

PLANEJAMENTO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DE MÉDIA TENSÃO ATRAVÉS DE UM ALGORITMO DE BUSCA DISPERSA

Súzan G. Benetti de Pádua

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, UNESP
Avenida Brasil, 56, Centro, 15385-000 - Ilha Solteira, SP
suzan@unemat.br

Antonio M. Cossi

cossi@mat.feis.unesp.br

José R. S. Mantovani

mant@dee.feis.unesp.br

RESUMO

Neste trabalho o problema de Planejamento de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (PSDEE) de média tensão é formulado como um modelo de programação não linear inteiro misto (PNLIM). Para solução deste modelo é proposto o algoritmo de busca dispersa (BD), uma técnica de busca evolucionária. O método foi aplicado em um sistema teste da literatura de 54 barras, tendo obtido resultados indicativos de que o método BD é competitivo com outras abordagens de solução do problema que utilizam o mesmo modelo matemático. Os parâmetros dimensionais dos conjuntos que compõem a base do algoritmo e os critérios de convergência são ajustados através de testes que medem o desempenho do algoritmo.

PALAVRAS CHAVES. Sistema de Distribuição, Planejamento, Busca Dispersa.

ABSTRACT

In this paper the planning problem of electric power distribution system (EPDS) in medium voltage is formulated as a model of mixed-integer nonlinear programming (MINLP). For the solution of this model a scatter search (SS) algorithm is proposed as a technique of evolutionary search. The method was applied to a test system with 54 nodes, and the results obtained indicate that the SS method is competitive with other approaches to solving the problem using the same mathematical model. The dimensional parameters of the sets that form the algorithm basis and the convergence criteria are found through tests that measure the performance of the algorithm.

KEYWORDS. Distribution System, Planning, Scatter Search

1. Introdução

O problema de planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica (PSDEE), de uma maneira geral, consiste em encontrar uma configuração otimizada da rede de modo a atender as futuras cargas com um baixo custo de investimento na reforma e expansão da rede, minimizando as perdas de potência ativa e satisfazendo as restrições físicas e operacionais.

Neste trabalho, o modelo matemático usado para o PSDEE é um problema de PNLIM que considera como função objetivo os custos de instalação e/ou repotencialização de subestação, instalação e/ou recondutoramento de alimentadores, e o custo das perdas de potência nas linhas, sujeita a um conjunto de restrições físicas, operacionais e econômicas.

A técnica de solução proposta para o problema de PSDEE é a metaheurística busca dispersa, um método de busca evolucionária (REGO; LEÃO, 2002), com estrutura flexível que permite o desenvolvimento de diversas implementações, com diferentes graus de complexidade. Formulada na década de 60 e 70 a BD ganhou destaque quando remodelada em Glover (1994) sendo aplicada com sucesso nos mais diferentes tipos de problemas (GLOVER; LAGUNA; MARTÍ, 2000).

O sistema de codificação utilizado é a codificação sequencial aditiva proposta por Braz e Souza (2011). Sua principal vantagem é que toda proposta de solução configura redes radiais e facilita a combinação entre soluções durante o processo iterativo da busca dispersa. Para a seleção eficiente dos condutores a serem instalados em novas linhas e/ou reconduzidos nas linhas existentes, utilizou-se uma heurística apresentada por Franco, Romero e Gallego (2010). Neste caso, uma escolha eficiente e não aleatória dos condutores, reduz o tempo computacional do algoritmo de BD e melhora o desempenho de redução da componente da função objetivo relativa às perdas do sistema.

A metodologia proposta foi aplicada em um sistemas testes da literatura com 54 barras (PROENÇA, 1993). Foi utilizado o planejamento estático de curto prazo considerando que os investimentos são realizados apenas no primeiro ano. Para os custos das perdas foram considerados diferentes cenários de operação e seus valores atualizados para o valor presente, através de uma taxa de atualização.

2. Modelo matemático

O modelo considerado para o PSDEE é não linear inteiro misto, em que a função objetivo consiste em minimizar os custos de expansão e operação da rede de distribuição de energia considerando um horizonte de planejamento preestabelecido. Este modelo é dado pelo seguinte conjunto equações:

$$\begin{aligned} \min FO = & \sum_{l \in \Omega_s} \sum_{k \in \Phi_l} CFS_{kl} \cdot y_{kl} + \sum_{i \in \Gamma} \sum_{a \in \Psi} \sum_{b \in \Psi} CFC_{ab} \cdot L_i \cdot y_{iab} \\ & + \sum_{t=1}^{ap} \sum_{\pi \in \Upsilon} \sum_{i \in \Gamma} \sum_{a \in \Psi} \sum_{b \in \Psi} 3C_{kWh} H_{\pi} R_b J_{\pi ib}^2 y_{iab} L_i \left(\frac{1}{1+tj} \right)^t \end{aligned} \quad (1)$$

s.a

$$P_{si} - P_{di} - \sum_{j \in \Omega_i} (x_{ij} \cdot P_{ij}) = 0 \quad \text{e} \quad Q_{si} - Q_{di} - \sum_{j \in \Omega_i} (x_{ij} \cdot Q_{ij}) = 0, \quad \forall i \in \Omega \quad (2)$$

$$P_{ij} = V_i^2 \cdot g_{ij} - V_i \cdot V_j (g_{ij} \cdot \cos \theta_{ij} + b_{ij} \cdot \sin \theta_{ij}) \quad (3)$$

$$Q_{ij} = V_i^2 \cdot b_{ij} - V_i \cdot V_j (g_{ij} \cdot \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cdot \cos \theta_{ij}) \quad (4)$$

$$|f_{ib}^{Cal}| \leq f_b^{max}, \quad i \in \Gamma \quad (5)$$

$$\sum_{j \in \Omega_l} S_{jl}^C + \sum_{i \in \Gamma_l} S_{il}^L \leq S_{kl}^S \cdot y_{kl}, \quad l \in \Omega_S \text{ e } k \in \Phi_l \quad (6)$$

$$V^{min} \leq V_j \leq V^{max}, \quad j \in \Omega \quad (7)$$

$$\sum_{i \in \Gamma} \sum_{a \in \Psi} \sum_{b \in \Psi} y_{iab} = |\Omega| - |\Omega_S| \quad (8)$$

$$R_f \leq R_f^{max} \quad (9)$$

$$\sum_{a \in \Psi} \sum_{b \in \Psi} y_{iab} = 1, \quad \forall i \in \bigcup_{l \in \Omega_S} \Gamma_l \quad \text{e} \quad \sum_{a \in \Psi} \sum_{b \in \Psi} y_{iab} = 0, \quad \forall i \in \Gamma - \bigcup_{l \in \Omega_S} \Gamma_l \quad (10)$$

$$y_{kl}, y_{iab}, x_{ij} \in \{0, 1\} \quad (11)$$

Sendo:

Conjuntos: Γ : Linhas propostas ou existentes; Γ_l : Linhas conectadas à subestação l , com $l \in \Omega_S$; Ω : Barras propostas ou existentes na rede; Ω_i : Barras conectadas à barra i ; Ω_l : Barras conectadas à subestação l , com $l \in \Omega_S$; Ω_S : Barras com subestações propostas ou existentes; Ψ : Tipos de condutores disponíveis; Φ_l : Tipos de subestações disponíveis para a barra l , com $l \in \Omega_S$; Υ : Cenários de operação (carga leve, normal e pesada).

Parâmetros: ap : Total de anos do horizonte de planejamento; C_{kWh} : Custo do kWh ; CFC_{ab} : Custo fixo pelo recondutoramento (ou instalação) do condutor do tipo a para o tipo b . Para o caso de instalação de novos condutores $a = 0$ e o condutor instalado é do tipo b ; CFS_{kl} : Custo fixo da construção (ou repotencialização) da subestação do tipo k na barra l ; f_b^{max} : Fluxo máximo permitido no condutor do tipo b ; H_π : Total de horas do ano correspondente ao cenário de operação π ; L_i : Comprimento da linha i ; R_b : Resistência do condutor do tipo b ; R_f^{max} : Recurso financeiro máximo disponível para novos investimentos; S_{kl}^S : Capacidade da subestação do tipo k na barra l ; tj : Taxa de juros; V^{max} : Limite máximo para à magnitude de tensão nas barras; V^{min} : Limite mínimo para à magnitude de tensão nas barras;

Variáveis: b_{ij} : Susceptância da linha $i - j$; f_{ib}^{Cal} : Fluxo calculado na linha i com um condutor do tipo b ; g_{ij} : Condutância da linha $i - j$; $J_{\pi ib}$: Corrente no condutor do tipo b na linha i no cenário de operação π ; P_{di} : Potência ativa demandada na barra i ; P_{ij} : Fluxo de potência ativa na linha $i - j$; P_{si} : Potência ativa gerada na barra i ; Q_{di} : Potência reativa demandada na barra i ; Q_{ij} : Fluxo de potência reativa na linha $i - j$; Q_{si} : Potência reativa gerada na barra i ; R_f : Custos dos novos investimentos; S_{il}^L : Perdas na linha i conectada à subestação da barra l no cenário de operação com carga pesada; S_{jl}^C : Potência consumida na barra j conectada à subestação da barra l ; TC_i : Tipo do condutor instalado na linha i ; θ_{ij} : Diferença angular entre as tensões das barras $i - j$; $V_{(.)}$: Magnitude de tensão na barra $(.)$; x_{ij} : Variável binária que determina se o circuito entre as barras i e j está fechado. y_{iab} : Variável binária de decisão para o recondutoramento (ou instalação) do condutor do tipo a para o tipo b na linha i . Para o caso de instalação de novos condutores

$a = 0$ e o condutor instalado é do tipo b ; y_{kl} : Variável binária de decisão para a construção (ou repotencialização) da subestação do tipo k na barra l ;

De acordo com a função objetivo (1), os custos com a expansão (custos fixos) referem-se à soma dos investimentos com construção e/ou repotencialização de subestações e instalação e/ou recondutoramento de linhas; e os custos com a operação da rede (custos variáveis) referem-se às perdas técnicas de operação da rede durante o período de planejamento. As restrições físicas, financeiras e operacionais do serviço de fornecimento de energia elétrica a considerar são: suprimento das demandas de potências ativa e reativa para cada barra do sistema de distribuição (2), balanço de potência entre as barras (3) e (4), limites nas capacidades de correntes das linhas (5), limite de capacidade das subestações (6), limites máximo e mínimo da magnitude das tensões nos pontos de consumo (7), as restrições (2) e (8) garantem a radialidade do sistema projetado, disponibilidade de recursos financeiros para novos investimentos (9), escolha de apenas um tipo de condutor para as linhas novas ou recondutoradas (10).

3. Técnica de solução

As diversas implementações da metaheurística BD são basicamente formadas por cinco etapas fundamentais:

- **Etapa 1 - geração de soluções com diversificação:** usada para construir um conjunto P composto por $PSize$ soluções diversas que são a base do algoritmo.
- **Etapa 2 - melhoria local de soluções:** transforma uma solução visando torná-la factível ou melhorando o valor da função objetivo.
- **Etapa 3 - atualização das soluções do conjunto de referência (*RefSet*):** empregada para a construção e manutenção do conjunto *RefSet*. Durante a construção selecionam-se b soluções distintas do conjunto P , conforme uma regra preestabelecida, visando incluir alta qualidade (em relação à função objetivo) e diversidade no *RefSet*. Na manutenção é realizada a atualização das soluções do conjunto *RefSet* sempre quando uma nova solução armazenada no conjunto *Pool* cumpre os requisitos para ingressar no *RefSet*.
- **Etapa 4 - geração de subconjuntos de soluções:** gera s diferentes subconjuntos de soluções com as soluções de referência que são usados na etapa de *combinação de soluções* e armazena no conjunto *NovoSubconjuntos*.
- **Etapa 5 - combinação de soluções:** combina as soluções contidas em cada subconjunto s gerado através da etapa de *geração de subconjuntos*, com o objetivo de encontrar novas soluções denominadas *soluções testes*. O método de combinação das soluções deve levar em conta o contexto do problema e a maneira como essas soluções são codificadas. Aos serem criadas, as *soluções teste* passam pela etapa de *melhoria local de soluções* e são armazenadas no conjunto *Pool* usado durante a etapa de atualização do *RefSet*. A etapa termina quando foram realizadas as combinações em todos os subconjuntos s .

Na Figura 2 apresenta-se o diagrama de blocos do algoritmo de BD implementada neste trabalho considerando o problema de planejamento (1)-(11). O sistema de codificação adotado é a codificação sequencial aditiva (BRAZ; SOUZA, 2011), que inicia com todas as barras de cargas (existentes e futuras) isoladas do sistema e prossegue, conectando uma barra por vez, até que todas as barras estejam conectadas à rede de distribuição. Essa codificação é representada pelo vetor v ilustrado na Figura 1:

$$v = [v_1 \quad v_2 \quad v_3 \quad \dots \quad v_m]$$

Figura 1: Vetor de codificação sequencial aditivo

sendo m o número de barras de cargas existentes e futuras na rede de distribuição e $v_i \in [0, 1]$, que após serem decodificados definirão as linhas da rede responsáveis pela conexão das barras de carga conforme o diagrama de blocos da Figura 3.

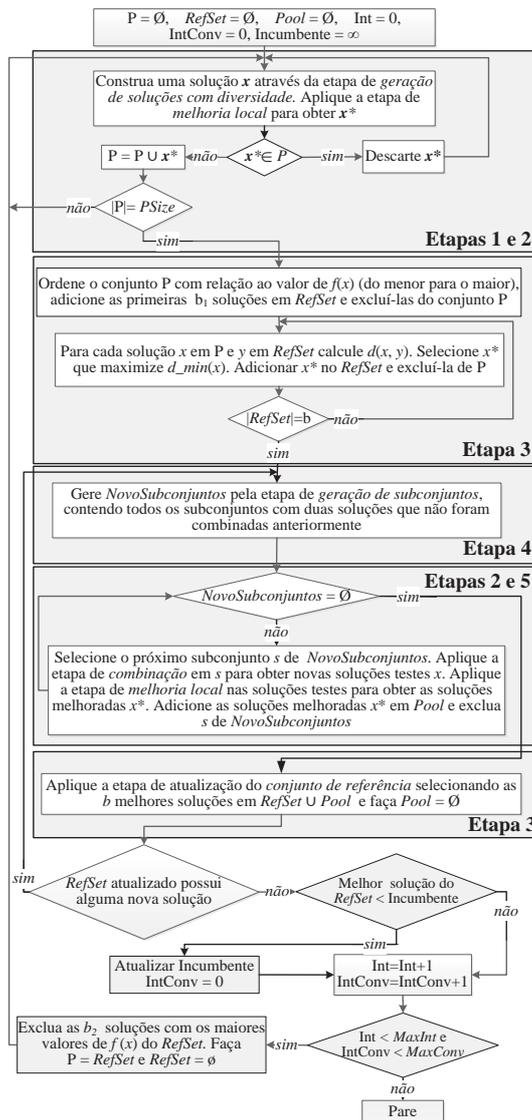


Figura 2: Diagrama de blocos do algoritmo BD implementado

A codificação sequencial aditiva, reduz bastante o espaço de busca, pois só gera configurações radiais.

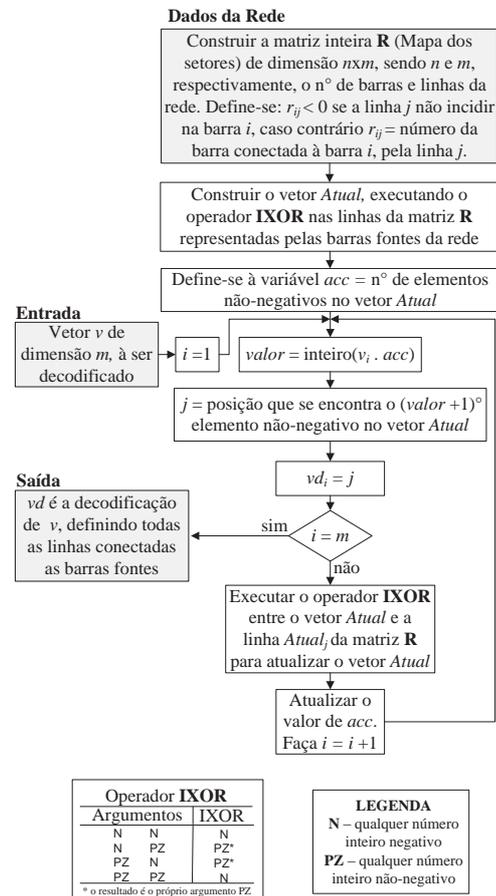


Figura 3: Diagrama de blocos da codificação sequencial aditiva e o operador IXOR

3.1. Estratégia para geração de soluções com diversificação

A estratégia adotada, neste trabalho, para geração de soluções com diversidade foi apresentada por Laguna e Martí (2002) e emprega randomização controlada e frequência baseada em memória. Para gerar o vetor v da codificação sequencial aditiva (Figura 1), o intervalo $[0, 1[$ é dividido em 4 intervalos menores de tamanhos iguais e cada intervalo é representado por t_j para $j = 1, \dots, 4$. O elemento v_i para $i = 1, \dots, m$, é construído em duas etapas. Na primeira etapa seleciona-se randomicamente um dos t_j intervalos. A probabilidade de selecionar cada intervalo t_j é inversamente proporcional à quantidade de vezes que esse intervalo já foi selecionado em iterações anteriores durante o processo de construção do conjunto P . Sendo assim, na primeira iteração todos os t_j intervalos têm a mesma chance de serem escolhidos. Para as iterações $k > 1$ a frequência de vezes que cada intervalo já foi selecionado em iterações anteriores ($freq_{t_{j_{k-1}}}$) para compor o elemento v_i é armazenada e a probabilidade do intervalo t_j ser selecionado é:

$$Prob_{t_{j_{k-1}}} = \frac{(k-1) - freq_{t_{j_{k-1}}}}{\sum_{j=1}^4 [(k-1) - freq_{t_{j_{k-1}}}]}$$
 (12)

Na segunda etapa, a variável v_i é randomicamente gerada dentro do intervalo selecionado durante a primeira etapa. O processo é repetido até que o vetor v esteja completo.

3.2. Estratégias de melhorias das soluções no PSDEE

Quando a escolha dos condutores a serem instalados nas linhas novas e/ou reconduzidos nas linhas existentes é feita de forma eficiente, e não aleatória, aumenta a eficiência do algoritmo BD. Para a seleção eficiente dos condutores é aplicada a heurística apresentada por Franco, Romero e Gallego (2010), que garante a escolha de apenas um condutor para cada nova instalação ou reconduzimento (restrição 10). Essa heurística é dividida em duas fases. Na primeira fase a escolha do condutor é feita visando o menor custo e atender a restrição de corrente (5). Na segunda fase, se existem barras com tensão abaixo da tensão mínima (7) as bitolas dos condutores a jusante são aumentadas de acordo com um índice de sensibilidade.

A restrição (2) relacionada com o atendimento das demandas de potências ativa e reativa para cada barra é considerada através da solução de um algoritmo de fluxo de potência de varredura convencional apresentado em Shirmohammadi e Hong (1989).

A *codificação sequencial aditiva* garante a radialidade do sistema (8), porém, não consegue controlar a quantidade de cargas conectadas em cada subestação e mesmo com a escolha eficiente dos condutores pode obter soluções que violem as restrições (5), (6) e (7). Essas infactibilidades são penalizadas na função de adaptação para tornar tais soluções não atraentes durante a busca. A função de adaptação avalia cada configuração candidata a solução do problema de PSDEE, e é formada pela função objetivo mais o termo de penalização das restrições violadas, dada por:

$$FO_p = FO + \sum_{i \in CR} \mu_i |R_i|,$$
 (13)

sendo μ_i e $|R_i|$, respectivamente, a constante de penalidade e o grau de violação da restrição i e CR o conjunto contendo as restrições (5), (6) e (7).

A etapa de *melhoria local de soluções* realiza uma busca na vizinhança da solução v_d (solução decodificada) através dos vetores v^* e v^{**} , com o objetivo de aumentar a qualidade da solução com relação ao valor da função objetivo, ou pode realizar uma mudança total na solução v_d através do vetor v^{***} , dados por:

$$v_i^* = \begin{cases} v_i & i = 1, \dots, k \\ r_i^* \cdot (1 - v_i) & i = k + 1, \dots, m \end{cases} \quad (14)$$

sendo $k = \text{int}(80\% \cdot m)$, m é a dimensão do vetor v e $r_i^* \in [0, 1[$ é gerado randomicamente.

$$v_i^{**} = \begin{cases} v_i & i = 1, \dots, m - k \\ v_{2, m-k-1-i} & i = m - k + 1, \dots, m \end{cases} \quad (15)$$

sendo $k = r^{**} \cdot [\text{int}(25\% \cdot m)] + 4$, e $r^{**} \in [0, 1]$.

$$v_i^{***} = \begin{cases} v_{k-i+1} & i = 1, \dots, k \\ v_i & i = k + 1, \dots, m \end{cases} \quad (16)$$

sendo $k = r^{***} \cdot [\text{int}(25\% \cdot m)] + 4$, e $r^{***} \in [0, 1]$.

A *solução melhorada* é a que possui o menor valor da função objetivo entre as soluções v , v^* , v^{**} e v^{***} .

3.3. Construção e atualização do conjunto de referência

A seleção das b soluções de referência que compõem o conjunto *RefSet* inicial depende da qualidade e da diversidade, dadas por:

- Seleção por qualidade: ordenar o conjunto P de acordo com o valor da função objetivo $P = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_{\text{PSize}}\}$, sendo $F(v_1) \leq F(v_2) \leq F(v_3) \leq \dots \leq F(v_{\text{PSize}})$. As b_1 (com $b_1 < b$) primeiras soluções de qualidade são selecionadas para compor o *RefSet* e retiradas do conjunto P .
- Seleção por diversidade: O cálculo da dissimilaridade entre as soluções x e y leva em consideração a quantidade de linhas distintas (d_{xy}), o módulo da diferença do valor da função objetivo e o número de barras alimentadas pela subestação i , sendo n o total de subestações.

$$d(x, y) = \alpha \cdot d_{xy} + \beta \cdot |FO(x) - FO(y)| + \delta \cdot \sum_{i=1}^n |nb_{ix} - nb_{iy}| \quad (17)$$

sendo α , β e $\delta \in \mathbb{R}$ definidos *a priori*.

Como critério de escolha das soluções tem-se a *regra de distância mínima-máxima*. São calculadas as distâncias entre as soluções x que fazem parte do conjunto P com as soluções y que já estão no conjunto *RefSet*. Para cada solução $x \in P$ é escolhida a distância mínima entre ela e as soluções $y \in \text{RefSet}$, ou seja:

$$d_{\min}(x) = \text{Min}_{y \in \text{RefSet}} \{d(x, y)\} \quad (18)$$

Assim, seleciona-se a solução x com a máxima distância, ou seja, a solução que possui os maiores valores de $d_{\min}(x)$ e ela é incluída no *RefSet*. O processo é repetido até que o conjunto *RefSet* contenha b soluções, para isso serão selecionadas b_2 soluções, sendo $b_2 = b - b_1$.

Segundo Laguna e Martí (2002) o ideal, ao construir o *RefSet* inicial, é que a quantidade de soluções escolhidas por qualidade e por diversidade sejam iguais, por outro lado, durante a atualização do *RefSet* a qualidade das soluções é mais importante que a diversidade. Assim, a atualização é efetuada visando apenas a qualidade.

3.4. Estratégias de geração de subconjuntos e combinação de soluções de referência

Na etapa de *geração de subconjuntos* para a solução do problema de PSDEE criam-se todos os subconjuntos s contendo duas soluções ainda não combinadas do conjunto *RefSet*, a BD armazena quais são as soluções já combinadas durante o processo iterativo para garantir

que somente combinações novas sejam realizadas. Esses subconjuntos s são armazenados no conjunto *NovoSubconjunto* para serem usados na etapa de *combinação de soluções* que só inicia depois que todos os subconjuntos s forem criados. As soluções v' e v'' de cada subconjunto s são combinadas para criar três novas soluções denominadas *soluções testes*, dadas pelas equações 19, 20 e 21, que são melhoradas e armazenadas no conjunto *Pool* e o subconjunto s é retirado do conjunto *NovoSubconjunto*. A etapa termina quando foram realizadas as combinações em todos os subconjuntos s , ou seja, *NovoSubconjuntos* = \emptyset .

$$v_i^1 = \begin{cases} 1 - \frac{v'_i \cdot FO(v') + v''_i \cdot FO(v'')}{FO(v') + FO(v'')} & \text{se } v'_i \neq 0 \text{ ou } v''_i \neq 0 \\ 0.99 & \text{se } v'_i = 0 \text{ e } v''_i = 0 \end{cases} \quad (19)$$

para $i = 1, \dots, m$.

$$v_i^2 = \begin{cases} v'_i & \text{para } i = 1, \dots, k \\ v''_i & \text{para } i = k, \dots, m \end{cases} \quad (20)$$

$$v_i^3 = \begin{cases} v''_i & \text{para } i = 1, \dots, k^* \\ v'_i & \text{para } i = k^*, \dots, m \end{cases} \quad (21)$$

sendo k e $k^* \in \mathbb{N}$, escolhidos aleatoriamente no intervalo de $]1, m[$.

3.5. Critérios de convergência da BD

O algoritmo BD é considerado convergido quando é atingido o número máximo de iterações *IntMax* ou quando a solução *incumbente* (melhor valor da FO encontrado) não melhorar durante um número preestabelecido de iterações consecutivas, *MaxConv*.

4. Testes e Resultados

A metodologia proposta foi aplicada em um sistema teste da literatura com 54 barras (PROENÇA, 1993). Trata-se de um sistema de distribuição de 15 kV, com duas subestações existentes que permitem ser repotencializadas e duas subestações candidatas. O sistema inicial possui 16 barras energizadas e 34 barras que deverão ser alimentadas durante o período de planejamento. Para a instalação dos novos alimentadores ou recondutoramento dos alimentadores já existentes tem-se disponível 6 diferentes tipos de condutores. As características e custos dos condutores e das subestações estão disponíveis em (PEREIRA JR.; COSSI; MANTOVANI, 2011), com alteração na reatância do condutor do tipo 6 que passou de 0,1201 para 0,1140. Os dados de barra estão disponíveis em (PROENÇA, 1993), utilizou-se o fator de potência médio de 0,9 e cargas do terceiro período. Na Tabela 1 encontram-se os dados elétricos das linhas do sistema.

Para os custos das perdas foram considerados 3 diferentes cenários de operação. As Tabelas 2 e 3 apresentam os parâmetros necessários para o modelo de PSDEE definido pelas equações (1) - (11).

4.1. Análise dos parâmetros do algoritmo de busca dispersa

Um fator crítico da BD é o ajuste dos parâmetros dimensionais *Psize* (dimensão do conjunto P), b (dimensão do conjunto *RefSet*) e b_1 (quantidade de soluções de qualidade selecionadas para o *RefSet* inicial), pois esses conjuntos P e *RefSet* são a base do algoritmo BD. Com o objetivo de ajustar esses parâmetros foram realizados diferentes testes considerando um terceiro critério de convergência que encerra o algoritmo quando a solução otimizada é

Tabela 1: Dados de linha do sistema de 54 barras

i	L_i (km)	TC_i									
1	0,562	2	17	0,624	0	32	1,000	0	47	0,374	0
2	0,436	2	18	0,500	0	33	0,562	0	48	0,436	0
3	0,624	2	19	0,812	0	34	0,624	0	49	0,436	0
4	0,500	2	20	0,860	0	35	0,812	0	50	0,500	0
5	0,624	2	21	0,624	0	36	0,500	0	51	0,624	0
6	0,624	2	22	0,500	0	37	0,374	0	52	0,624	0
7	0,500	2	23	0,750	0	38	0,624	0	53	0,750	0
8	0,686	2	24	0,936	0	39	0,750	0	54	0,500	0
9	0,624	2	25	0,686	0	40	0,500	0	55	0,750	0
10	1,436	2	26	0,562	0	41	0,436	0	56	0,500	0
11	0,750	2	27	0,436	0	42	0,624	0	57	0,750	0
12	0,750	2	28	0,562	0	43	0,686	0	58	0,436	0
13	0,562	2	29	0,750	0	44	0,812	0	59	0,624	0
14	0,562	2	30	0,686	0	45	0,562	0	60	0,624	0
15	0,624	2	31	0,624	0	46	0,936	0	61	0,686	0
16	0,874	2									

Tabela 2: Parâmetros para o modelo de PS-DEE

V^{\max} (pu)	V^{\min} (pu)	C_{kWh} (R\$/kWh)	t_j (aa)	ap (anos)
1,05	0,95	0,10	0,10	5

Tabela 3: Parâmetros para os cenário de operação do PSDEE

Cenário de operação (π)	H_π (horas)	Fator de carregamento
1	1000	0,30
2	6760	0,50
3	1000	1,00

encontrada. As análises foram realizadas executando o algoritmo BD 25 vezes e os demais parâmetros necessários para a BD encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4: Parâmetros necessários na Busca Dispersa

$MaxInt$	$MaxConv$	μ_5	μ_6	μ_7	α	β	δ
100	50	18168	2600	0	1	$2,5 \cdot 10^{-7}$	1/3

A Tabela 5 indica que ao comparar os resultados obtidos para o valor médio da função objetivo (\overline{FO}), do desvio padrão amostral (S) e do coeficiente de variação (CV) a BD apresentou um melhor desempenho quando $Psize = 200$, $b = 12$ e $b_1 = 6$ e quando $Psize = 250$, $b = 14$ e $b_1 = 7$. Em ambos os casos, o valor médio da função objetivo é de R\$ 7.068.261,00 com coeficiente de variação de 0,026%. Além disso, a BD em 25 execuções convergiu apenas para 2 mínimos locais (número de iterações que convergiram para mínimos locais (NICML)) ao atingir o número máximo de iterações permitidas após a atualização da Incumbente ($MaxConv$). Foram também realizados testes com $Psize$ igual a 100 e 150 mas os resultados foram omitidos por questão de espaço permanecendo apenas os que obtiveram um melhor desempenho do algoritmo.

Para $Psize = 200$, $b = 12$ e $b_1 = 6$ a média de iterações até a convergência (\bar{i}) é de

Tabela 5: Resultados obtidos nos testes para ajustar os parâmetros dimensionais dos conjuntos P e $RefSet$

$Psize$	b	b_1	\overline{FO} (R\$)	S (R\$)	CV (%)	\bar{t} (s)	\bar{i}	NICML
200	10	5	7.068.883,00	2.950	0,041	79	26	4
	12	6	7.068.261,00	1.892	0,026	79	20	2
	14	7	7068635	2748	0.038	78	15	3
250	10	5	7.070.349,00	4.253	0,060	124	36	8
	12	6	7.068.430,00	2.422	0,034	94	15	2
	14	7	7.068.261,00	1.892	0,026	80	16	2

20 iterações com desvio padrão amostral de 23 iterações, portanto, aproximadamente 97,7% das 25 execuções da BD convergiram com menos de 89 iterações e com um tempo inferior a 346 segundos ($\bar{t} = 79s$ e $S = 89s$). Por outro lado, para $Psize = 250$, $b = 14$ e $b_1 = 7$ a média de iterações até a convergência (\bar{i}) é de 16 iterações com desvio padrão amostral de 14 iterações, superando os resultados do caso anterior, pois aproximadamente 97,7% das 25 execuções da BD convergiram com menos de 58 iterações e com um tempo inferior a 281 segundos ($\bar{t} = 80s$ e $S = 67s$).

Para ajustar o valor do critério de convergência $MaxConv$ neste teste armazenou-se a quantidade de iterações entre cada troca que o algoritmo fez no valor da Incumbente. Para o caso $Psize = 250$, $b = 14$ e $b_1 = 7$ foram realizadas 83 trocas no valor da Incumbente nas 25 execuções do algoritmo BD com uma média de 3,8 iterações e um desvio padrão amostral de 5,1 iterações, ou sejam, aproximadamente 97,7% das trocas no valor da Incumbente ocorreram com menos de 19,1 iterações. Com os resultados obtidos os parâmetros dimensionais dos conjuntos P e $RefSet$ e os critérios de convergência da BD foram ajustados conforme a Tabela 6.

Tabela 6: Parâmetros dimensionais dos conjuntos P e $RefSet$ e critérios de convergência

$Psize$	b	b_1	$MaxInt$	$MaxConv$
250	14	7	58	19

4.2. Resultados

Na Tabela 7 apresentam-se os custos totais da solução otimizada do problema de PSDEE estático de curto prazo obtida pela BD e na Tabela 8 a topologia da rede. Esta solução não viola a restrição de tensão nas barras e de capacidade de corrente nos condutores. As capacidades das subestações ao final do horizonte de planejamento para o cenário de operação com carga pesada apresentam-se na Tabela 9.

Tabela 7: Custos totais da solução otimizada da rede de 54 barras obtidas pela BD para o planejamento estático de curto prazo

Custos (R\$)			
Linhas	SE	Perdas	Total
565.210,00	6.000.000,00	502.597,00	7.067.807,00

Somente para validar a metodologia foram feitas adaptações no modelo para realizar o planejamento estático de longo prazo dividido em três períodos de planejamento com as mesmas cargas, fatores de carregamento e tensão nominal conforme realizado em (PEREIRA JR.; COSSI; MANTOVANI, 2011). Na Tabela 10 apresenta-se a comparação entre

Tabela 8: Condutores das linhas da solução otimizada obtida pela BD para o planejamento de curto prazo e para o planejamento de longo prazo

Curto Prazo						Longo Prazo									
<i>i</i>	TC_i	<i>i</i>	TC_i	<i>i</i>	TC_i	<i>i</i>	TC_i	<i>i</i>	TC_i	<i>i</i>	TC_i	<i>i</i>	TC_i		
1	4	17	1	32	0	47	4	1	5	17	1	32	1	47	4
2	2	18	1	33	4	48	4	2	2	18	1	33	4	48	4
3	2	19	1	34	1	49	4	3	2	19	1	34	1	49	4
4	2	20	0	35	2	50	4	4	2	20	0	35	2	50	4
5	2	21	2	36	1	51	2	5	2	21	2	36	1	51	4
6	0	22	2	37	1	52	4	6	0	22	2	37	1	52	4
7	2	23	1	38	0	53	1	7	0	23	1	38	0	53	1
8	2	24	0	39	0	54	0	8	2	24	0	39	0	54	0
9	2	25	1	40	1	55	2	9	2	25	1	40	1	55	2
10	2	26	1	41	1	56	1	10	2	26	1	41	1	56	1
11	2	27	1	42	0	57	1	11	4	27	1	42	0	57	1
12	2	28	0	43	1	58	1	12	2	28	0	43	1	58	1
13	2	29	1	44	1	59	1	13	2	29	1	44	1	59	1
14	2	30	1	45	1	60	0	14	2	30	1	45	2	60	0
15	2	31	2	46	0	61	1	15	2	31	2	46	0	61	1
16	2							16	2						

Tabela 9: Potência instalada em cada subestação ao final do horizonte de planejamento para o cenário de operação com carga pesada

SE	Capacidade total (MVA)	Capacidade solicitada pelas cargas (MVA)	SE	Capacidade total (MVA)	Capacidade solicitada pelas cargas (MVA)
51	16,7	16,0	53	22,0	21,1
52	16,7	11,5	54	22,0	17,6

Tabela 10: Comparação dos custos totais das soluções otimizadas obtidas pela Busca Tabu e pela Busca Dispersa

	Custos (R\$)			
	Linhas	SE	Perdas	Total
Busca Tabu	1.048.840,00	6.000.000,00	843.820,00	7.892.660,00
Busca Dispersa	637.990,00	6.000.000,00	1.240.261,00	7.878.251,00

os custos totais das soluções otimizadas obtidas pela Busca Tabu (PEREIRA JR.; COSSI; MANTOVANI, 2011) e pela Busca Dispersa. A BD obteve uma solução otimizada de melhor qualidade diminuindo o valor da função objetivo em 0,18%. Na Tabela 8 apresenta-se a topologia da rede. A topologia final da rede no planejamento de longo prazo e no planejamento de curto prazo são diferente devido a tensão nominal utilizada.

5. Conclusões

Neste trabalho apresentou-se uma metodologia para resolver o problema de planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica de média tensão formulado como um problema de programação não linear inteiro misto através da implementação da metaheurística Busca Dispersa utilizando a codificação sequencial aditiva. A metodologia foi aplicada em um sistema de 54 barras. Os parâmetros dimensionais dos conjuntos que compõem a base do algoritmo foram ajustados através de testes que avaliaram a influência dos mesmos na convergência do algoritmo, definindo com isso os critérios de convergência. A contribuição desse trabalho é a aplicação da metaheurística BD para solução do problema de PSDEE. De acordo com pesquisas realizadas na literatura especializada essa metaheurística ainda não havia sido aplicada na solução desse problema e se mostrou compatível com outras metodologias apresentadas.

Referências

- BRAZ, H. D. d. M.; SOUZA, B. A. d. Distribution network reconfiguration using genetic algorithms with sequential encoding: Subtractive and additive approaches. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 26, n. 2, p. 582–593, 2011.
- FRANCO, J. F.; ROMERO, R. A.; GALLEGOS, R. A. Um método heurístico eficiente para a seleção ótima de condutores e o recondutoramento de alimentadores primários em sistemas de distribuição de energia elétrica. *XVIII Congresso Brasileiro de Automática*, Bonito, Mato Grosso do Sul, Brasil, p. 4516–4522, 2010.
- GLOVER, F. Tabu search for nonlinear and parametric optimization (with links to genetic algorithms). *Discrete Appl. Math.*, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, The Netherlands, The Netherlands, v. 49, n. 1-3, p. 231–255, 1994. ISSN 0166-218X.
- GLOVER, F.; LAGUNA, M.; MARTÍ, R. Fundamentals of scatter search and path relinking. *Control and Cybernetics*, v. 39, n. 3, p. 653–684, 2000.
- LAGUNA, M.; MARTÍ, R. *Scatter Search: Methodology and Implementations in C*. Norwell, MA, USA: Kluwer Academic Publishers, 2002. ISBN 1402073763.
- PEREIRA JR., B. R.; COSSI, A. M.; MANTOVANI, J. R. S. Planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica através de um modelo de programação não linear inteiro misto e busca tabu. In: *XLIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*. Ubatuba/ SP: [s.n.], 2011.
- PROENÇA, L. B. *Algoritmos genéticos no planejamento da expansão de distribuição de energia elétrica*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Portugal, 1993.
- REGO, C.; LEÃO, P. *A Scatter Search Tutorial for Graph-Based Permutation Problems*. School of Business Administration, The University of Mississippi: Working Paper Series, Hearin Center for Enterprise Sciences, 2002.
- SHIRMOHAMMADI, D.; HONG, H. W. Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 4, n. 2, p. 1492–1498, 1989.