

PLANEJAMENTO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DE UM MODELO DE PROGRAMAÇÃO NÃO LINEAR INTEIRO MISTO E BUSCA TABU

Benvindo Rodrigues Pereira Júnior

Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Universidade Estadual Paulista – UNESP
Departamento de Engenharia Elétrica
Av. Brasil 056 – 15.385-000 Ilha Solteira - SP
e-mail: brpjunior@gmail.com

Antônio Marcos Cossi

Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Universidade Estadual Paulista – UNESP
Departamento de Matemática
Av. Brasil 056 – 15.385-000 Ilha Solteira – SP
e-mail: cossi@mat.feis.unesp.br

José Roberto Sanches Mantovani

Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Universidade Estadual Paulista – UNESP
Departamento de Engenharia Elétrica
Av. Brasil 056 – 15.385-000 Ilha Solteira - SP
e-mail: mant@dee.feis.unesp.br

RESUMO

O problema de planejamento de redes de distribuição é um problema de programação Não Linear Inteiro Misto (*PNLIM*) de grande porte que apresenta o fenômeno da explosão combinatorial e estrutura multimodal com elevado número de ótimos locais. O Problema de planejamento visa a expansão do sistema, que compreende a construção de novos circuitos, troca das linhas existentes por outras de maior capacidade (recondutoramento), construção de subestações e repotencialização das existentes. Para a solução deste problema, neste trabalho propõe-se um algoritmo Busca Tabu (*BT*), que utiliza conceitos básicos e avançados, como mecanismos de transição, lista tabu de tamanho variável e critério de aspiração. Apresentam-se resultados para uma rede de distribuição referenciada na literatura.

PALAVRAS CHAVE. Busca Tabu, Planejamento de Sistemas de Distribuição, Programação Não Linear Inteira Mista.

ABSTRACT

The problem of distribution networks' planning is a mixed integer non-linear programming problem (*MINLP*) of great size that presents the combinatorial explosion phenomenon and multimodal structure with elevated number optimum points. The planning problem aims the system's expansion, which comprehends the construction of new circuits, replacement of the existing lines by others of greater capacity, construction of substations, and repotencialization of the preexisting ones. For solving this problem this work proposes a Tabu Search (*TS*) algorithm, that utilizes basic and advanced concepts, such as transition mechanisms, tabu list of variable size and aspiration criterion. This paper presents results for a distribution network referenced in the literature.

KEYWORDS Tabu Search, Distribution Systems' Planning, Mixed Integer Non-Linear Programming

1. Introdução

Nos últimos anos tem-se notado um grande desenvolvimento dos centros urbanos, sendo este econômico, social e cultural. Este desenvolvimento tem um impacto direto sobre o sistema de distribuição, uma vez que este é responsável por transmitir a energia elétrica, sem a qual possivelmente este desenvolvimento não ocorreria. O desenvolvimento dos centros urbanos provoca um crescimento na demanda de energia elétrica, sendo este relacionado com o aumento do consumo de energia elétrica devido às melhorias nas condições socioeconômicas, ligação de novos consumidores ao sistema existente e também pela criação de novas áreas residenciais, comerciais e industriais que devem ser conectadas ao sistema, tornando o problema de planejamento de sistemas de energia elétrica de grande importância para as concessionárias devido à necessidade de atender os consumidores com qualidade, altos índices de confiabilidade e aos altos custos de investimento.

A importância do Planejamento dos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (Oliveira, 2010), (Cossi, 2008), (Ramirez-Rosado e Dominguez-Navarro, 2006), (Diaz-Dorado e Pidre, 2004), (Ramirez-Rosado e Dominguez-Navarro, 2004), (Miguez et al., 2002) pode ser observado através de diferentes pontos de vista: (1) Técnico – devido a grande quantidade de investimentos em infra estrutura e equipamentos e ao fato deste ser responsável por uma parte importante das perdas técnicas e também devido às quedas de tensão. Outros fatores são a qualidade e a confiabilidade do fornecimento, que afetam diretamente o consumidor necessitando de um número maior de pessoas para sua administração e manutenção; (2) Econômico – o aumento dos custos de operação, indicando que devem ser realizados esforços para obter a correta utilização dos recursos que foram investidos no sistema; (3) Social - as redes de distribuição têm um grande impacto na sociedade devido ao fato desta ser dependente do fornecimento de energia elétrica e também a preocupação crescente com meio ambiente, resultando em legislações mais exigentes, com maiores cobranças de caráter social, fazendo-se necessária a consideração de uma grande quantidade de aspectos no planejamento dos sistemas de distribuição (Oliveira, 2010).

O problema de planejamento de sistemas de distribuição visa a expansão do sistema e compreende a construção de novos circuitos, troca das linhas existentes por outras de maior capacidade (recondutoramento), construção de subestações e ampliação das existentes. Minimizar os custos relacionados com estes investimentos e com a operação da rede, satisfazendo um conjunto de restrições operacionais, físicas e financeiras constitui o problema de planejamento de sistemas de distribuição (Gönen, 1986). Trata-se de um problema de programação matemática de grande porte que envolve um grande número de variáveis reais e inteiras, sendo necessário atender um conjunto de restrições operacionais e financeiras.

As principais dificuldades encontradas na solução deste problema relacionam-se com a natureza combinatorial do problema, que apresenta um grande espaço de busca e estrutura multimodal com elevado número de ótimos locais (Cossi, 2008). Na literatura especializada encontram-se inúmeros trabalhos com diferentes técnicas de solução para este problema, dentre os quais destacam-se, a otimização clássica Branch & Bound (Paiva, 2005), (Oliveira, 2010), métodos Heurísticos (Miguez et al., 2002) e as metaheurísticas, tais como Algoritmos Genéticos (Proença, 1993), (BernalAgustin e Ramirez Rosado, 1998), (Ramirez Rosado e BernalAgustin, 2001), (Mendoza et al, 2006), Busca Tabu multiobjetivo (Ramirez Rosado e Domínguez-Navarro, 2004), (Ramirez Rosado e Domínguez-Navarro, 2006), Colônia de Formigas (Gomez et al., 2004).

Neste trabalho o planejamento de sistemas de distribuição é formulado como um problema de Programação Não Linear Inteira Mista (PNLIM). Para a solução deste modelo propõe-se um algoritmo Busca Tabu (BT). A codificação binária não é adequada para representação do problema, sendo assim, utilizou-se uma codificação com números inteiros para representar corretamente as características físicas do modelo matemático do problema. Para avaliar as propostas fornecidas pela BT os estados da rede são obtidos através de um algoritmo de fluxo de potência radial do tipo varredura (Shirmohammadi, 1988). A partir dos estados da rede

obtidos pelo processamento da rotina de fluxo de potência avalia-se a função objetivo que é composta por custos de investimentos (custos fixos) devido à expansão do sistema e pelos custos operacionais (custos variáveis) devido às perdas na rede.

Para mostrar a qualidade do modelo matemático e da técnica de solução proposta apresentam-se os resultados de testes efetuados em um sistema teste encontrado na literatura (Miranda, 1994).

2. Formulação matemática do problema de planejamento de sistemas de distribuição

O problema de planejamento de sistemas de distribuição é formulado como um problema de programação não linear inteiro misto (PNLIM). No desenvolvimento deste modelo consideram-se as seguintes ações de planejamento: repotencialização de subestações (SEs) existentes, construção de novas subestações, recondução de linhas existentes e construção de novas linhas e possibilidade de reconfiguração da rede de distribuição. Matematicamente este problema pode ser escrito como:

$$Fo = \min \left\{ \sum_{g=1}^{pp} \left(\sum_{k \in C} \sum_{ij \in Le} (CFC_{rec_k} \cdot dist_{ij}) \cdot y1_{kijg} + \sum_{k \in C} \sum_{ij \in Lp} (CFC_k \cdot dist_{ij}) \cdot y2_{kijg} \right. \right. \\ \left. \left. + \sum_{t \in S} \sum_{n \in SEe} (CFS_{rep_t}) \cdot y3_{tn} + \sum_{t \in S} \sum_{n \in SEp} (CFS_t) \cdot y4_{tn} \right) \cdot \frac{1}{(1 + txj)^{pp \cdot (g-1)}} \right. \\ \left. + \sum_{g=1}^{na} \left(\sum_{k \in nce} \sum_{ij \in L} T_k \cdot Ke_{kg} \cdot R_{ijg} \cdot I_{ijk}^2 \cdot y5_{ijg} \right) \cdot \frac{1}{(1 + txj)^g} \right\} \quad (1)$$

sujeito a:

$$V_{min} < V_{ikg} < V_{max} \quad \forall i \in nb, \forall k \in nce, \forall g \in pp \quad (2)$$

$$\left[V_{ikg} \sum_{j \in \Omega_i} V_{jkg} \cdot \left(\frac{R_{ijg}}{R_{ijg}^2 + X_{ijg}^2} \cdot \cos \theta_{ijk} - \frac{X_{ijg}}{R_{ijg}^2 + X_{ijg}^2} \cdot \sen \theta_{ijk} \right) \cdot dist_{ij} \cdot y5_{ijg} \right] - Pg_{ig}^k \\ + Pd_{ig}^k = 0 \quad \forall i \in nb, \forall k \in nce, \forall g \in pp \quad (3)$$

$$\left[V_{ikg} \sum_{j \in \Omega_i} V_{jkg} \cdot \left(\frac{R_{ijg}}{R_{ijg}^2 + X_{ijg}^2} \cdot \cos \theta_{ijk} + \frac{X_{ijg}}{R_{ijg}^2 + X_{ijg}^2} \cdot \sen \theta_{ijk} \right) \cdot dist_{ij} \cdot y5_{ijg} \right] - Qg_{ig}^k \\ + Qd_{ig}^k = 0 \quad \forall i \in nb, \forall k \in nce, \forall g \in pp \quad (4)$$

$$I_{ijk} \leq I_{ij}^{max} \cdot y5_{ijg} \quad \forall ij \in L, \forall k \in nce, \forall g \in pp \quad (5)$$

$$\sum_{j \in nb_{SEi}} S_{jkg}^{carga} + \sum_{i \in nl_{SEi}} S_{ikg}^{perdas} \leq S_{SEi} \cdot y6_{ig} \quad \forall i \in nSE, \forall k \in nce, \forall g \in pp \quad (6)$$

$$\sum_{ij \in L} y5_{ijg} = nb - nSE \quad \forall g \in pp \quad (7)$$

$$\sum_{k \in C} y1_{kijg} \leq 1 \quad \forall ij \in Le, \forall g \in pp \quad (8)$$

$$\sum_{k \in C} y2_{kijg} \leq 1 \quad \forall ij \in Lp, \forall g \in pp \quad (9)$$

$$\sum_{t \in S} y_{3tng} \leq 1 \quad \forall n \in SE_e, \forall g \in pp \quad (10)$$

$$\sum_{t \in S} y_{4tng} \leq 1 \quad \forall n \in SE_p, \forall g \in pp \quad (11)$$

sendo:

- C :Conjunto de cabos disponíveis para serem instalados na rede;
- $CFCrec_k$:Custo fixo para a troca de cabo k em um trecho ij existente;
- CFC_k :Custo fixo para o cabo k instalado no trecho proposto ij ;
- $CFSrep_t$:Custo fixo para a repotencialização de uma SE para uma outra SE do tipo t ;
- CFS_t :Custo fixo para a construção de uma SE do tipo t ;
- $dist_{ij}$:Distância da linha ij ;
- I_{ijk_g} :Corrente na linha ij para o cenário de operação k , no período g ;
- I_{ij}^{max} :Corrente máxima permitida na linha ij ;
- Ke_{ig} :Custo do KW/h para o cenário de operação i , no período g ;
- Le :Conjunto de linhas existentes no sistema;
- Lp :Conjunto de linhas propostas para o sistema;
- L :Conjunto de linhas disponíveis no sistema;
- na :Número de anos do horizonte de planejamento;
- nb :Número de barras do sistema;
- nb_{SE_i} :Número de barras conectadas à SE_i ;
- nce :Número de cenários de operação da rede;
- nSE :Número de SEs em operação no sistema;
- nl_{SE_i} :Número de linhas conectadas à SE_i ;
- pp :Numero de períodos do horizonte de planejamento;
- Pg_{ig}^k :Potência ativa gerada na barra i no cenário de operação k , no período g ;
- Pd_{ig}^k :Demanda de potência ativa na barra i no cenário de operação k , no período g ;
- Qg_{ig}^k :Potência reativa gerada na barra i no cenário de operação t , no período g ;
- Qd_{ig}^k :Demanda de potência reativa na barra i no cenário de operação t , no período g ;
- R_{ij_g} :Resistência em Ω/Km da linha ij , no período g ;
- S :Conjunto de tipos de SEs a serem construídas e/ou repotencializadas;
- SE_e :Conjunto de SEs existentes no sistema;
- SE_p :Conjunto de SEs propostas para serem construídas o sistema;
- $S_{SE_{ig}}$:Potência em kVA da SE_i , no período g ;
- $S_{jk_g}^{carga}$:Potência em kVA demandada na barra j no cenário de operação k , no período g ;
- $S_{ik_g}^{perdas}$:Perdas em kVA na linha i no cenário de operação k , no período g ;
- txj :Taxa de juros;

- T_i :Tempo de operação do sistema no cenário de operação i ;
- V_{ikg} :Tensão na barra i no cenário de operação k , no período g ;
- $V_{min}V_{max}$:Limites mínimo e máximo, respectivamente, das magnitudes de tensão preestabelecidas;
- $y1_{kijg}$:Variável binária de decisão para a troca (1) ou não (0), de cabo da linha ij para o cabo do tipo k , no período g ;
- $y2_{kijg}$:Variável binária de decisão para a construção (1) ou não (0), do trecho ij com o cabo tipo k , no período g ;
- $y3_{tng}$:Variável binária de decisão para a repotencialização (1) ou não (0), da SE_n para uma SE do tipo t , no período g ;
- $y4_{tng}$:Variável binária de decisão para a construção (1) ou não (0), da SE_n do tipo t , no período g ;
- $y5_{ijg}$:Variável binária de decisão para a operação (1) ou não (0), da linha ij no período g ;
- $y6_{ig}$:Variável binária de decisão para a operação (1) ou não (0), da SE_i no período g ;
- Ω_i :Conjunto de barras conectadas à barra i ;
- θ_{ijk} : Ângulo entre as magnitudes das tensões das barras i e j , no cenário de operação k , no período g .

Na função objetivo (eq. 1) consideram-se os custos fixos e variáveis dos elementos que compõem os sistemas de distribuição. Os custos fixos representam os investimentos em infra estrutura, ou seja, na construção de novas linhas, no recondutoramento das linhas existentes, na construção de novas SEs e na repotencialização das SEs existentes. Os custos variáveis são os custos das perdas técnicas sob diferentes condições de cargas necessárias para operar a rede de distribuição. Os custos fixos e variáveis são atualizados ao valor presente através de fatores que relacionam a taxa de juros praticada referentes ao ano do horizonte de planejamento em estudo.

A minimização da função objetivo está sujeita a um conjunto de restrições descritas pelo conjunto de equações 2-11. A eq. 2 refere-se à qualidade do fornecimento de energia, mantendo o perfil de tensão do sistema dentro de limites preestabelecidos pelas agências reguladores. As eqs. 3 e 4 fazem parte do o conjunto de equações algébricas não lineares (Leis de Kirchhoff) que garantem o atendimento das demandas de potências ativa e reativa em todas as barras da rede. A eq. 5 assegura os limites operacionais dos cabos que compõem o sistema de distribuição. A equação 6 estabelece que a capacidade de potência disponível em uma SE deve ser suficiente, para atender durante todo o período de planejamento, as cargas das barras bem como as perdas nas linhas, sob os diferentes cenários de operação. A eq. 7 é uma condição necessária, mas não suficiente para a radialidade do sistema. As eqs. 8-11 garantem que para cada ação de construção ou repotencialização, seja selecionado apenas um tipo de cabo ou subestação.

3. Técnica de solução

Para a solução do problema de planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica é proposto um algoritmo Busca Tabu. O algoritmo foi desenvolvido para considerar as características específicas do problema, obter confiabilidade nos resultados e eficiência computacional. Nas subseções seguintes o algoritmo proposto é apresentado detalhadamente.

3.1 Função de adaptação

No modelo as restrições de igualdade são consideradas através da solução de um algoritmo de fluxo de potência (Shirmohammadi, 1988). As restrições de desigualdade violadas são consideradas no processo de solução através do uso de técnicas de penalidades. Desta forma, a função de adaptação avaliada durante o processo iterativo é composta da função objetivo do problema e de termos que representam as penalizações da configuração sob análise devido à violação de restrições, através da equação:

$$F_{adp} = f_0 + \sum_{i=1}^M \mu_i |b_i| \quad (12)$$

Em que:

- f_0 :Função objetivo do problema (Eq. 1);
- μ_i :Termo de penalidade da restrição i ;
- $|b_i|$:Especifica o quanto a restrição i está violada (Eq. 2 a 6);
- M :Número total de restrições do problema.

3.2 Configuração inicial e Codificação

Para gerar a configuração semente inicial é utilizada uma heurística construtiva que consiste em criar conexões entre as SEs existentes e futuras e as novas cargas que devem ser energizadas, através da construção de novas linhas. A heurística proposta considera a potência disponível das subestações, a radialidade do sistema e as propostas preestabelecidas para construção das linhas. Esta heurística construtiva consiste dos seguintes passos:

- (i) Escolher uma barra de carga j para ser energizada e ir ao passo ii .
- (ii) Escolher entre as SEs existentes e que não foram analisadas, a SE com maior potência disponível e ir ao passo iii .
- (iii) Se a potência disponível na SE escolhida for maior que a carga da barra j , conectar a barra j a um alimentador da SE escolhida através da rota de menor distância utilizando o cabo de menor bitola e ir ao passo v . Caso não exista conexão entre a barra j e a SE escolhida ir ao passo iv . Se a potência disponível na SE escolhida for menor que a carga da barra j ir ao passo v ;
- (iv) Se existir SE a ser analisada para energizar a barra j voltar ao passo ii . Caso contrário vá para o passo v .
- (v) Se existem barras a serem analisadas voltar ao passo i . Caso contrário ir ao passo vi ;
- (vi) Caso ainda existam barras desenergizadas ir ao passo vii . Caso contrário ir ao passo x ;
- (vii) Repotencializar a SE de menor custo e voltar ao passo i para analisar as barras que não foram conectadas ao sistema. Caso não seja possível a repotencialização das SEs ir para o passo $viii$.
- (viii) Se for possível a construção de SEs, construir a SE de menor custo e reinicializar o processo a partir do passo i considerando nesta nova etapa a SE construída, caso contrário ir ao passo ix ;
- (ix) Ligar as barras que permaneceram desconectadas, desconsiderando os limites operacionais das SEs, gerando soluções inicialmente infactíveis, conectando estas cargas aos alimentadores mais próximos e ir para o passo x ;
- (x) Verificar as potências das SEs, para verificar se existe a possibilidade de retornar a SE sob análise para o valor da potência inicial. Montar o vetor de codificação da solução inicial (Figura 1).

A codificação proposta para o problema de planejamento de sistemas de distribuição é feita em base decimal para representar as características das subestações e condutores que compõem o sistema de distribuição. A proposta de codificação é ilustrada na figura 1.

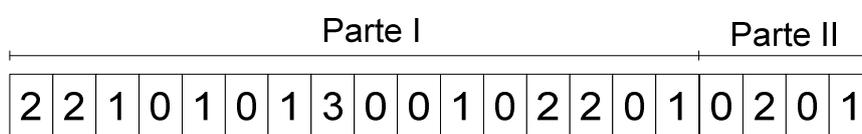


Figura 1. Sistema de codificação.

A primeira parte do sistema de codificação representa todas as linhas existentes e propostas para o sistema sob análise. Os números inteiros são utilizados para representar os tipos de cabos que são utilizados em cada linha, e os zeros representam as linhas que não fazem parte da topologia do sistema sob análise. No exemplo ilustrado na figura 1 de 16 possíveis ramos para o sistema 10 estão conectados, sendo que 5 possuem cabos do tipo 1, 4 possuem cabos do tipo 2 e um com cabo do tipo 3.

A segunda parte da codificação refere-se às subestações do sistema. De maneira análoga à parte referente às linhas do sistema os números inteiros representam os tipos de subestações (SE) construídas em cada barra candidata. Nem todas as barras do sistema são candidatas para a construção de SEs, assim na codificação as posições são índices de um vetor que armazena as barras candidatas à construção das SEs. Considerando um vetor de barras candidatas à construção de SEs $CSE=[1\ 5\ 10\ 15]$, a codificação da figura 1 representa uma SE do tipo 2 na barra 5, e de uma SE do tipo 1 na barra 15.

3.3 Estrutura de Vizinhança

Para a codificação proposta neste trabalho, consideram-se que os vizinhos são gerados de duas maneiras: pela troca de linhas (algoritmo *branch exchange*) e pela adição ou subtração de SEs.

A técnica da troca de linhas consiste em substituir uma linha que está conectada ao sistema na topologia atual por uma linha que faz parte do conjunto de linhas que podem ser construídas, mantendo-se a topologia radial do sistema. Para ilustrar esta técnica considere a figura 3:

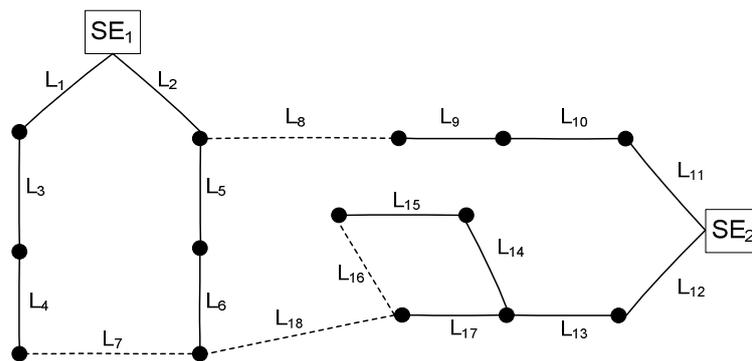


Figura 3: Sistema exemplo para análise da estrutura de vizinhança do algoritmo BT

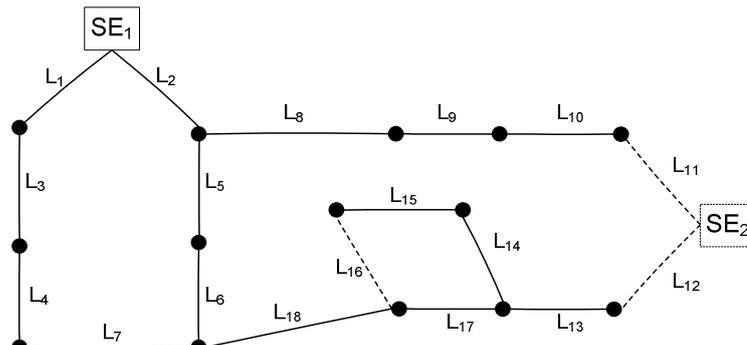
- Caso a linha L_7 seja adicionada ao sistema uma das linhas L_1, L_2, L_3, L_4, L_5 ou L_6 deve ser desconectada, sendo assim, para a linha L_7 existem seis possíveis vizinhos;
- Caso a linha L_8 seja adicionada, uma das linhas L_2, L_9, L_{10} ou L_{11} deve ser desconectada, sendo assim, para a linha L_8 existem quatro possíveis vizinhos;
- Caso a linha L_{16} seja adicionada, uma das linhas L_{14}, L_{15} ou L_{17} deve ser desconectada, sendo assim, para a linha L_{16} existem três possíveis vizinhos;
- Caso a linha L_{18} seja adicionada, uma das linhas $L_2, L_5, L_6, L_{12}, L_{13}$ ou L_{17} deve ser desconectada, sendo assim, para a linha L_{18} existem seis possíveis vizinhos.

Desta maneira um vizinho gerado a partir da troca de linhas, é qualquer topologia que se diferencie da topologia atual em apenas uma linha. Para esta nova topologia, a seleção dos cabos para as novas linhas e para o recondutoramento das linhas existentes, caso seja necessário, é feita através de uma heurística proposta por Franco (2010). Para a nova topologia também é avaliada a necessidade da repotencialização das SEs.

A subtração de SEs é realizada apenas para as SEs propostas, ou seja, para aquelas que foram adicionadas no sistema inicial. A subtração é realizada através dos seguintes passos:

- (i) Escolher aleatoriamente uma SE para ser desconectada. Para ilustrar o processo, considere que a SE_2 , da figura 3 seja escolhida;

- (ii) Encontrar as possíveis ligações para os alimentadores alimentados pela SE selecionada para ser desligada. No caso ilustrado são as linhas L_8 para o alimentador que é iniciado pela linha L_{11} e a linha L_{18} para o alimentador que é iniciado pela linha L_{12} ;
- (iii) Caso seja possível reconectar todos os alimentadores da SE escolhida, retirar a SE sob análise do sistema. Caso contrário escolher outra SE e voltar ao passo *ii*. Se não houver mais SEs a serem analisadas encerrar o processo. No caso ilustrado as linhas L_8 e L_{18} são adicionadas ao sistema e L_{11} e L_{12} são retiradas. A figura 4 ilustra o vizinho gerado.



(iv) Figura 4– Ilustração da vizinhança de retirada de SE.

Encontrada a nova topologia do sistema, os cabos para as novas linhas e recondutoramento das linhas existentes são selecionados através da heurística proposta por Franco (2010).

De maneira análoga à subtração, a adição de novas SE é realizada através dos seguintes passos:

- (i) Escolher aleatoriamente uma SE proposta para se conectada o sistema.
- (ii) Escolher uma linha que se conecta com a SE escolhida e ir para o passo *iii*. Caso não exista ou todas as linhas que se conectam com a SE já tenham sido analisadas encerrar o processo.
- (iii) Conectar a linha escolhida à SE sob análise. Encontrar as possíveis linhas a serem desconectadas em função da linha que foi conectada e desconectar aleatoriamente uma delas, para que o sistema continue radial. Voltar ao passo *ii*.

Para a figura 4 tem-se:

Iniciado o processo pela linha L_{11} , uma das linhas L_2, L_8, L_9 ou L_{10} deve ser desconectada. Caso uma das linhas L_8, L_9 ou L_{10} seja desconectada considerando agora a linha L_{12} , uma das linhas $L_2, L_5, L_6, L_{18}, L_{17}$ ou L_{13} deve ser desconectada. Para o caso em que a linha L_2 seja desconectada devido à linha L_{11} ser adicionada ao sistema, as linhas a que podem ser desconectadas pela adição de L_{12} são: $L_5, L_6, L_8, L_9, L_{10}, L_{13}, L_{17}, L_{18}$.

3.4 Lista Tabu e Critério de Aspiração

A lista tabu (LT) armazena os atributos proibidos, evitando que o processo retorne às soluções já visitadas para evitar o processo de ciclagem do algoritmo. Os atributos armazenados na lista tabu são as linhas e SEs retiradas ou adicionadas em uma determinada solução. A LT opera de maneira discreta, proibindo que soluções que possuam atributos proibidos sejam selecionadas. Outro fator importante no que diz respeito à LT é o número de iterações k que o atributo permanece proibido. Na LT implementada neste trabalho o parâmetro k é variável durante o processo. O parâmetro k varia entre um valor máximo e um valor mínimo de iterações.

Para fornecer maior flexibilidade ao processo, uma solução que possui atributo(s) proibido(s) pode ter a proibição descartada se essa configuração satisfaz o critério de aspiração. Na verdade este mecanismo tenta contornar a “rigidez” da LT evitando que soluções de ótima

qualidade não sejam visitadas por compartilharem atributos de soluções visitadas recentemente. O critério de aspiração é a melhoria da função objetivo, ou seja, se a solução sob análise tem função objetivo melhor que a solução incumbente, o critério de aspiração é satisfeito.

3.5 Critério de Convergência

Os critérios de convergência adotados são: o número máximo de iterações executadas pelo algoritmo, ou se a solução incumbente permanecer inalterada durante um número de iterações preestabelecido o processo também é considerado convergido.

4. Resultados

O algoritmo implementado foi testado em um sistema da literatura de 54 barras (Miranda, 1994). Este sistema possui 2 subestações existentes e 2 subestações que podem ser construídas durante a fase de planejamento, 16 linhas existentes e 45 propostas para construção durante a fase de planejamento. O Horizonte de planejamento proposto nos testes é de 15 anos, dividido em três estágios de 5 anos. A taxa de juros utilizada nos testes é de 10% ao ano.

O problema de planejamento é resolvido considerando-se 2 condições de testes. Na primeira condição considera-se o modelo estático onde as cargas do último estágio do horizonte de planejamento são tomadas como referência para o planejamento e expansão do sistema e os investimentos em infra estrutura são realizados no primeiro ano. A função objetivo é analisada para cada ano do horizonte de planejamento levando-se em consideração o estágio em que este ano se enquadra, trazendo ao valor presente os custos das perdas utilizando a taxa de juros. A outra condição de teste é efetuada considerando-se o modelo pseudodinâmico onde a expansão do sistema é realizada de forma sequencial, ou seja, o problema de planejamento é resolvido para cada estágio levando em consideração a solução proposta no estágio anterior.

Para cada ano do horizonte de planejamento são considerados três cenários de operação através dos fatores de carregamento 0,65, 0,80 e 1,0 (carga leve, nominal e pesada). As características dos cabos utilizados nos testes encontram-se na tabela 1. Os custos para a construção de novas linhas e recondutoramento das linhas existentes são apresentados na tabela 2.

Tabela 1. Características dos cabos utilizados.

Tipo	Nome	R (ohm/Km)	X (ohm/Km)	I max (A)
1	AA1	0,3655	0,2520	150
2	AA2	0,2359	0,2402	250
3	AA3	0,1827	0,1260	350
4	AA4	0,1460	0,1233	400
5	AA5	0,1180	0,1201	500
6	AA6	0,0966	0,1201	600

Tabela 2. Custos de construção e recondutoramento das linhas.

Y \ X	Custo (10 ³ RS/Km)					
	1	2	3	4	5	6
0	20,0	30,0	42,0	50,0	67,0	85,0
1	0,0	23,0	37,0	40,0	58,0	76,0
2	0,0	0,0	30,0	35,0	50,0	66,0
3	0,0	0,0	0,0	29,0	43,0	53,0
4	0,0	0,0	0,0	0,0	35,0	45,0
5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	38,0

Na tabela 2 as posições (0,Y) indicam os custos de construção para uma linha com cabo do tipo Y. Já as posições (X,Y), X = 1, ..., 5 e Y = 0, ..., 6 indicam o custo do recondutoramento de uma linha do tipo X, para uma linha do tipo Y. As características e custos das SEs utilizados nos testes são apresentados na tabela 3.

Na tabela 4 estão os resultados encontrados pelo algoritmo para a construção e recondutoramento das linhas considerando os modelos estático e pseudodinâmico. Os valores negativos na tabela 4 ilustram linhas existentes que no atual estágio do horizonte de planejamento encontram-se desligadas.

Tabela 3. Características e custos para a construção e repotencialização das SEs.

SE	Tipo	Potência kVA		Custos (10 ³ RS)	
		Tipo 1	Tipo 2	Repotencialização	Construção
101	1	16700,0	33400,0	1400,0	0,0
102	1	16700,0	30000,0	1200,0	0,0
103	0	0,0	22000,0	0,0	3000,0
104	0	0,0	22000,0	0,0	3000,0

Tabela 4. Cabos das linhas das soluções encontradas com os modelos estático e pseudodinâmico.

Linha	Estático	Pseudodinâmico			Linha	Estático	Pseudodinâmico		
		P1	P2	P3			P1	P2	P3
1	6	6	6	6	32	1	1	1	1
2	5	6	6	6	33	6	0	4	6
3	4	6	6	6	34	1	1	1	1
4	2	5	5	5	35	4	2	2	2
5	2	2	2	2	36	2	1	1	1
6	0	5	5	5	37	1	0	1	1
7	0	2	2	2	38	0	1	-1	-1
8	4	6	6	6	39	0	4	-4	4
9	2	2	2	2	40	2	1	4	6
10	2	2	2	2	41	1	1	4	6
11	6	5	5	6	42	0	1	1	6
12	2	2	2	2	43	1	1	1	5
13	2	2	2	2	44	1	0	1	1
14	5	6	6	6	45	4	0	0	4
15	5	6	6	6	46	0	2	2	0
16	2	4	4	-4	47	6	1	1	1
17	1	1	1	1	48	6	1	1	1
18	2	1	1	1	49	6	1	1	1
19	1	2	-2	-2	50	6	0	0	0
20	0	4	4	4	51	5	0	0	0
21	4	1	1	2	52	5	0	0	0
22	5	0	4	4	53	1	0	0	0
23	4	0	2	2	54	0	1	1	1
24	0	1	-1	-1	55	4	1	1	1
25	2	1	1	1	56	2	1	1	1
26	1	1	1	1	57	1	0	1	1
27	1	0	1	1	58	1	0	0	1
28	0	1	0	0	59	0	1	1	4
29	2	0	2	2	60	1	1	1	4
30	1	0	1	1	61	2	1	4	4
31	4	0	0	0					

Os resultados referentes à construção e repotencialização das SEs são apresentados na tabela 5. Os custos das soluções encontradas pelos modelos estático e pseudodinâmico são descritos na tabela 6. Os valores apresentados na tabela 6 são os custos referidos ao valor presente através do fator de atualização, que está relacionado com estágio em estudo.

Tabela 5. Soluções para a construção e repotencialização das SEs

SE	Estático	Pseudodinâmico		
		P1	P2	P3
101	1	2	2	2
102	1	1	1	2
103	2	0	0	0
104	2	0	2	2

Tabela 6. Custos referidos ao valor presente para os modelos estático e pseudodinâmico.

Modelo	Período	Custo (10 ³ RS)						Total
		Linhas		SE		Perdas		
		Nominal	Corrigido	Nominal	Corrigido	Nominal	Corrigido	
Estático	1	1048,84	1048,84	6000,00	6000,00	329,90	250,11	7892,66
	2	0,0	0,0	0,0	0,0	631,61	297,33	
	3	0,0	0,0	0,0	0,0	1013,92	296,37	
Pseudo-dinâmico	1	800,55	800,55	1400,00	1400,00	920,80	698,00	6604,19
	2	222,14	125,40	3000,00	1693,42	1195,44	562,76	
	3	284,21	99,61	1200,00	420,60	2114,66	568,72	

Os resultados apresentados foram obtidos através de testes exaustivos com a implementação computacional da metodologia proposta. Nas simulações a dimensão da lista tabu varia entre 5 e 20 iterações. Os parâmetros utilizados na convergência apresentam grande influência nos resultados devido ao elevado número de ótimos locais do problema. Em muitas situações o algoritmo apresentou uma convergência prematura devido o critério de convergência que se refere ao valor incumbente da função objetivo. Este tipo de problema não foi apresentado quando o critério de convergência utilizado foi apenas o número máximo de iterações estabelecido em 500 iterações.

5. Conclusões

Neste trabalho o problema de planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica foi formulado com um *PNLIM*. O modelo matemático proposto incorpora características reais do problema como construção e recondução das linhas, construção e repotencialização das SEs. Estas ações de planejamento podem ocorrer em diferentes períodos do horizonte de planejamento.

O algoritmo Busca Tabu desenvolvido para resolver o problema apresentou resultados de excelente qualidade, para os modelos estático e pseudodinâmico. A codificação baseada em números inteiros permite que as propostas de solução sejam mapeadas com eficiência e sejam encontradas soluções de boa qualidade através do processo de busca. A implementação da LT de dimensão variável também proporcionou melhoria no desempenho do algoritmo.

Verifica-se na solução apresentada pelo modelo pseudodinâmico que existem algumas linhas que foram construídas em um determinado estágio e em um estágio posterior encontram-se desligadas. Isto ocorre devido o planejamento ser feito independentemente para cada estágio, levando em consideração apenas a solução do estágio anterior. As linhas são desligadas com o passar do tempo devido à repotencialização e construção de SEs mais próximas às cargas gerando assim menos perdas no sistema. Este planejamento independente entre os estágios também gera uma grande quantidade de linhas reconduzidas de um estágio para o outro. Sob o ponto de vista prático as linhas que são desligadas podem ser utilizadas como linhas de interligação para reconfiguração do sistema em estágios futuros (tabela 4 linha 39) e restauração da rede sob contingências com custos de investimentos praticamente nulos.

Desta forma os custos nominais apresentados para o planejamento pseudodinâmico são mais elevados em relação ao planejamento estático, entretanto quando os investimentos são realizados em diferentes períodos e os custos são atualizados para o valor presente através da taxa

de juros utilizada nos testes (tabela 6), e a solução encontrada pelo planejamento pseudodinâmico torna-se economicamente mais atrativa.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do estado de São Paulo – FAPESP (Proc. 2009/08428-4 e 2009/53841-7) e o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (Proc. 302272/2009-7 e 475219/2009-0), pelo apoio financeiro no desenvolvimento deste projeto de pesquisa.

Referências

- Bernal-Agustin, J. L., Ramirez-Rosado, I. J.** (1998), Genetic algorithm applied to the design of large power distribution systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 22, n. 2, p. 851-861.
- Cossi, A. M.** Planejamento de redes de distribuição de energia elétrica de média e baixa tensão, *Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira*, 2008.
- Diaz-dorado, E. e Piedre, J.C.** (2004), Optimal planning of unbalanced networks using dynamic programming optimization, *IEEE Transactions on Power Systems*, v.19, n.4, p. 2077–2085.
- Franco, J. F., Romero, R. A., Gallego, R. A.** (2010), Um método heurístico eficiente para a seleção ótima de condutores e o recondutoramento de alimentadores primários em sistemas de distribuição de energia elétrica, *Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Automática*, 4516-4522.
- Gómez, J. F., Khodr, H. M., Oliveira, P. M., Ocque, L., Yusta, J. M., Villasana, R., Urdaneta, A. J.** (2004), Ant colony system algorithm for the planning of primary distribution circuits. *IEEE Transactions on Power Systems*, v.19, n.2, p. 996–1004.
- Gönen, T.**, *Electric power distribution systems engineering*, McGraw-Hill, New York, 1986.
- Mendoza, F., Bernal-Agustin, J. L., Dominguez-Navarro, J. A.** (2006), NSGA and SPEA applied to multiobjective design of power distribution systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, v.21, n.4, p.1938-1945.
- Miguez, E., Cidras, J., Diaz-dorado, E., Garcia-Dornelas, E. J. L.** (2002), An improved branch-exchange algorithm for large-scale distribution network planning. *IEEE Transactions on Power Systems*, v.17, n.4, p 931–936, 2002.
- Miranda, V., Ranito, J. V. and Proença, L. M.** (1994), Genetic algorithms in optimal multistage distribution network planning. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 9, n.4, p.1927-1933.
- Oliveira, M. L.** Planejamento integrado da expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica, *Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade de Campinas – UNICAMP, Campinas*, 2010.
- Paiva, P. C., Khodr, H. M., Dominguez-Navarro, J. A., Yusta, J. M., Urdaneta, A. J.** (2005), Integral planning of primary-secondary distribution systems using mixed interger linear programming. *IEEE Transactions on Power Systems*, v.20, n.2, p.1134–1143.
- Proença, L. B.** Algoritmos Genéticos no Planejamento de Expansão de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica, *Dissertação de Mestrado*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 1993.
- Ramirez-Rosado, I. J., Bernal-Agustin, J. L.** (2001), Reliability and costs optimization for distribution networks expansion using an evolutionary algorithm, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 16, n.1, p. 111-118.
- Ramirez-Rosado, I. J., Dominguez-Navarro, J. A.** (2004), Possibilistic model based on fuzzy sets for the multiobjective optimal planning of power electric distribution networks, *IEEE Transaction on Power System*, v. 19, p. 1801-1810.
- Ramirez-Rosado, I. J., Dominguez-Navarro, J. A.** (2006), New multiobjective tabu search algorithm for fuzzy optimal planning of power distribution systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, v.21, n.1, p.224–233.
- Shirmohammadi, D.; Hong, H. W.; Semlyen, A.; Luo, G. X.** (1988), A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks, *IEEE Transactions on Power Systems*, v.3, n.2, p.753-762.