

PLANEJAMENTO E PROJETO DE SISTEMAS SECUNDÁRIOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DE UM ALGORITMO DE BUSCA EM VIZINHANÇA VARIÁVEL

Diogo Rupolo*
José Roberto Sanches Mantovani¹

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP
Departamento de Engenharia Elétrica
rupolo.diogo@gmail.com*
mant@dee.feis.unesp.br¹

RESUMO

Neste trabalho propõe-se uma metodologia para realizar o planejamento e projeto de sistemas secundários de distribuição de energia elétrica, considerando aspectos físicos e econômicos. No modelo matemático, minimizam-se os custos relacionados à fase de projeto do sistema, como a instalação de transformadores, condutores, postes, estruturas, além dos custos operacionais associados às perdas elétricas. Considera-se também o balanceamento de cargas entre as fases da rede secundária e o planejamento da construção de linhas de média tensão necessárias para interligar o sistema primário e secundário. Para solução do modelo de planejamento é proposta a meta-heurística GVNS (*General Variable Neighborhood Search*), baseada em dois níveis de estruturas, que permitem explorar o espaço de busca através dos critérios de intensificação e diversificação. São realizados testes em um sistema de 76 barras com o objetivo de mostrar a eficiência e a robustez do algoritmo proposto para solução do problema de planejamento e projeto de sistemas secundários.

PALAVRAS CHAVE: Planejamento de Redes Secundárias, Busca em Vizinhança Variável, GVNS (*General Variable Neighborhood Search*).

Área principal: PO na área de Energia.

ABSTRACT

This paper presents a methodology to carry out the planning and design of secondary power distribution grid, considering the physical and economic aspects. In the mathematical model, the minimization of design system cost is taken into account, where the installation of cables, transformers, poles, structures and system operating cost associated to electrical losses are considered as well. Moreover, the proposed algorithm is able to carry out the balancing of the connected loads among phases of the system and the construction of medium voltage power lines necessary to connect the primary-secondary grids. In order to find a high-quality solution of such a problem, a general variable neighborhood (GVNS), based on two-level VNS scheme that permits exploring the search space through intensification and diversification criteria, is applied. The proposed approach is verified via a 76-bus system and the results demonstrate effectiveness and robustness to solve the planning and design of secondary systems problem.

KEYWORDS: Secondary Network Planning, Variable Neighborhood Search, GVNS (*General Variable Neighborhood Search*).

Main area: PO in the energy area.

1. Introdução

O planejamento e projeto de sistemas secundários de distribuição de energia elétrica é um problema de programação não linear inteiro misto. O seu objetivo principal consiste em obter um plano de construção dos circuitos de baixa tensão, de forma a atender a todos os pontos de consumo, além da expansão da rede de média tensão até os transformadores abaixadores, de forma a interligar o sistema secundário ao primário. Com este planejamento, busca-se minimizar os custos fixos e variáveis associados ao problema. Os custos fixos estão relacionados com a instalação dos equipamentos no sistema, como transformadores, condutores, estruturas e postes, enquanto os custos variáveis relacionam-se com as perdas elétricas (Cossi, 2005).

Na busca do menor custo possível para o projeto, são determinadas a quantidade, posição e capacidade dos transformadores, o dimensionamento dos condutores primários e secundários, o dimensionamento dos postes e os tipos de estruturas primárias e secundárias que devem ser utilizadas. Além disso, realiza-se o balanceamento das cargas entre as fases do sistema, com o objetivo de melhorar as condições operacionais da rede. Como restrições do problema, consideram-se os atendimentos as demandas nos pontos de consumo, os limites de tensão especificados pelas normas das agências reguladoras, os limites físicos de operação dos transformadores, além dos recursos financeiros disponíveis para o investimento (Cossi, 2009).

Na literatura especializada destacam-se poucos trabalhos que abordam o planejamento de sistemas secundários. Dentre estes, alguns empregam técnicas baseadas em metaheurísticas, tais como, Algoritmo Genético, Cossi (2005), GRASP - *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*, Garcia (2003), Busca Tabu, Souza (2003) e Cossi (2009). Outros trabalhos utilizam modelos de programação matemática inteira mista, entre estes, Souza (2001) e Costa (2002).

O problema de planejamento e projeto de sistemas secundários de distribuição, da forma como abordada neste trabalho, possui uma característica natural e hierárquica de vizinhança. Dentre todas as meta-heurísticas que utilizam em seus procedimentos o conceito de vizinhança para percorrer o espaço de busca do problema, optou-se neste trabalho pela meta-heurística de busca em vizinhança variável do tipo GVNS (*General Variable Neighborhood Search*). O algoritmo GVNS tem se mostrado mais eficaz na busca de soluções em diversos problemas de otimização, devido a sua generalidade, quando comparado com outras meta-heurísticas de busca em vizinhança variável, tais como VND (*Variable Neighborhood Descendent*), VNS (*Variable Neighborhood Search*), BVNS (*Basic Variable Neighborhood Search*), entre outras. Além disso, o algoritmo GVNS possibilita contemplar as meta-heurísticas VND e VNS em seu contexto, tornando-se assim um algoritmo bem mais robusto e eficiente (Mladenovic, 1997).

O algoritmo GVNS trabalha com dois conjuntos de estruturas de vizinhanças, denominados por conjuntos de nível superior e inferior. O conjunto de estruturas do nível superior é responsável por fazer com que o procedimento de busca consiga escapar de ótimos locais, levando a exploração de soluções no espaço de busca para outras regiões, ou seja, realiza um processo de diversificação em torno da solução incumbente. O conjunto de nível inferior tem por objetivo, a realização de buscas locais em uma determinada solução, com o objetivo de encontrar soluções de qualidade para o problema, realizando um processo de intensificação em torno da solução corrente. Contudo, busca-se através do algoritmo GVNS percorrer as regiões mais promissoras do espaço de busca, através dos conjuntos de estruturas de vizinhança e encontrar soluções de qualidade para o planejamento e projeto de sistemas secundários de distribuição de energia elétrica.

Na seção I deste trabalho aborda-se em linhas gerais o problema de planejamento e projeto de sistemas secundários de distribuição de energia elétrica, justificando-se o critério para escolha da meta-heurística. Na seção II apresenta-se o modelo matemático do problema. Na seção III aborda-se a estrutura e filosofia do algoritmo GVNS, utilizado para encontrar soluções de qualidade durante o processo de busca. Destacam-se também as estruturas de vizinhança utilizadas como forma de geração de soluções. Na seção IV apresentam-se os resultados de testes realizados através da implementação computacional do algoritmo proposto para um sistema de 76 barras. Na seção V apresentam-se as conclusões sobre a metodologia proposta.

2. Modelo Matemático

O modelo matemático do problema de planejamento de sistemas secundários de distribuição de energia elétrica pode ser formulado genericamente como:

$$\begin{aligned} \text{Min } W = & \sum_{u \in NC} \left[\sum_{ij \in L^u} \sum_{f \in F} \sum_{k \in C} [C_{kwh} \cdot T \cdot (V_{i_f}^u - V_{j_f}^u) \cdot I_{ij_f}^u + CFCS_k^u] \right. \\ & \left. + \sum_{k \in N} CFT_k^u \cdot tk + \sum_{k \in S} CFES_k^u \cdot hk + \sum_{k \in M} CFEP_k^u \cdot gk \right] + \sum_{p \in B} \sum_{k \in U} CFCP_k^p \cdot fk \end{aligned} \quad (1)$$

sujeito às seguintes restrições:

$$Z^u = (P_{Di_{abc}}^u, Q_{Di_{abc}}^u, V_{i_{abcn}}^u, \theta_{i_{abcn}}^u) = 0 \quad (2)$$

$$\sum_{i \in NB^u} P_{u,i_{abc}}^C + \sum_{ij \in L^u} P_{u,ij_{abcn}}^{LP} \leq \sum_{i \in Nt^u} P_{u,i_{abc}}^T \quad (3)$$

$$\sum_{i \in NB^u} Q_{u,i_{abc}}^C + \sum_{ij \in L^u} Q_{u,ij_{abcn}}^{LP} \leq \sum_{i \in Nt^u} Q_{u,i_{abc}}^T \quad (4)$$

$$V_{u,i_{abcn}}^{\min} \leq V_{u,i_{abcn}}^{cal} \leq V_{u,i_{abcn}}^{\max} \quad (5)$$

$$|f_{ij_{abcn}}^u| \leq \bar{f}_{ij_{abcn}}^u \quad (6)$$

$$RF \leq RF_{\max} \quad (7)$$

em que: W : custo da função objetivo (US\$); C_{kwh} : custo fixo do quilowatt-hora (kW/h) em US\$; T : período considerado em horas; NC : conjunto dos circuitos do sistema secundário, $NC = \{u_1, u_2, u_3 \dots u_k \dots u_n\}$; u_k : $k^{\text{ésimo}}$ circuito do sistema secundário; F : conjunto das fases a, b, c e neutro do sistema. C : conjunto dos tipos de cabos disponíveis para instalação no sistema secundário; L^u : conjunto de ramos existentes no circuito u ; $CFCS_k^u$: custo fixo do condutor secundário k a ser instalado em um ramo do circuito u ; $V_{i_f}^u, V_{j_f}^u$: tensão na barra i e j respectivamente na fase f do circuito u ; $I_{ij_f}^u$: corrente no ramo ij na fase f do circuito u ; N : conjunto que representa os possíveis locais para a instalação dos transformadores no sistema secundário; CFT_k^u : custo fixo do transformador do circuito u ; tk : variável de decisão binária para a instalação ou não de um transformador no nó k do circuito u ; M : conjunto dos tipos de estruturas do sistema primário; $CFEP_k^u$: custo fixo da estrutura primária existente no circuito u ; gi : variável de decisão para a instalação ou não de uma estrutura na rede primária; S : conjuntos de estruturas disponíveis para alocar no sistema secundário; $CFES_k^u$: custo fixo da estrutura secundária existente no circuito u ; hk : variável de decisão binária para a instalação ou não da estrutura da rede secundária no nó k do circuito u ; U : conjunto de cabos que podem ser instalados no sistema primário; $CFCP_k^u$: custo fixo do condutor primário existente no circuito u ; fk : variável de decisão binária para a instalação ou não de um condutor na rede primária; B : conjunto de todos os ramos possíveis de serem construídos no sistema; Z^u : equações de fluxo de potência para cada circuito u ; $P_{Di_{abc}}^u, Q_{Di_{abc}}^u$: demandas de potência ativa e reativa nas fases abc da barra i do circuito u ; $V_{i_{abcn}}^u, \theta_{i_{abcn}}^u$: magnitude de tensão e ângulo nas fases abc e neutro na barra i do circuito u . $P_{u,i_{abc}}^C, Q_{u,i_{abc}}^C$: potências ativa e reativa consumidas nas fases abc da barra i do circuito u ; $P_{u,ij_{abcn}}^{LP}, Q_{u,ij_{abcn}}^{LP}$: perdas ativa e reativa no ramo ij nas fases abc e neutro do circuito u ; $P_{u,i_{abc}}^T, Q_{u,i_{abc}}^T$: potências ativa e reativa do transformador instalado na barra i , fases abc do circuito u ; NB^u : conjunto formado pelas barras do circuito u ; Nt : conjunto formado pelo tipo de transformadores; $V_{u,i_{abcn}}^{\min}, V_{u,i_{abcn}}^{\max}$: limites mínimo e máximo de magnitude de tensão na barra i nas fases abc e neutro do circuito u ; $V_{u,i_{abcn}}^{cal}$: tensão calculada no nó i , nas fases abc e neutro do circuito u ; $f_{ij_{abcn}}^u$: fluxo de corrente no ramo ij nas fases abc e neutro do circuito u ; $\bar{f}_{ij_{abcn}}^u$: fluxo máximo de corrente permitido no ramo ij nas fases abc e neutro do circuito u ; RF, RF_{\max} : recurso financeiro e recurso financeiro máximo, respectivamente, disponível para ser investido no planejamento e projeto de circuitos secundários.

A equação (1) representa a função objetivo do problema, que minimiza os custos relacionados com a operação (perdas elétricas) e a instalação dos elementos físicos do sistema (postes, estruturas, cabos, transformadores). O conjunto de equações (2) são as equações estáticas de fluxo de potência trifásico a quatro fios (Ciric *et al.* 2003), que representam o balanço de potência ativa e reativa segundo as leis de Kirchoff. As equações (3) e (4) determinam a capacidade máxima nominal dos transformadores. A equação (5) representa os limites máximo e mínimo de queda de tensão nos alimentadores permitidos pelas normas reguladoras. A equação (6) especifica a intensidade máxima de corrente que pode fluir pelos condutores. A equação (7) representa o recurso financeiro disponível que pode ser investido na execução do projeto.

3. Metodologia

Neste trabalho é implementada a meta-heurística GVNS como técnica de busca de soluções para o problema de planejamento e projeto de sistemas secundários de distribuição de energia elétrica. A meta-heurística GVNS é um método de busca baseado em vizinhanças variáveis, que explora sistematicamente a troca de estruturas de vizinhança, com o objetivo de encontrar ótimos globais e ao mesmo tempo escapar de ótimos locais. A estratégia principal dos algoritmos de busca em vizinhança variável é baseada em três hipóteses: (1) um mínimo local de uma determinada estrutura de vizinhança pode não ser um mínimo local em relação às outras estruturas de vizinhança; (2) um mínimo global é visto como um mínimo local para as outras estruturas de vizinhança; (3) na maioria dos problemas, os mínimos locais em relação a uma ou várias estruturas, são bem próximos uns dos outros. Os passos do algoritmo GVNS são: (Mladenovic, 1997):

Algoritmo de Busca Geral em Vizinhança Variável

- Inicialização:** Selecionar um conjunto de estruturas N_k , $k = 1, \dots, k_{max}$ (busca superior) e um conjunto de estruturas N_s , $k = 1, \dots, s_{max}$ (busca local). Encontrar uma solução inicial e escolher um critério de parada. Fazer $k = 1$;
- 1:** **Repetir até** que o critério de parada seja atendido:
- 2:** **Enquanto** ($k \leq k_{max}$);
- 3:** Gerar uma solução x' aleatória na $k^{ésima}$ estrutura de vizinhança de x ($x' \in N_k$).
- 4:** Realizar uma busca local.
- 5:** Fazer $s = 1$;
- 6:** **Enquanto** ($s \leq s_{max}$)
- 7:** Encontrar o melhor vizinho x'' de x' em $N_s(x)$;
- 8:** **Se** $f(x'') < f(x')$, então:
- 9:** Fazer $x' \leftarrow x''$ e $s = 1$;
- 10:** Senão:
- 11:** Fazer $s = s + 1$;
- 12:** **Fim se:**
- 13:** **Fim Enquanto;**
- 14:** **Se** $f(x') < f(x)$, então:
- 15:** Fazer $x \leftarrow x'$ e $k = 1$;
- 16:** Senão $k = k + 1$;
- 17:** **Fim Enquanto**
- 18:** **Fim Repetir até;**
-

3.1 Geração da Configuração Inicial

A configuração inicial dos circuitos secundários é gerada através de uma heurística construtiva. Esta heurística consiste de forma geral em determinar a posição mais adequada para a alocação dos transformadores além de conectar os nós de consumo nos circuitos correspondentes, considerando a factibilidade em relação à potência nominal dos transformadores. Os passos desta heurística são ilustrados a seguir.

i. Realizar a leitura de dados dos equipamentos disponíveis para serem utilizados no sistema, (transformadores, cabos, estruturas, postes) e as demandas previstas em cada ponto de consumo.

ii. Definir a quantidade de transformadores que podem ser alocados em função da demanda do sistema, considerando-se que a princípio serão instalados os transformadores com a menor potência nominal disponível. Identificar, os locais mais adequados para a instalação dos *NT* transformadores, através das seguintes condições: *ii-a)* Para cada poste candidato à alocação de transformadores, definir um raio mínimo de proximidade geométrica baseado na quantidade de transformadores e nas unidades consumidoras, para a alocação dos *NT* transformadores. *ii-b)* alocar os *NT* transformadores sequencialmente nos pontos de maior consumo respeitando o critério de distância geométrica entre estes, definido no item *ii-a)*. Para cada um dos $k = 1, \dots, NT$ transformadores faça os procedimentos de *iii* até *vi*;

iii. Selecionar a unidade consumidora mais próxima do transformador k que não tenha sido alimentada ou selecionada anteriormente e adicioná-la ao circuito k (referente ao k -ésimo transformador). Verificar a radialidade do circuito. Se o circuito k com esta nova carga apresentar malha, retirar o último nó conectado no circuito e retornar ao início deste passo. Caso contrário ir ao passo *iv*.

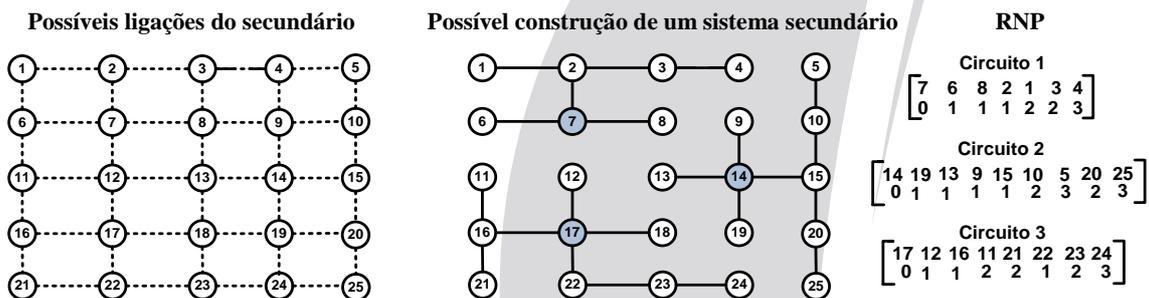
iv. Verificar se o circuito k apresenta factibilidade com relação à potência nominal do transformador (considera-se um acréscimo de 15% no carregamento do circuito que são associados às perdas elétricas). Se a solução é factível, retornar ao passo *iii*, caso contrário, retirar o último nó conectado no circuito e finalizar a construção deste trecho do circuito k e ir ao passo *v*.

v. Se ainda existem nós possíveis de serem conectados no circuito k de um dos trechos não selecionado anteriormente, volte ao passo *iii*, caso contrário, ir ao passo *vi*.

vi. Se todos os circuitos foram construídos, finalizou-se a construção do sistema secundário inicial, caso contrário, passar para a construção do circuito referente ao próximo transformador, $k = k + 1$, e voltar ao passo *iii*.

A topologia dos circuitos secundários é codificada através da representação nó profundidade (RNP), (Delbem, 2004). Na figura 1 apresenta-se um sistema com 25 barras codificado através desta representação. À esquerda têm-se as possíveis linhas que podem ser construídas entre os pontos de consumo e direita uma possível topologia do sistema secundário, considerando que os transformadores estão alocados nas barras 7, 14 e 17, em destaque. A codificação da RNP é baseada na distância do nó raiz (nó com transformadores) aos outros nós do sistema.

Figura 1: Codificação utilizada para o sistema secundário – RNP



Após a obtenção do sistema secundário, constrói-se o circuito primário, que consiste na expansão das linhas de média tensão até os transformadores abaixadores, como o objetivo de interligar os sistemas primário e secundário. Este procedimento é realizado através de um algoritmo heurístico construtivo, na qual busca-se sempre construir o circuito primário com o menor custo possível. O próximo passo do algoritmo consiste na especificação dos tipos de condutores primários e secundários através das seguintes equações (8) (9) e (10).

$$|f_{ijabcn}^u| \leq f_r \cdot \bar{f}_{ijabcn}^u \quad (8)$$

$$|f_{ijabcn}^u| > \bar{f}_{ijabcn}^u \quad (9)$$

$$|f_{ijabcn}^{cf}| \geq f_a \cdot |f_{ijabcn}^u| \quad (10)$$

em que: f_{ijabcn}^u é o fluxo de corrente no ramo ij nas fases abc e neutro; f_r é um fator de redução; \bar{f}_{ijabc}^u é o fluxo máximo permitido no condutor do ramo ij nas fases abc e neutro; $\left| f_{ijabcn}^{Cf} \right|$ é o fluxo de corrente máximo permitido pela bitola do condutor candidato; f_a é um fator de acréscimo. A equação (8) indica que se o fluxo no ramo ij estiver abaixo do máximo fluxo permitido para o condutor multiplicado por um fator de redução, troca-se este condutor por outro de bitola de menor valor. A equação (9) indica que se o fluxo no ramo ij estiver acima do fluxo máximo permitido, troca-se o condutor por outro de bitola de maior valor. A equação (10) indica que se ocorrer mudança de condutor, verifica-se se o máximo fluxo do condutor a ser alocado é superior ao fluxo desse ramo multiplicado por um fator de acréscimo.

A especificação dos condutores também é baseada no critério de queda de tensão. Sempre que houver queda de tensão, abaixo do mínimo exigido pelas normas reguladoras, trocam-se os condutores por outros de bitolas de maior valor, até que se obtenha, caso possível, níveis de tensão dentro dos padrões especificados. Esta troca inicia-se nas linhas mais próximas dos transformadores, em direção ao ponto de consumo com níveis de tensão crítica. Após a especificação dos condutores primários e secundários, são definidos os esforços mecânicos que os postes devem suportar, para assim, determinar os tipos de estruturas primárias e secundárias que devem ser utilizadas em cada poste.

Os cálculos dos esforços mecânicos são utilizados para determinar o dimensionamento dos postes que são utilizados na fase de projeto do sistema. Os cálculos mecânicos são efetuados a partir da determinação dos tipos de condutores encontrados para cada topologia. Os cálculos mecânicos que definem os tipos de postes utilizados em sistemas secundários são dados pelas seguintes equações:

$$E_i^u = 0,10 \cdot L_i^u + 0,60; \quad H_{i_{useful}}^u = L_i^u - E_i^u - 0,20; \quad F_{R_i}^u = F_{P_i}^u + \left(\frac{F_{S_i}^u \cdot H_{S_i}^u}{H_{i_{useful}}^u} \right); \quad (11)$$

$$F_{X_k}^u = F_{R_i}^u \cdot \cos(\theta_i) + \dots + F_{R_m}^u \cdot \cos(\theta_m) \quad (12)$$

$$F_{Y_k}^u = F_{R_i}^u \cdot \sin(\theta_i) + \dots + F_{R_m}^u \cdot \sin(\theta_m) \quad (13)$$

$$F_k^u = \sqrt{(F_{X_k}^u)^2 + (F_{Y_k}^u)^2} \quad (14)$$

em que: E_i^u é a altura nominal do poste i do circuito u ; L_i^u é o engastamento do poste i do circuito u ; $H_{i_{useful}}^u$ é a altura útil do poste i do circuito u ; $F_{R_i}^u$ é a força resultante parcial devido ao esforço mecânico na barra i do circuito u ; $F_{P_i}^u$ é a força de tração dos cabos da rede primária da barra i do circuito u ; $F_{S_i}^u$ é a força de tração dos cabos secundários na barra i do circuito u ; $H_{S_i}^u$ é a altura média da instalação do circuito u da rede secundária; $F_{X_k}^u$ é o esforço mecânico resultante no poste k do circuito u na direção X ; $F_{Y_k}^u$ é o esforço mecânico resultante no poste k do circuito u na direção Y ; F_k^u é o esforço mecânico resultante no poste k do circuito u .

As estruturas primárias e secundárias são definidas a partir dos critérios da norma CPFL-GED 11847 e GED 3597. Para definição destas estruturas, são levados em consideração os dados geométricos e topológicos do sistema, derivação de rede, ramais de fim de linha, entre outros critérios.

3. 2 Estruturas de Vizinhança

Após a construção da rede inicial, são realizadas modificações nesta solução, através das estruturas de vizinhança pertencentes aos conjuntos N_k (conjunto de estruturas do nível superior) e N_s (conjunto de estruturas do nível inferior, ou de busca local). Estas estruturas têm como objetivo explorar o espaço de busca e gerar soluções de qualidade para o problema de planejamento e projeto de sistemas secundários.

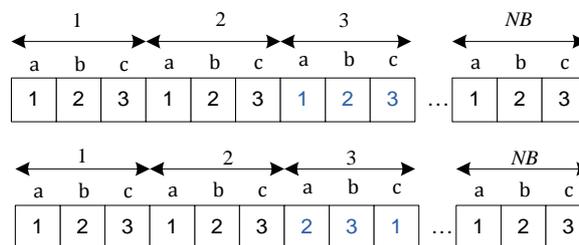
O conjunto N_k é utilizado como método de diversificação de soluções, com o objetivo

de escapar de ótimos locais, enquanto o conjunto N_s é utilizado em um algoritmo do tipo VND, responsável por realizar buscas locais na vizinhança de uma determinada solução. Os conjuntos N_k e N_s possuem quatro estruturas de vizinhanças cada, sendo que as estruturas do conjunto N_k são mais diversas que as estruturas do conjunto N_s . As estruturas de vizinhança estão definidas nas seções seguintes.

3.2.1 Balanceamento de cargas entre fases

As cargas nas fases a , b e c nos nós do sistema, são codificadas através dos números 1, 2 e 3, que representam as cargas ligadas nas fases a , b e c , respectivamente. A troca da sequência destes números em uma determinada barra de $(1, 2, 3, \dots, NB)$, em que NB é o número de barras do sistema, como ilustrado na figura 2, determina a geração de outra solução, alterando a conexão das cargas entre as fases da rede.

Figura 2: Estrutura de vizinhança - balanceamento de cargas entre fases

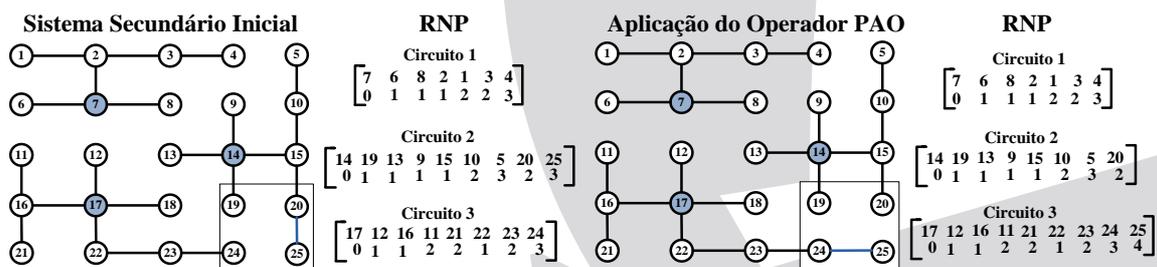


A estrutura de vizinhança que realiza a alteração de cargas entre fases é utilizada tanto no conjunto de vizinhos N_k , quanto no conjunto N_s . A diferença entre estas vizinhanças está na quantidade de cargas que pode ser trocadas entre as fases. Para o conjunto N_k utiliza-se uma quantidade superior de trocas de cargas entre fases em relação à estrutura do conjunto N_s , de modo que se obtenha diversificação nas soluções geradas e assim o algoritmo possa fugir de ótimos locais.

3.2.2 Roteamento dos circuitos

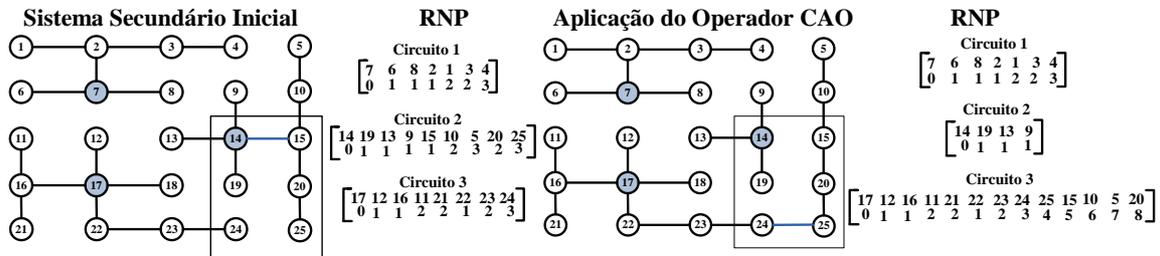
A topologia do circuito secundário é codificada através da RNP. Através desta codificação, utilizam-se dois operadores para realizar a troca de uma linha construída por outra não construída. O operador PAO (*Preserve Ancestor Operator*) é utilizado na estrutura de vizinhança do conjunto N_s e o operador CAO (*Change Ancestor Operator*) na estrutura de vizinhança do conjunto N_k . Estes operadores permitem gerar somente topologias radiais, do ponto de vista dos sistemas elétricos, baseados em teoria de grafos (Delbem, 2004). O operador PAO realiza uma troca simples, ou seja, a troca de linhas se realiza com a linha adjacente, como ilustrada na figura 3 (troca entre os nós 24-25 e 25-20).

Figura 3: Estrutura de vizinhança – Aplicação do Operador PAO



O operador CAO realiza uma alteração mais complexa na topologia, isto é, permite que a troca de linhas se realize entre qualquer ramo que seja caminho entre os dois transformadores dos circuitos escolhidos, mas sempre mantém a radialidade do sistema, como ilustrado na figura 4 (troca entre os ramos 24-25 e 14-15).

Figura 4: Estrutura de vizinhança - Aplicação do operador CAO



3.2.3 Momento Elétrico

No momento elétrico procura-se determinar o melhor posicionamento dos transformadores através da seguinte equação:

$$M_{eder}^u : \sum_{i=1}^n D_i^u \cdot x_i^u \quad (15)$$

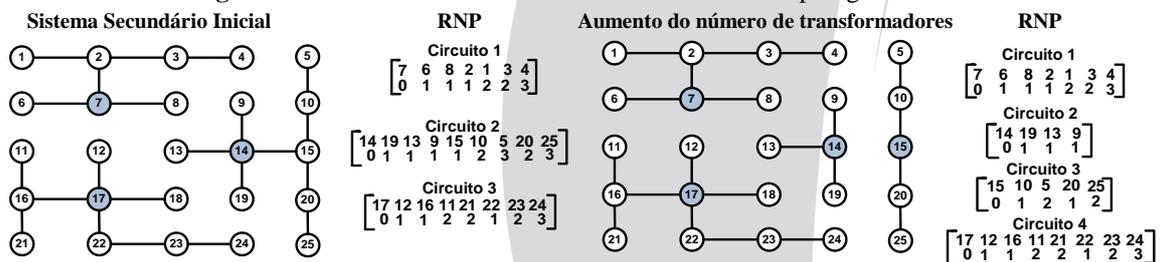
em que M_{eder}^u é o momento elétrico calculado em relação a todas as derivações do transformador do circuito u , D_i^u é a demanda instalada na barra i do circuito u e x_i^u é a distância da barra i à barra do transformador do circuito u .

Nesta estrutura de vizinhança, o transformador é transferido para uma barra adjacente na direção do circuito que obteve o maior momento elétrico para a estrutura do conjunto N_s e duas barras adjacentes ou mais para a estrutura de vizinhança do conjunto N_k .

3.2.4 Aumento e redução do número de transformadores

Nesta estrutura verifica-se a possibilidade de aumentar ou reduzir o número de transformadores. Para aumentar o número de transformadores, realiza-se a divisão de um circuito em dois circuitos. Busca-se sempre a divisão daquele circuito que possui os níveis de tensão mais críticos. Na figura 5 ilustra-se a divisão do circuito 2 com a ampliação de um circuito, através da alocação de um novo transformador no sistema (transformador 15):

Figura 5: Aumento do número de transformadores da topologia corrente

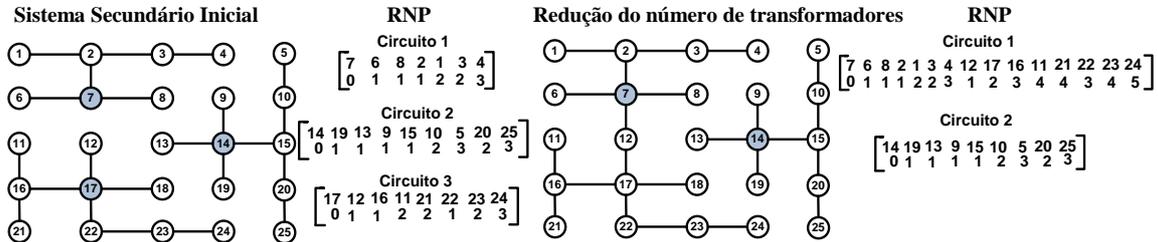


A diferença da estrutura de vizinhança do conjunto N_k para a estrutura N_s é o aumento da quantidade de transformadores. Para a estrutura do conjunto N_s sempre é aumentado um transformador, sendo que na estrutura do conjunto N_k pode ser aumentado um ou mais transformadores.

Na redução do número de transformadores realiza-se a junção de dois circuitos em um só circuito. Verifica-se sempre se há a possibilidade da junção de dois circuitos que possuam os melhores níveis de tensão. Na figura 6 ilustra-se um exemplo da redução do número de

transformadores, e consequentemente de circuitos secundários, de uma topologia corrente (o circuito 3 é adicionado ao circuito 1).

Figura 6: Redução do número de transformadores da topologia corrente

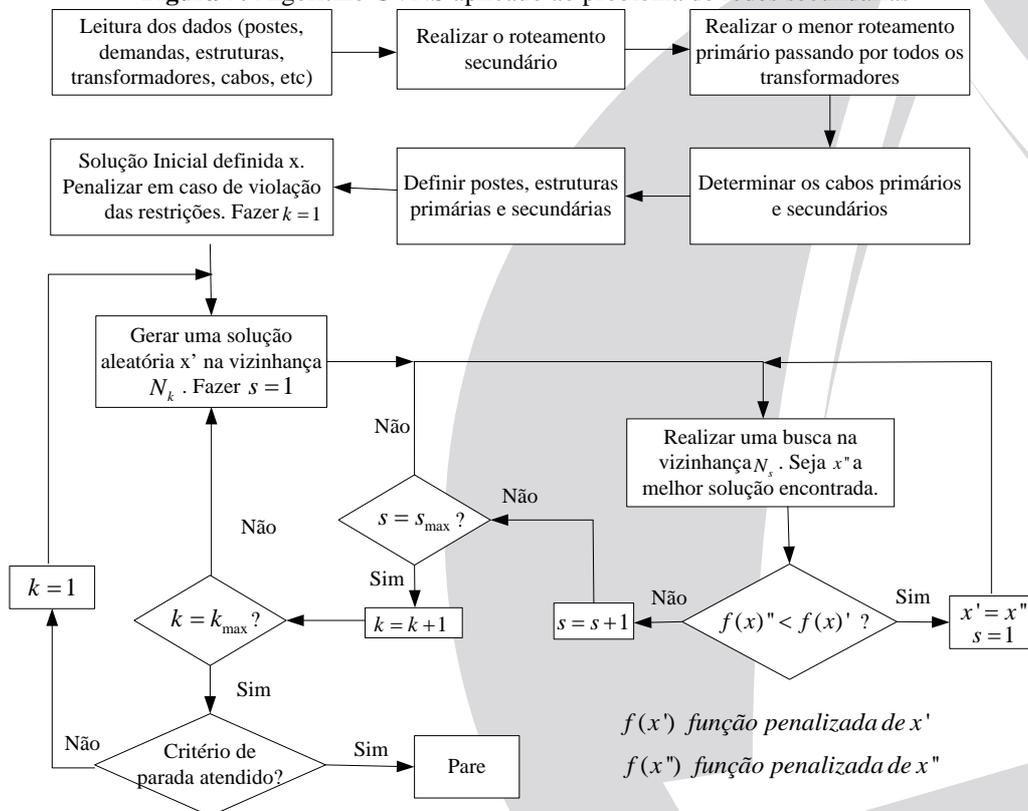


A diferença desta estrutura do conjunto N_k para o conjunto N_s é a quantidade do número de transformadores que pode ser reduzida. Na estrutura do conjunto N_s , reduz-se sempre um transformador, enquanto na estrutura N_k pode ser reduzido um ou mais transformadores.

3.3 Algoritmo GVNS aplicado ao problema de planejamento de sistemas secundárias

O algoritmo GVNS dedicado ao problema de planejamento e projeto de sistemas secundários de distribuição de energia elétrica é apresentado no diagrama de blocos da figura 7. É importante destacar, que no processo do algoritmo, busca-se sempre penalizar a função objetivo, caso uma determinada solução seja ineficaz, isto é, não atenda as restrições físicas, operacionais e econômicas do modelo.

Figura 7: Algoritmo GVNS aplicado ao problema de redes secundárias



4. Resultados

O algoritmo proposto é implementado na linguagem de programação C++, utilizando um micro computador Core i7, 4GB de memória RAM e 2,80 GHz. São realizados testes em um sistema de 76 barras, ilustrado na figura 8-a. Este sistema possui 167 unidades com consumo médio de 292 kWh/mês. As demandas previstas são consideradas utilizando a norma CPFL - GED 3735. É utilizado um limite de tensão de 0,965 pu, $C_{kwh} = US\$ 0,10$ e um período de $T = 8760$ horas. Os dados elétricos, financeiros e físicos dos equipamentos utilizados, tais como cabos primários e secundários, transformadores e estruturas são apresentados nas tabelas de 1-6:

Tabela 1: Tipos de transformadores

T	Potência (kVA)	Custo (US\$)
1	30	1251,40
2	45	1488,32
3	75	2166,68
4	112,5	2911,21

Tabela 2: Tipos de cabos secundários

T	R (oh/m)	X (oh/m)	I_{max} (A)	Ef. (daN)	Custo (US\$/m)
1	0,00101	0,0001138	129	135	1,99
2	0,000744	0,0001092	168	160	3,53
3	0,000568	0,0000945	227	240	4,60
4	0,000294	0,0000942	311	366	6,64

Tabela 3: Tipos de postes

T	Ef. (daN)	C. (m)	Custo (US\$)
1	200	9	118,69
2	400	9	176,64
3	600	9	207,94
4	1000	9	278,04
5	200	11	171,03
6	400	11	251,34
7	600	11	296,29
8	100	11	457,94
9	400	12	267,29
10	600	12	332,71
11	1000	12	469,21

Tabela 4: Estruturas secundárias

T	Des.	Custo (US\$)
1	IT	19,51
2	IA	20,46
3	IF	41,44
4	ID	37,12
5	IDO	43,29
6	ITA	17,55
7	ITF	49,74

Tabela 5: Estruturas primárias

T	Des.	Custo (US\$)
1	CE1	44,51
2	CE1A	53,15
3	CE2	146,87
4	CE3	338,93
5	CE4	321,43

Tabela 6: Tipos de cabos primários

T	R (oh/m)	X (oh/m)	I_{max} (A)	Ef. (daN)	Custo (US\$)
1	0,744	0,109	266	386	6,78
2	0,568	0,000095	510	652	18,15

Legendas: T (Tipo) C. (Comprimento), Ef. (Esforço), Des.(Descrição).

Os resultados da melhor solução encontrada pelo algoritmo são apresentados na tabela 7 e na figura 8-b. São apresentados o custo total da topologia, juntamente com os custos dos equipamentos utilizados para compor a fase de projeto do sistema e os custos anuais relativo às perdas elétricas.

Tabela 7: Custos da melhor topologia encontrada.

Custo Total (US\$) - Função Objetivo	45.448,42	Custo cabos secundários (US\$)	5.560,26
Custo dos transformadores (US\$)	10.155,78	Custo estruturas primárias (US\$)	3.430,88
Custo dos cabos primários (US\$)	8.267,53	Custo estruturas secundárias (US\$)	1.902,09
Custo das perdas (US\$)	2.001,90	Custo dos postes (US\$)	14.129,98

Figura 8: Loteamento inicial (a) e melhor topologia encontrada pelo algoritmo (b).



Os tipos de cabos primários e secundários para a melhor solução encontrada pelo algoritmo são apresentados na tabela 8 e os tipos de postes, estruturas primárias e secundárias são apresentados na tabela 9:

Tabela 8: Tipos de cabos primários e secundários

<i>I</i>	<i>F</i>	<i>CS</i>	<i>CP</i>																
61	62	4	-	75	74	1	-	54	53	1	-	25	24	1	1	5	4	1	1
62	63	4	-	74	73	1	-	53	52	3	-	24	23	1	1	4	3	1	1
63	70	1	-	37	41	2	-	52	51	1	-	23	22	1	1	3	2	1	1
70	71	1	-	41	42	1	-	51	50	1	-	22	21	1	1	2	1	1	1
62	64	1	-	42	43	2	-	50	49	1	-	21	15	1	1	14	16	1	-
64	65	1	-	43	44	1	-	49	48	1	-	15	14	1	1	16	17	1	-
65	66	1	-	44	45	1	-	48	47	1	-	14	13	1	1	17	18	1	-
66	67	1	-	45	46	1	-	55	56	1	1	13	12	1	1	18	19	1	-
61	60	1	1	37	36	1	1	56	40	1	1	12	11	1	1	19	20	1	-
60	59	1	1	36	35	1	1	27	28	2	1	11	10	1	1	25	26	1	-
59	58	1	1	35	34	1	1	28	29	1	1	10	9	1	1	26	68	1	-
37	38	3	1	34	33	1	1	29	31	1	1	9	8	1	1	26	69	1	-
38	39	3	-	33	32	1	1	29	30	1	-	8	7	1	1	31	32	-	1
39	76	1	-	55	57	3	1	30	72	1	-	7	6	1	1	38	40	-	1
76	75	3	-	55	54	3	-	27	25	1	1	6	5	1	1	57	58	-	1

Legendas: *I* = barra inicial, *F* = barra final, *CS* = tipo de condutor secundário, *CP* = tipo de condutor primário.

Tabela 9: Tipos de postes, estruturas primárias e secundárias.

<i>B</i>	<i>ES</i>	<i>EP</i>	<i>P</i>																
1	3	4	6	17	1	-	1	33	1	1	6	49	1	-	1	65	1	-	1
2	1	2	6	18	1	-	1	34	1	1	6	50	1	-	1	66	1	-	1
3	1	2	6	19	1	-	1	35	1	1	6	51	1	-	1	67	3	-	1
4	1	2	6	20	3	-	1	36	1	1	6	52	1	-	1	68	3	-	1
5	1	2	6	21	2	5	6	37	4	5	9	53	1	-	1	69	3	-	1
6	1	2	6	22	2	5	6	38	2	1	5	54	1	-	1	70	3	-	1
7	1	2	6	23	1	1	6	39	1	-	1	55	4	5	9	71	3	-	1
8	1	2	6	24	1	1	6	40	3	1	6	56	1	-	6	72	1	-	1
9	1	1	6	25	4	1	6	41	1	-	1	57	3	1	6	73	3	-	1
10	1	1	6	26	4	-	1	42	1	-	1	58	3	1	6	74	1	-	1
11	1	1	6	27	1	1	9	43	1	-	1	59	1	1	6	75	1	-	1
12	1	1	6	28	1	1	6	44	1	-	1	60	1	1	6	76	1	-	1
13	1	1	6	29	2	1	5	45	1	-	1	61	1	1	9				
14	4	5	6	30	2	-	5	46	3	-	1	62	4	-	1				
15	1	1	6	31	3	1	6	47	3	-	1	63	2	-	1				
16	1	-	1	32	1	1	6	48	2	-	1	64	1	-	1				

Legendas: *B* = barra, *ES* tipo de estrutura secundária, *EP* = tipo de estrutura primária, *P* = tipo de poste.

5. Conclusões

Neste artigo se propõe uma metodologia baseada em técnicas heurísticas construtivas e um algoritmo de busca em vizinhança variável, do tipo GVNS, para o planejamento e projeto de sistemas secundários de distribuição de energia elétrica. São minimizados os custos associados aos investimentos necessários para a elaboração do projeto de redes secundárias, juntamente com os custos operacionais do sistema. Como restrições, são considerados os limites máximos e mínimos de magnitude de tensão e corrente, radialidade do sistema, atendimento as demandas e potência nominal dos transformadores.

O problema sob análise permite definir fisicamente várias estruturas de vizinhanças, o que levou à decisão de escolher para sua solução a meta-heurística GVNS. Analisando o desempenho desta meta-heurística, constata-se que esta encontrou soluções de excelente qualidade para um sistema de 76 barras. Desta forma verifica-se a potencialidade do método diante da aplicação proposta.

6. Agradecimentos

Agradecimentos a CAPES (bolsa de doutorado), CNPq (305371/2012-6) e Fapesp (No. 2013/23590-8) pelos auxílios financeiros concedidos.

Referências

- Ciric, R.; Padilha, A.; Ochoa, L.F.;** *Power Flow in Four-Wire Distribution Networks - General Approach. IEEE Transactions on Power Systems*, EUA, V. 18, n.4, p. 1263-1290, 2003.
- Cossi, A. M.; Romero, R., Mantovani, J. R. S.;** *Planning and Projects of Secondary Electric Power Distribution Systems*, IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 24, No. 3, August, 2009.
- Cossi, A. M.; Romero, R., Mantovani, J. R. S.;** *Planning of Secondary Distribution Circuits Through Evolutionary Algorithms*, IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 20, No. 1, January, 2005.
- Costa, A. M.;** *Otimização do Planejamento de redes secundárias de distribuição de energia elétrica*, Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.
- CPFL – Companhia Paulista de Força e Luz, GED-3735;** *Projeto - Loteamentos e Núcleos Habitacionais*, 2013.
- CPFL – Companhia Paulista de Força e Luz, GED-11847;** *Rede Primária Compacta 15kV e 25kV – Estruturas Básicas - Montagem*, 2013.
- CPFL – Companhia Paulista de Força e Luz, GED-3597;** *Rede Secundária com Cabos Multiplexados - Montagem*, 2013.
- CPFL – Companhia Paulista de Força e Luz, GED-3648;** *Projeto de Rede de Distribuição-Cálculo Mecânico*, 2013.
- CPFL – Companhia Paulista de Força e Luz, GED-3648;** *Projeto de Rede de Distribuição-Cálculo Elétrico*, 2013.
- Delbem, A. C. B., Carvalho, A. de; Policastro, C. A; Pinto, A. K. O.; Honda, K.; Garcia A. C.;** *Node-depth encoding for evolutionary algorithms applied to network design*. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 2004. p. 678-687.
- Garcia, V. J.; França, P. M.; Gonzalez, J. F. V.; Yoshimoto, E.; Lyra Filho, C.; Cavelluci, C.;** *GRASP para o problema de planejamento de redes secundárias de distribuição de energia elétrica*. In: Simpósio brasileiro de pesquisa Operacional, 35, 2003, Natal. **Anais...**, Natal: SBPO, 2003. p.1427-1437.
- Mladenovic, N.; Hansen, P.;** *Handbook of Metaheuristics*, Chapter 8- Variable Neighborhood Search. 1997.
- Silva, M. C., França, P. M.; Silveira, P. D. B.;** *Long-Range Planning of Power Distribution Systems: Secondary Networks*, Computers Ekr. Engng Vol. 22, No. 3, pp. 179-191, 1996.
- Souza, A. A. A.; Jr. F. N.;** *Otimização de projetos de rede secundária de distribuição*. In: *Simpósio brasileiro de Pesquisa Operacional*, 33, Campos do Jordão, p. 1203-1212, 2001.
- Souza, C. H.;** *Planejamento e projeto de circuitos secundários de distribuição de energia elétrica por meio de algoritmo de busca tabu*, Universidade Estadual paulista Júlio de Mesquita Filho – Dissertação de Mestrado, 2003.