, quando aplicados a uma topologia radial do sis-

tema de distribuição, faz-se uso da codificação denominada representação nó profundidade, pois os sistemas de distribuição radiais de energia elétrica podem ser representados através de grafos.

Algumas vantagens da RNP e seus operadores são: produzem exclusivamente configurações factíveis (do ponto de vista de sistemas de distribuição de energia elétrica, sempre geram configurações radiais); comparadas com outras estruturas, a RNP pode gerar mais configurações factíveis em um mesmo período de tempo; apresenta complexidade computacional de ordem $O\sqrt{n}$, onde n é o número de vértices do grafo; as configurações geradas pela RNP são ordenadas de acordo com o Modelo Pai Filho (MPF), possibilitando a execução de um algoritmo de fluxo de carga tipo varredura direta e inversa.

A RNP é baseada numa proposta de uma lista de dimensão, $2 \times n$ onde n é a quantidade de nós do grafo. A lista é formada por pares do tipo (n_x, p_x) , onde n_x representa o nó do grafo e p_x sua respectiva profundidade. Na Figura 3 ilustra-se a representação de um sistema de distribuição radial através de grafos e sua codificação de acordo com a representação nó profundidade. Inicialmente é armazenada a profundidade em relação aos nós raízes dos alimentadores, nó número 1, 2 e 3, referente aos alimentadores 1, 2 e 3 respectivamente. As demais profundidades são calculadas em relação ao nó raiz de cada alimentador, ou seja, a distância que cada nó está do nó raiz.



Alimentador 1:	Nó	[1 4 5 6 10 11 12 16 22 23]
	Prof	[0 1 2 3 2 3 4 3 4 4]
Alimentador 2:	Nó	[2 9 15 14 8 7 13]
	Prof	[0 1 2 3 2 3 3]
Alimentador 3:	Nó	[3 27 21 20 26 19 18 17 25 24]
	Prof	[0 1 2 3 2 3 4 5 3 4]

Figura 3: Ilustração dos alimentadores de um SDR com sua respectiva RNP (Santos, 2009).

Assim cada topologia do sistema de distribuição radial pode ser codificada pela representação nó profundidade. A ordem em que nó e profundidade são considerados na lista é de grande importância, pois, caso contrário, a representação nó profundidade do sistema de distribuição fica incorreta. Os operadores PAO e CAO fazem uso dessa codificação para gerarem outras topologias radiais com vistas a encontrar uma topologia com menores perdas possíveis. Para uso dos operadores da representação nó profundidade faz-se também necessário uma lista de adjacência dos nós do sistema de distribuição, a qual é mostrada na Tabela 1.

A lista de adjacência mostra as possíveis conexões entre barras de um mesmo alimentador e as possíveis conexões das barras entre alimentadores diferentes, ou seja, quando aplicados os operadores da representação nó profundidade, PAO e CAO, a transferência de barras entre os alimentadores e as conexões de barra em um mesmo alimentador deve obedecer às conexões impostas pela lista de adjacência.

Tabela 1: Lista de adjacência do grafo da Figura 3.

Nó	Nós adjacentes	Nó	Nós adjacentes	Nó	Nós adjacentes
1	4	10	4-11-16	19	13-18-20-25-26
2	9	11	5-10-12-17	20	14-19-21-26
3	27	12	6-11-13-18	21	15-20-27
4	1-5-10	13	7-8-12-14-19	22	16-23
5	4-6-11	14	8-13-15-20	23	16-17-22-24
6	5-7-12	15	9-14-21	24	18-23-25
7	6-8-13	16	10-17-22-23	25	19-24-26
8	7-9-13-14	17	11-16-18-23	26	19-20-25-27
9	2-8-15	18	12-17-19-24	27	3-21-26

3.3. Algoritmo de busca dispersa proposto

O algoritmo de busca dispersa é formado por cinco etapas fundamentais: etapa de geração de soluções com diversificação, etapa de melhoria local, etapa de construção e atualização do conjunto de referência, etapa de geração de subconjuntos e etapa de combinação. Nessas etapas são utilizados os operadores PAO, CAO e EHR da representação nó profundidade com a finalidade de encontrar soluções de boa qualidade para o problema da reconfiguração. A Figura 4 apresenta o diagrama de blocos do algoritmo de busca dispersa proposto para o problema de reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica e a seguir são detalhadas as etapas utilizadas neste processo.

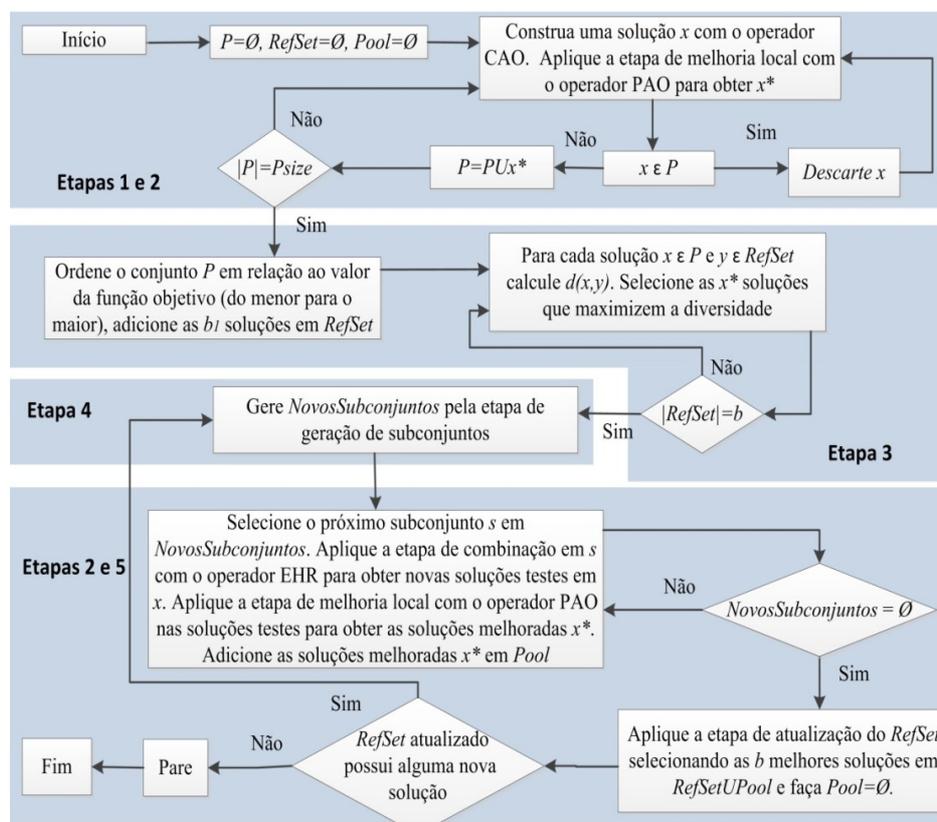


Figura 4: Ilustração do algoritmo de busca dispersa proposto.

3.3.1. Etapa 1: Geração de soluções com diversificação

A etapa 1 é a base inicial do algoritmo, na qual gera-se um conjunto P de dimensão $PSize$, o qual é a população inicial. Emprega-se randomização controlada para gerar o conjunto P com soluções que atendam aos critérios de qualidade e diversidade.

Iniciando de uma topologia inicial radial do sistema de distribuição, utiliza-se o operador CAO, com a finalidade de gerar configurações radiais até que a dimensão do conjunto $P = Psize$. Tal operador realiza a transferência de barras entre os alimentadores da rede de distribuição, respeitando as conexões da lista de adjacência (SANTOS, 2009).

Como uma das características fundamentais da busca dispersa é a diversidade utilizada na construção do conjunto inicial de soluções, utiliza-se uma divisão de k intervalos para a geração de soluções através do operador CAO, onde k representa a quantidade de alimentadores do sistema de distribuição. Tal divisão permite o operador CAO gerar a mesma quantidade de soluções dentro de um determinado intervalo. Portanto ao aplicar o operador CAO da RNP, utilizando uma aleatoriedade controlada, está-se percorrendo um espaço de busca mais disperso para gerar o conjunto P , gerando uma relação de diversidade entre as soluções.

Após todas as soluções do conjunto P inicial serem geradas, aplica-se a etapa de melhoria local (etapa 2) nas $PSize$ soluções, visando encontrar uma solução de melhor qualidade em relação ao valor da função objetivo na vizinhança da solução base. Para avaliar a qualidade das soluções, utiliza-se um fluxo de carga baseado no método de varredura direta e inversa de Shirmohammad (1988). A solução que possui o melhor valor da função objetivo é utilizada para substituir a solução inicial do conjunto P . Do conjunto P é extraído o conjunto *RefSet* de maneira determinística.

3.3.2. Etapa 2: Melhoria local:

A etapa 2, de melhoria local é utilizada na construção inicial do conjunto P e após o método de combinação para encontrar soluções de melhor qualidade em relação ao valor da função objetivo. O método de melhoria local consiste em fazer uma pequena perturbação na codificação existente, procurando na vizinhança da solução uma topologia do sistema de distribuição que possa minimizar o valor da função objetivo, isto é, procurar soluções que possuam perdas mínimas de potência ativa na vizinhança de outra topologia. Esse processo provoca a intensificação da busca por melhores soluções em uma determinada região.

Neste processo é utilizado o operador PAO da representação nó profundidade, pois o mesmo produz transferências simples de barras entre os alimentadores, quando aplicado em um sistema de distribuição (SANTOS, 2009). As transferências com esse operador preserva o conceito de pequena perturbação na topologia corrente. Determina-se sempre uma quantidade de soluções a ser gerada na vizinhança da solução base, de modo que essa quantidade permita verificar que nenhuma solução melhor possa ser encontrada. Por fim verifica-se a melhor solução encontrada para minimizar o valor da função objetivo.

3.3.3. Etapa 3: Atualização do conjunto de referência

A etapa 3 é responsável pela construção e atualização do conjunto de referência, denominado *RefSet*. O *RefSet* armazena soluções de qualidade e diversidade que são utilizadas para gerar novas soluções no método de combinação. O conjunto de referência é extraído do conjunto P gerado na etapa de geração de soluções com diversificação (etapa 1). A dimensão do conjunto de referência é denotada por $b = b_1 + b_2$, onde b_1 são as soluções escolhidas pelo critério de qualidade e b_2 são as soluções escolhidas pelo critério de diversidade.

Para a construção do *RefSet* é realizada a ordenação do conjunto P em relação ao valor da sua função objetivo, $P = \{x_1, x_2, \dots, x_{PSize}\}$, onde $f(x_1) < f(x_2), \dots, < f(PSize)$, sendo a primeira solução do conjunto x_1 a solução de melhor qualidade em relação às outras soluções do conjunto P , e x_{PSize} a solução de pior qualidade do conjunto P , de forma que as soluções de melhor qualidade b_1 são incluídas no conjunto *RefSet*, proporcionando qualidade ao conjunto.

Após inserir qualidade no conjunto *RefSet*, incluem-se as b_2 soluções através do critério de diversidade. Para incluir diversidade comparam-se as $(Psize - RefSet)$ soluções com as b_1 soluções que estão em *RefSet*. Como critério de diversidade, ou seja, para calcular a relação de dissimilaridade entre duas soluções, é utilizada a quantidade de barras que trocam de alimentador de uma determinada topologia para outra do sistema de distribuição, quando aplicado o operador

CAO da RNP. As Figuras 5 e 6 ilustram essa relação de diversidade. A Figura 5 representa a codificação de um sistema de distribuição codificado pela RNP, sendo que T_k representa os alimentadores desse sistema.

$$T_1: \begin{bmatrix} 1 & 4 & 5 & 6 & 10 & 11 & 12 & 16 & 22 & 23 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 2 & 3 & 4 & 3 & 4 & 4 \end{bmatrix} \quad T_2: \begin{bmatrix} 2 & 9 & 15 & 14 & 8 & 7 & 13 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 2 & 3 & 3 \end{bmatrix}$$

$$T_3: \begin{bmatrix} 3 & 27 & 21 & 20 & 26 & 19 & 18 & 17 & 25 & 24 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 2 & 3 & 4 & 5 & 3 & 4 \end{bmatrix}$$

Figura 5: Codificação de um SDR segundo a RNP.

$$T_1: \begin{bmatrix} 1 & 4 & 5 & 6 & 10 & 16 & 22 & 23 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 2 & 3 & 4 & 4 \end{bmatrix} \quad T_2: \begin{bmatrix} 2 & 9 & 15 & 14 & 8 & 7 & 13 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 2 & 3 & 3 \end{bmatrix}$$

$$T_3: \begin{bmatrix} 3 & 27 & 21 & 20 & 26 & 19 & 18 & 17 & 11 & 12 & 25 & 24 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 3 & 4 \end{bmatrix}$$

Figura 6: Codificação de um SDR após a aplicação do operador CAO da RNP.

A distância de dissimilaridade é calculada proporcionalmente pelas barras que foram transferidas entre os alimentadores das duas codificações após a aplicação do operador CAO da RNP. Pode-se verificar que os nós 11 e 12 do alimentador T_1 da Figura 5, foram transferidos para o alimentador T_3 da Figura 6. Portanto o alimentador T_1 da Figura 5 possui 2 barras diferentes do alimentador T_1 da Figura 6 (nós 11 e 12). Da mesma forma o alimentador T_3 da Figura 6 possui 2 barras diferentes (nós 11 e 12) do alimentador T_3 da Figura 5. Enquanto isso o alimentador T_2 possui a mesma configuração nas duas topologias. Dessa forma, calcula-se a relação de dissimilaridade (diversidade) entre as duas soluções utilizando essa relação, ou seja, a quantidade de barras diferentes entre os alimentadores de duas topologias. Sendo x a solução da Figura 5 e y a solução da Figura 6, define-se o critério de diversidade como a distância das duas soluções: $d(x, y) = 4$.

A atualização do *RefSet* é feita através de um processo iterativo. Este processo compreende o conjunto de referência, o método de combinação, o método de geração de subconjuntos e o método melhoria local, com o objetivo de encontrar soluções de melhor qualidade.

3.3.4. Etapa 4: Geração de subconjuntos

A etapa 4 consiste em gerar subconjuntos através do *RefSet* com o objetivo de serem utilizados na etapa de combinação. Geram-se todos os subconjuntos possíveis, utilizando duas soluções do conjunto *RefSet*.

Nesta etapa também é criado o conjunto *NovosSubconjuntos* que armazena todos os subconjuntos criados. Essa etapa termina quando todas as soluções possíveis foram agrupadas, isto é, quando todas as topologias do sistema de distribuição foram selecionadas duas a duas formando subconjuntos para serem submetidas à etapa de combinação.

3.3.5. Etapa 5: Combinação

A etapa 5 utiliza os subconjuntos gerados na etapa de geração de subconjuntos (etapa 4) para criar novas soluções denominadas soluções testes, através de uma combinação convexa de grafos. Na etapa de combinação utiliza-se o operador EHR. Este operador utiliza uma combinação de duas soluções, o que permite gerar sempre outra solução com topologia radial para o sistema de distribuição, contendo características das duas soluções combinadas (SANCHES, 2013).

Depois de combinadas, essas soluções testes passam pela etapa de melhoria local (etapa 2) e são armazenadas no conjunto *Pool*. Essa etapa termina quando todos os subconjuntos possíveis foram combinados e o *RefSet* foi atualizado. O *RefSet* é atualizado com as b melhores soluções dos conjuntos *RefSetUPool*.

Como critério de convergência do algoritmo, verifica-se se após a união dos conjuntos *RefSet* e *Pool* ainda existem soluções que não foram combinadas em etapas anteriores. Também pode ser utilizado um número máximo de iterações para as etapas sequenciais de constru-

ção/atualização do conjunto de referência, geração de novos subconjuntos, combinação, e melhoria local, que compreendem o processo iterativo do algoritmo.

4. Resultados

O algoritmo de busca dispersa dedicado à solução do problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica foi implementado em linguagem de programação C++ e simulado utilizando um microcomputador com processador Intel Core i7 com 4 GB de memória RAM. Para validar a metodologia proposta foram utilizados testes nos sistemas de 14 barras Cinvalar et al. (1988), 84 barras Chiou et al. (2005) e 135 barras Mantovani et al. (2000), comumente usados na literatura.

Para determinar os parâmetros do algoritmo de busca dispersa, P , b , b_1 e b_2 , foram realizados vários testes usando dimensões variadas destes conjuntos. No conjunto P utilizou-se 50, 100 e 200 soluções como parâmetros. No conjunto de referência utilizou-se como parâmetros $b = 10, 16$ e 20 soluções, sendo que foram utilizadas 50% de soluções de qualidade (b_1) e 50% de soluções de diversidade (b_2). Destaca-se que todos os parâmetros testados convergiram encontrando as melhores soluções quando comparadas com as soluções da literatura. Com vistas a obter robustez e eficiência computacional decidiu-se utilizar os seguintes parâmetros: dimensão do conjunto $P = 50$; dimensão do conjunto de referência $b = 10$, sendo composto de 5 soluções de qualidade (b_1) e 5 soluções de diversidade (b_2).

Nas seções seguintes são mostradas a configuração inicial (C.I) e as 5 melhores configurações encontradas para cada sistema, com a respectiva porcentagem de redução de perdas em relação à configuração inicial.

4.1. Sistema de 14 barras

Sistema de 14 barras com 3 alimentadores, 13 chaves seccionadoras, 3 chaves de interconexões, tensão de 23 kV e potência base de 100 MVA. Os resultados obtidos através do algoritmo de busca dispersa são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Resultado da reconfiguração do sistema de 14 barras.

Nº.	Chaves abertas	Perdas (kW)	% Redução de Perdas
C.I.	13-14-15	511,43	
01	7-8-15	466,12	8,86%
02	4-7-8	479,29	6,28%
03	7-13-15	483,87	5,39%
04	7-8-12	492,93	3,62%
05	8-14-15	493,15	3,57%

A melhor solução apresenta perdas mínimas de potência de 466,12 kW, a mesma solução encontrada em Cinvalar et al. (1988), como a melhor da literatura. O limite da magnitude de tensão mínima foi de 0,971 pu. O tempo de processamento do algoritmo foi de 9,928 segundos.

4.2. Sistema de 84 barras

Sistema de 84 barras com 11 alimentadores, 83 chaves seccionadoras, 13 chaves de interconexões, tensão de 11,4 kV e potência base de 100 MVA. Os resultados obtidos através do algoritmo de busca dispersa são apresentados na Tabela 3.

A melhor solução apresenta perdas mínimas de potência de 469,87 kW, a mesma solução encontrada em Chiou et al. (2005) como a melhor da literatura. O limite da magnitude de tensão mínima foi de 0,955 pu e o tempo de processamento do algoritmo foi de 13,897 segundos.

Tabela 3: Resultado da reconfiguração do sistema de 84 barras.

Nº.	Chaves abertas	Perdas (kW)	% Redução de Perdas
C.I	84-85-86-87-88-89-90-91-92-93-94-95-96	531,99	
01	7-13-34-39-42-55-62-72-83-86-89-90-92	469,87	11,68%
02	7-13-34-39-42-55-61-72-83-86-89-90-92	469,97	11,66%
03	7-13-34-39-95-55-61-72-83-86-89-90-92	470,00	11,65%
04	7-13-34-39-42-55-63-72-83-86-89-90-92	470,05	11,64%
05	13-34-39-42-55-62-72-83-84-86-89-90-92	470,08	11,63%

4.3. Sistema de 135 barras

Sistema de 135 barras com 8 alimentadores, 135 chaves seccionadoras, 21 chaves de interconexões, potência base de 100 MVA e tensão de 13,8 kV. Na Tabela 4 são mostradas as melhores configurações encontradas.

Tabela 4: Resultado da reconfiguração do sistema de 135 barras.

Nº.	Chaves abertas	Perdas (kW)	% Redução de perdas
C.I.	136-137-138-139-140-141-142-143-144-145-146-147-148-149-150-151-152-153-154-155-156	320,35	
01	7-35-51-90-96-106-118-126-135-137-138-141-142-144-145-146-147-148-150-151-155	280,17	12,54%
02	7-51-53-84-90-96-106-118-126-137-138-139-141-144-145-147-148-150-151-155-156	280,20	12,53%
03	7-35-51-55-90-96-106-118-126-135-137-138-141-144-145-146-147-148-150-151-155	280,28	12,51%
04	7-35-51-90-96-106-118-126-135-137-138-142-144-145-146-147-148-150-151-152-155	280,30	12,50%
05	7-38-51-53-84-90-96-106-118-126-128-137-138-141-144-145-156-147-148-150-151	280,32	12,49%

A melhor solução apresenta perdas mínimas de potência de 280,17 kW, a mesma solução encontrada Carreño et al. (2007), conhecida como a melhor da literatura. O limite da magnitude de tensão mínima foi de 0,958 pu e o tempo de processamento do algoritmo foi de 17,093 segundos.

5. Conclusões

Neste trabalho foi proposto um algoritmo baseado na meta-heurística busca dispersa para a solução do problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica, considerando como sistema de codificação a representação nó profundidade. Os resultados mostram soluções de boa qualidade, atendendo a todas as restrições físicas e operacionais do problema.

Os operadores PAO, CAO e EHR da representação nó profundidade são adequados para a estrutura e filosofia do algoritmo de busca dispersa produzindo somente soluções radiais, ou seja, eliminando as soluções malhadas que são indesejáveis. O algoritmo baseado na meta-heurística busca dispersa permitiu encontrar de forma rápida boas soluções utilizando o critério de qualidade e diversidade que foram avaliadas através de um fluxo de carga.

Apesar de não se garantir que as soluções sejam ótimas para os sistemas testados, pois não é possível analisar todas as configurações radiais possíveis, salienta-se que todos os resultados obtidos foram exatamente iguais quando comparados com outras referências bibliográficas revisadas, conhecidas na literatura.

Portanto este trabalho permitiu uma nova metodologia de resolução do problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica, utilizando uma nova meta-heurística.

Como trabalhos futuros planeja-se a implementação do modelo exponencial de cargas e a modelagem do problema baseada em curvas de cargas diárias. A limitação da proposta baseia-se

no modelo em estudo, pois não considera os custos totais em realizar-se a reconfiguração do sistema de distribuição.

6. Referências Bibliográficas

- Amasifen, J.C.**, *Algoritmo Evolutivo dedicado à solução do problema de reconfiguração de sistemas de distribuição radiais*, UNESP Ilha Solteira, 2003 (<http://www.feis.unesp.br/#!/departamentos/engenharia-eletrica/pesquisas-e-projetos/lapsee/producao-bibliografica/dissertacoes-de-mestrado>), 2013.
- Baran, M. E.; Wu, F. F.**, (1989), *Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing*. IEEE Transactions on Power Delivery, V. 4, pp. 1401-1407.
- Carreño, E. M.; Moreira, N.; Romero, R.** *Distribution network reconfiguration using an efficient evolutionary algorithm*. In: IEEE PES GENERAL MEETING, 2007, Tampa-FL. Proceedings... New York: IEEE, 2007. p.1-6.
- Chiou, J. P.; Chang, C. F.; Su, C. T.** *Variable scaling hybrid differential evolution for solving network reconfiguration of distribution systems*. IEEE Transactions on Power Systems, New York, v. 20, n. 2, p. 668-674, 2005.
- Civanlar, S.; Grainger, J.J.; Yin, H.; Lee, S.S.H.**, (1988), *Distribution feeder reconfiguration for loss reduction*, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume: 3 No. 3, Pp. 1217 – 1223.
- Delbem, A. C. B.; Carvalho, A. C. P. L. F. de; Policastro, C. A.; Pinto, A. K. O.; Honda, K.; Garcia, A. C.** *Node-Depth Encoding for Evolutionary Algorithms Applied to Network Design*, In: ACM, 2004. Anais. . . [S.l.: s.n.], 2004. p.678– 687.
- Goswami, S. K.; Basu, S. K.**, *A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization*. IEEE Transactions on Power Delivery, New York, v. 7, n. 3, p. 1484-1490, 1992.
- Laguna, M.; Martí, R.**, *Scater Search – Methodology and implementations in C*. Kluwer Academic Publishers. 2002.
- Lima, T.W.**, *Estrutura de dados eficientes para algoritmos evolutivos aplicados a projetos de rede*, USP, São Carlos, 2009, (http://www2.icmc.usp.br/~biblio/BIBLIOTECA/rel_tec/RT_301.pdf), 2013.
- Mantovani, J. R. S.; Casari, F.; Romero R.**, (2000), *Reconfiguração de sistema de distribuição radiais utilizando o critério de queda de tensão*. SBA Controle e Automação, Porto Alegre, v. 11, n. 2, p. 150-159.
- Merlin, A.; Back, H.** (1975), *Search for a minimal-loss operating spanning tree configuration in an urban power distribution system*. In: Power System Computation Conferences, Proceedings... Zurich: PSCC, p. 1-18.
- Nara, K.; Shiose, A; Kitagawa, M; Ishirara, T.**, *Implementation of genetic algorithm for distribution systems loss minimum reconfiguration*. IEEE Transactions on Power Systems, New York, v. 7, n. 3, p. 1044 -1051, 1992.
- Sanches, D.S.**, *Algoritmo Evolutivo Multi objetivo para reconfiguração de redes em sistemas de distribuição de energia elétrica*, USP São Carlos (2013), (http://www.saocarlos.usp.br/index.php?option=com_content&task=view&id=11574&Itemid=154), 2013.
- Santos, A.C.**, *Algoritmo Evolutivo computacionalmente eficiente para reconfiguração de sistemas de distribuição*, USP, São Carlos, 2009, (<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18154/tde-27052009-144709/pt-br.php>), 2013.
- Souza, S.S.F.**, *Algoritmo GRASP especializado aplicado ao problema de reconfiguração de alimentadores em sistemas de distribuição radial*. UNESP- Ilha Solteira 2013. (http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/lapsee/2013_diss_simone_silva.pdf), 2013.
- Shirmohammadi, D. A., Hong, H. W., Semlyen, A. e Luo, G. X.** (1988), *A Compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks*, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 3, n. 2, p. 753-762.
- Shirmohammadi, D.; Hong, H.W.**, (1989), *Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction*. IEEE Transactions on Power Delivery, Volume: 4, No. 2, p. 1492 - 1498.