

METAHEURÍSTICA VNS PARA O PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Renan Felix Fernandes Souza
e-mail: rffsouza@aluno.feis.unesp.br

Marina Lavorato
e-mail: marina@dee.feis.unesp.br

Marcos J. Rider
e-mail: mjrider@dee.feis.unesp.br

Rubén Romero
e-mail: ruben@dee.feis.unesp.br

Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Universidade Estadual Paulista
Departamento de Engenharia Elétrica - Campus III – Caixa Postal 31.
15.385-000 ILHA SOLTEIRA, SP, BRASIL.

RESUMO

O problema de Planejamento da expansão de Sistemas de Distribuição (PSD) de energia elétrica apresentado neste trabalho tem como objetivo a construção de circuitos e subestações de forma otimizada avaliando os custos de construção de circuitos e/ou subestações e de operação do sistema em um horizonte de planejamento pré-estabelecido. Para resolver este problema, uma metaheurística de Busca em Vizinhança Variável (VNS) foi desenvolvida. Em sua fase inicial foi implementado um Algoritmo Heurístico Construtivo (AHC) para fornecer um ponto inicial de boa qualidade para a metaheurística. A vantagem do algoritmo VNS é sua fácil implementação e adaptação ao problema de PSD além da possibilidade de avaliar diferentes estruturas de vizinhança garantindo adequada exploração do espaço de busca. O algoritmo VNS e o AHC foram escritos na linguagem de modelagem matemática AMPL onde a cada iteração é resolvido um problema de programação não linear utilizando o *solver* comercial KNITRO.

PALAVRA-CHAVE. Metaheurísticas; VNS; Planejamento; Sistemas de Distribuição.

Área de classificação principal (Metaheurísticas).

ABSTRACT

Distribution System expansion Planning (DSP) problem presented in this paper aims to build circuits and substations optimally evaluating the costs of building circuits and/or substations and operating system on a horizon planning pre-established. To resolve this problem, a metaheuristic Variable Neighborhood Search (VNS) has been developed. In its initial phase was implemented a Constructive Heuristic Algorithm (CHA) to provide a good starting point for the metaheuristic. The advantage of the VNS algorithm is its easy implementation and adaptation to the DSP problem and the opportunity to assess different neighborhood structures ensuring adequate exploitation of the search space. The AHC and VNS algorithm were written in mathematical modeling language AMPL where each iteration is solved by a nonlinear programming problem using the commercial solver KNITRO.

KEYWORDS. Metaheuristics; VNS; Planning; Distribution Systems.

Main area (Metaheuristics).

1. Introdução

Aliado ao crescimento econômico e industrial vem o aumento no consumo de energia elétrica. Neste cenário, as empresas distribuidoras de energia necessitam planejar a expansão dos seus sistemas de tal forma a garantir o fornecimento de energia elétrica com altos índices de qualidade e confiabilidade, visto que o sistema de distribuição é a ligação entre o consumidor final e o sistema elétrico (Cossi, 2008).

O problema de Planejamento da expansão do Sistema de Distribuição de energia elétrica (PSD) consiste em avaliar a melhor topologia do sistema a ser construído levando em consideração os mínimos custos de investimento e operação deste sistema para um horizonte de curto (5 anos) ou longo prazo (5 a 20 anos) (Ramirez-Rosado e Dominguez-Navarro, 2006), sujeitos a restrições de balanço de potência ativa e reativa, limite de capacidade das subestações, não interligação entre duas subestações, limites de tensão nas barras, limites de fluxos nos ramos do sistema e não construção de circuitos em paralelo (Lavorato, 2010). O problema de PSD pode ser resolvido utilizando diferentes metodologias como os Algoritmos Heurísticos Construtivos em Ponnavaikko e Rao (1987), Bhowmik et al. (2000) e Lavorato et al. (2010); *Branch-Exchange* em Aoki et al. (1990), Nara et al. (1994), Goswami (1997) e Miguez et al. (2002); *Branch-and-Bound* em Paiva et al. (2005) e Oliveira (2010); e metaheurísticas como Colônia de Formigas em Gómez (2004), Algoritmo Genético em Najafi et al. (2009) e Bernal-Agustín (1998), *Simulated Annealing* em Nahman e Peric (2008) e Busca Tabu em Augugliaro et al. (2002).

Neste trabalho, o problema de PSD é modelado como um problema de programação não-linear inteiro misto (PNLIM). Para resolver o problema de planejamento foi implementado um algoritmo de Busca em Vizinhança Variável (VNS – *Variable Neighborhood Search*) (Mladenovic e Hansen, 1997) e para encontrar uma solução inicial para o algoritmo VNS foi implementado um Algoritmo Heurístico Construtivo (AHC) com o objetivo de que a solução inicial seja de boa qualidade.

O AHC apresentado neste trabalho constrói um sistema de distribuição passo a passo utilizando índices de sensibilidade para escolher a subestação que será construída ou repotenciada e/ou o circuito que será construído. A solução encontrada pelo AHC será a solução incumbente inicial do VNS, onde são realizadas buscas locais em diferentes estruturas de vizinhança a partir da solução incumbente inicial, de tal forma que esta seja atualizada cada vez que uma solução de melhor qualidade é encontrada. Foram feitos dois testes: o primeiro com um sistema de 23 barras e o segundo com um sistema de 54 barras e quatro subestações. A vantagem da metodologia é ter um algoritmo VNS que sempre encontra uma solução factível e que proporciona uma exploração do espaço de busca cada vez mais distante da solução inicial, de tal forma que seja encontrada uma solução de boa qualidade quando comparado aos resultados encontrados na literatura.

2. Simbologia

A seguir será apresentada uma lista com a simbologia utilizada neste trabalho:

Conjuntos:

- Ω_{b_s} - Conjunto de barras com subestações (existentes e propostas, $\Omega_{b_s} \subset \Omega_b$);
- Ω_{b_i} - Conjunto de barras conectadas às barras i ($\Omega_{b_i} \subset \Omega_b$);
- Ω_f - Conjunto de direções de fluxo de potência aparente ($\Omega_f = \{i j / i \in \Omega_b, j \in \Omega_{b_i}\}$);
- Ω_b - Conjunto de barras do sistema;
- Ω_l - Conjunto de ramos (existentes e propostos);
- Ω_a - Conjunto de tipos de circuitos;

Constantes:

- τ_s - Taxa de juros para a energia fornecida pela subestação;
- τ_l - Taxa de juros para as perdas de potência ativa;
- κ_s - Taxa de recuperação de capital da construção ou recapacitação de subestações;
- κ_l - Taxa de recuperação de capital da construção ou recondutoramento de circuitos;
- α - Número de horas por ano;
- $g_{ij,a}$ - Condutância do circuito $i j$ do tipo a ;

l_{ij}	- Comprimento do circuito do ramo $i j$;
n_{ija}^0	- Circuito do tipo a existente no ramo $i j$;
c_{fi}	- Custo de construção de subestação na barra i ;
$c_{ij,a}$	- Custo de construção do circuito $i j$ do tipo a ;
c_{vi}	- Custo de operação da subestação da barra i ;
c_l	- Custo de unidade de energia;
ΔV_{min}	- Desvio mínimo de tensão;
ΔV_{max}	- Desvio máximo de tensão;
ϕ_s	- Fator de perdas das subestações;
ϕ_l	- Fator de perdas dos circuitos;
P_{Di}	- Potência ativa demandada pela barra i ;
Q_{Di}	- Potência reativa demandada pela barra i ;
$\bar{S}_{ija}$	- Limite máximo de fluxo de potência aparente no ramo $i j$ do tipo a ;
$\bar{S}_i^0$	- Limite máximo de potência aparente em uma subestação existente na barra i ;
$\bar{S}_i$	- Limite máximo de potência aparente para a construção ou recapacitação de uma subestação na barra i ;
$b_{ij,a}$	- Susceptância do circuito $i j$ do tipo a ;
n_b	- Número de barras ($n_b = \Omega_b $);
n_{bs}	- Número de barras com subestações ($n_{bs} = \Omega_{bs} $);
Funções:	
G_{ij}	- Elemento da matriz de condutância nodal;
B_{ij}	- Elemento da matriz de susceptância nodal;
P_i	- Potência ativa calculada na barra i ;
Q_i	- Potência reativa calculada na barra i ;
$P_{ij,a}$	- Fluxo de potência ativa do tipo a que sai da barra i em direção à barra j ;
$Q_{ij,a}$	- Fluxo de potência reativa do tipo a que sai da barra i em direção à barra j ;
$S_{ij,a}$	- Fluxo de potência aparente do tipo a que sai da barra i em direção à barra j
	$(S_{ij,a} = \sqrt{P_{ij,a}^2 + Q_{ij,a}^2});$
Variáveis:	
n_{ija}	- Indica se o circuito do tipo a pode se adicionado ou não ao ramo $i j$;
m_i	- Indica se uma subestação pode ser adicionada ou não na barra i ;
V_i	- Magnitude de tensão da barra i ;
θ_{ij}	- Diferença angular entre as barras i e j ;
P_{Si}	- Potência ativa fornecida pela subestação da barra i ;
Q_{Si}	- Potência reativa fornecida pela subestação da barra i ;
n_{ija}^+	- Circuito do tipo a adicionado ao ramo $i j$ durante o processo iterativo do AHC;
m_i^+	- Subestação adicionada à barra i durante o processo iterativo do AHC;

3. Modelo Matemático

Neste trabalho, o problema de planejamento de sistemas de distribuição de energia é modelado da seguinte maneira (Lavorato et al., 2010):

$$\begin{aligned}
 \min f = & \kappa_l \sum_{ij \in \Omega_l} \sum_{a \in \Omega_a} (c_{ij,a} n_{ij,a} l_{ij}) + \kappa_s \sum_{i \in \Omega_{bs}} (c_{fi} m_i) \\
 & + \alpha \tau_l \phi_l c_l \sum_{ij \in \Omega_l} \sum_{a \in \Omega_a} (g_{ij,a} (n_{ija}^0 + n_{ij,a}) (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij})) \\
 & + \alpha \tau_s \phi_s \sum_{i \in \Omega_{bs}} (c_{vi} (P_{Si}^2 + Q_{Si}^2))
 \end{aligned} \quad (1)$$

s. a.

$$P_i - P_{S_i} + P_{D_i} = 0 \quad \forall i \in \Omega_b \quad (2)$$

$$Q_i - Q_{S_i} + Q_{D_i} = 0 \quad \forall u \in \Omega_u, i \in \Omega_b \quad (3)$$

$$1 - \frac{\Delta V_{min}}{100} \leq V_i \leq 1 + \frac{\Delta V_{max}}{100} \quad \forall i \in \Omega_b \quad (4)$$

$$P_{S_i}^2 + Q_{S_i}^2 \leq (\bar{S}_i^0 + m_i \bar{S}_i)^2 \quad \forall i \in \Omega_{b_s} \quad (5)$$

$$P_{ij,a}^2 + Q_{ij,a}^2 \leq ((n_{ij,a}^0 + n_{ij,a}) \bar{S}_{ij,a})^2 \quad \forall ij \in \Omega_f, \forall a \in \Omega_a \quad (6)$$

$$\sum_{a \in \Omega_a} (n_{ij,a}^0 + n_{ij,a}) \leq 1 \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (7)$$

$$n_{ij,a} \in [0,1] \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall a \in \Omega_a \quad (8)$$

$$m_i \in [0,1] \quad \forall i \in \Omega_b \quad (9)$$

$$\sum_{ij \in \Omega_l} \sum_{a \in \Omega_a} (n_{ij,a}^0 + n_{ij,a}) = n_b - n_{b_s} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (10)$$

A equação (1) é a função objetivo do problema que representa o custo total de construção de novos circuitos, construção e repotenciação de subestações, custo de perdas ativas no sistema e custo de operação de subestações. As equações (2) e (3) representam o balanço de potência ativa e reativa. As potências ativas e reativas líquidas nas barras são dadas pelas equações (11) e (12):

$$P_i = V_i \sum_{j \in \Omega_b} V_j [G_{ij} (n_{ij,a}^0 + n_{ij,a}) \cos \theta_{ij} + B_{ij} (n_{ij,a}^0 + n_{ij,a}) \sin \theta_{ij}] \quad (11)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j \in \Omega_b} V_j [G_{ij} (n_{ij,a}^0 + n_{ij,a}) \sin \theta_{ij} - B_{ij} (n_{ij,a}^0 + n_{ij,a}) \cos \theta_{ij}] \quad (12)$$

A equação (4) representa os limites de tensão que deverão ser respeitados em cada barra; a equação (5) representa a capacidade máxima de cada subestação. A equação (6) representa os limites de fluxo de potência nos ramos, sendo:

$$P_{ij,a} = (n_{ij,a}^0 + n_{ij,a}) [V_i^2 g_{ij,a} - V_i V_j (g_{ij,a} \cos \theta_{ij} + b_{ij,a} \sin \theta_{ij})] \quad (13)$$

$$Q_{ij,a} = (n_{ij,a}^0 + n_{ij,a}) [-V_i^2 b_{ij,a} - V_i V_j (g_{ij,a} \sin \theta_{ij} - b_{ij,a} \cos \theta_{ij})] \quad (14)$$

A equação (7) garante que apenas um circuito deverá ser construído entre duas barras, ou seja, o algoritmo não poderá construir dois circuitos em paralelo no mesmo ramo. As equações (8) e (9) representam a natureza binária das variáveis de decisão na construção de circuitos e subestações respectivamente.

A equação (10) representa a condição de radialidade do sistema. Esta restrição é necessária, mas não suficiente para garantir a radialidade do sistema, condição esta garantida pelo conjunto de equações (2), (3) e (10), desde que não existam barras de passagem no sistema (Lavorato et al., 2010).

3. O Algoritmo Heurístico Construtivo (AHC)

O algoritmo VNS, como toda metaheurística de busca em vizinhança necessariamente parte de um ponto inicial qualquer. Assim, foi implementado um AHC com o objetivo de fornecer um ponto inicial de boa qualidade ao VNS e melhorar sua eficiência computacional.

O AHC constrói passo a passo uma solução factível para o problema de PSD, em que cada iteração uma subestação ou um circuito é adicionado ao sistema. Para escolher a subestação ou o circuito que será construído no sistema foram utilizados índices de sensibilidade, cuja função é indicar quais os elementos (subestações e/ou circuitos) mais atraentes para serem introduzidos no sistema a cada iteração. Desta forma, dois índices de sensibilidade (escolhidos de forma arbitrária) foram definidos neste trabalho: (a) Índice de Sensibilidade para Subestações (ISS) e Índice de Sensibilidade para Circuitos (ISC) (Lavorato et al., 2010), que são calculados da seguinte forma:

$$ISS = \max_{i \in \Omega_{bs}} \{ \sqrt{P_i^2 + Q_i^2}, \forall m_i \neq 0 \} \quad (15)$$

$$ISC = \max_{(ij) \in \Omega_l} \{ \max \{ S_{ij,a}, S_{ji,a} \}, \forall n_{ij,a} \neq 0 \} \quad (16)$$

O modelo matemático para o PSD é um problema de programação não-linear inteiro misto, de difícil solução (NP - difícil) e possui o fenômeno de explosão combinatorial. Portanto, considera-se as variáveis de decisão m_i e $n_{ij,a}$ como sendo contínuas e limitadas no intervalo entre 0 e 1 para que o PSD possa ser resolvido de forma relaxada e uma variável m_i^+ e $n_{ij,a}^+$ que tem como objetivo indicar qual subestação e/ou circuito foram construídos no sistema a cada iteração. Assim, a função objetivo para o AHC é alterada da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} \min f = & \kappa_l \sum_{ij \in \Omega_l} \sum_{a \in \Omega_a} (c_{ij,a} (n_{ij,a} + n_{ij,a}^+) l_{ij}) + \kappa_s \sum_{i \in \Omega_{bs}} (c_{fi} (m_i^+ + m_i)) \\ & + \alpha \tau_l \phi_l c_l \sum_{ij \in \Omega_l} \sum_{a \in \Omega_a} (g_{ij,a} (n_{ij,a}^0 + n_{ij,a} + n_{ij,a}^+) (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij})) \\ & + \alpha \tau_s \phi_s \sum_{i \in \Omega_{bs}} (c_{vi} (P_{Si}^2 + Q_{Si}^2)) \end{aligned} \quad (17)$$

e, as restrições de (5) a (10) são substituídas por:

$$P_{Si}^2 + Q_{Si}^2 \leq (\bar{S}_i^0 + (m_i + m_i^+) \bar{S}_i)^2 \quad \forall i \in \Omega_{bs} \quad (18)$$

$$P_{ij,a}^2 + Q_{ij,a}^2 \leq ((n_{ij,a}^0 + n_{ij,a} + n_{ij,a}^+) \bar{S}_{ij,a})^2 \quad \forall ij \in \Omega_f, \forall a \in \Omega_a \quad (19)$$

$$\sum_{a \in \Omega_a} n_{ij,a}^0 + n_{ij,a} + n_{ij,a}^+ \leq 1 \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (20)$$

$$0 \leq n_{ij,a} \leq 1 - n_{ij,a}^+ \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall a \in \Omega_a \quad (21)$$

$$0 \leq m_i \leq 1 - m_i^+ \quad \forall i \in \Omega_b \quad (22)$$

$$\sum_{ij \in \Omega_l} \sum_{a \in \Omega_a} n_{ij,a}^0 + n_{ij,a} + n_{ij,a}^+ = n_b - n_{bs} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (23)$$

Pode-se observar que, com estas restrições, a solução da próxima iteração irá fornecer valores de n_{ija} e m_i iguais a zero quando são acrescentados o circuito n_{ija}^+ e a subestação m_i^+ . O critério de parada do AHC é definido pelos índices de factibilidade de circuitos (IFC) e subestações (IFS) mostrados a seguir:

$$IFC = \sum_{(ij) \in \Omega_l} n_{ija} \quad (22)$$

$$IFS = \sum_{i \in \Omega_{ps}} m_i \quad (23)$$

Quando estes índices são maiores que zero, significa que ainda possuem circuitos e/ou subestações que podem ser incluídos no sistema. Portanto, o AHC irá parar somente quando não houver mais possibilidade de inclusão de nenhum circuito ou subestação no sistema, ou seja, quando IFC e IFS forem iguais a zero.

A seguir, é apresentado o fluxograma do AHC:

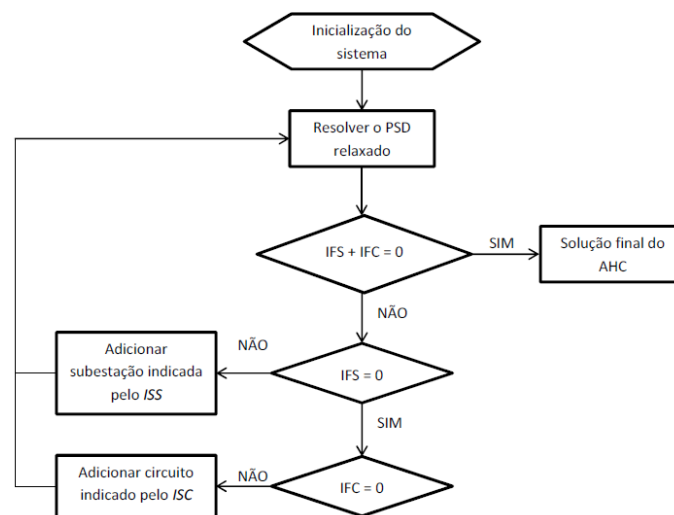


Figura 1: Fluxograma do Algoritmo Heurístico Construtivo.

Terminado o processo do AHC, tem-se uma solução que servirá de ponto inicial para a etapa da metaheurística VNS. O número de iterações realizadas pelo algoritmo heurístico construtivo corresponde ao número de subestações mais o número de circuitos adicionados no sistema. A diferença do AHC apresentado em (Lavorato et al., 2010) e no AHC apresentado neste trabalho, é que a metodologia apresentada em (Lavorato et al., 2010) possui uma fase de melhoria local com ramificações.

4. A Busca em Vizinhança Variável (VNS)

A metaheurística VNS, sigla para *Variable Neighborhood Search*, é um método que utiliza o sistema de mudança de estruturas de vizinhança para encontrar soluções mínimas locais e também como estratégia para sair destes mínimos locais, o que o torna diferente da maioria das outras metaheurísticas, uma vez que o VNS não aceita degradação da solução corrente. Neste trabalho, o VNS foi adaptado da seguinte forma: para cada estrutura de vizinhança visitada gera-se uma configuração inactivável S' de tal forma que a busca local possa explorar todas as rotas alternativas (configurações S'') que trazem de volta a factibilidade do sistema. O VNS permanece na mesma estrutura de vizinhança até explorar todas estas possibilidades. Quando é encontrada uma solução de melhor qualidade do que a solução incumbente S^* , o algoritmo sai da estrutura de vizinhança explorada e retorna imediatamente para a primeira estrutura que lhe é designado a

explorar, ou continua nesta se nela ainda estiver, porém com a nova solução incumbente S^* , caso contrário, seguirá para a próxima estrutura de vizinhança até que todas as estruturas de vizinhança sejam visitadas. O pseudocódigo do VNS é mostrado a seguir:

Início

1. Seja S_0 uma Solução Inicial (obtida pelo AHC) e seja r o número de estruturas de vizinhança;
2. $S^* \leftarrow S_0$; (Solução corrente)
3. Faça $k = 1$;
4. **Enquanto** ($k \leq r$) **faça**:
 5. Gere uma configuração S' de forma aleatória;
 6. $S'' \rightarrow \text{Busca Local}(S')$;
 7. **Se** ($f(S'') < f(S^*)$) **então**
 Faça $S^* \leftarrow S''$;
 Faça $k = 1$;

Senão

Faça $k = k + 1$;

Fim Se;

Fim Enquanto;

8. Retorne S^* ;

Fim

O Algoritmo VNS tem como objetivo melhorar apenas a configuração dos circuitos construídos pelo AHC. As subestações são construídas e/ou repotenciadas pelo AHC.

4.1 Estruturas de Vizinhança Utilizadas

- **Estrutura 1:** Escolher aleatoriamente um circuito que será retirado do sistema, tornando-o desconexo (configuração S'). Fazer então uma busca local, onde a cada iteração desta busca um ramo, diferente do que foi retirado, é adicionado ao sistema de forma a tornar este sistema conexo.
- **Estrutura 2:** Escolher aleatoriamente um circuito que será adicionado ao sistema (configuração S'), criando-se assim um anel. Fazer então uma busca local, na qual a cada iteração desta busca é retirado um circuito do anel, diferente do que foi adicionado, para que o sistema seja novamente radial.
- **Estrutura 3:** Escolher aleatoriamente dois circuitos que serão retirados do sistema simultaneamente, tornando-o desconexo (configuração S'). Fazer uma busca local onde a cada iteração desta busca dois circuitos, diferentes dos que foram retirados, são escolhidos aleatoriamente para conectar novamente todas as barras do sistema tornando-o conexo.
- **Estrutura 4:** Escolher aleatoriamente dois circuitos que serão adicionados ao sistema, criando-se dois anéis distintos (configuração S'). Fazer uma busca local onde a cada iteração desta busca um circuito, diferente dos que foram colocados, é retirando de cada anel, de tal forma que o sistema se torne radial novamente.

Neste processo de busca pretende-se explorar o máximo de soluções possíveis para o problema de PSD e quando nenhuma das quatro estruturas consegue melhorar a solução incumbente, o processo é terminado e a solução incumbente atual é tomada como solução do problema.

5. Resultados

O algoritmo (tanto o AHC quanto o VNS) foi implementado na linguagem de modelagem matemática AMPL (*A Modeling Language for Mathematical Programming*) versão

estudantil, o *solver* utilizado para resolver os problemas de programação não-linear foi o KNITRO 7.0 (licença para estudante, opções em *default*, número de iterações em 100 na etapa do VNS). O computador utilizado possui processador Intel® Pentium® 4 de 2.8GHz, com memória RAM de 512MB.

5.1 Primeiro Teste: Sistema de 23 barras

O primeiro teste consiste em um sistema de distribuição de 23 barras (Gómez et al., 2004), (Nahman e Peric, 2008) e (Lavorato, 2010), tensão nominal 34,5kV, alimentada por uma subestação de 10MVA, que supre uma área de produção de óleo com 21 barras de carga. O desvio máximo de tensão permitido é de 3%, o fator de potência médio é igual a 0,9, o custo de perdas de energia é de 0,05 US\$/kWh, e o custo de operação da subestação é de 0,01 US\$/kVAh², o fator de perdas é 0,35, a taxa de juros é de 0,1, o corte de carga permitido é de 1kVA e o horizonte de planejamento é de 20 anos. O dados dos condutores podem ser vistos em Grigsy (2001). A Figura 3 mostra as rotas factíveis para a construção de circuitos.

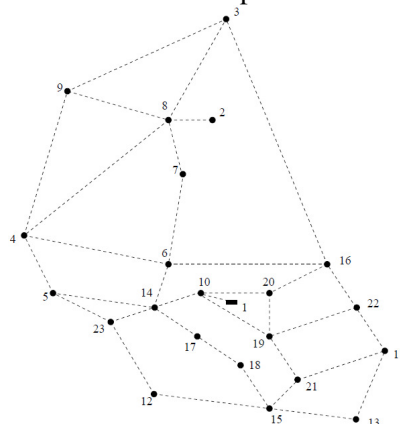


Figura 3: Sistema de 23 barras – Rotas factíveis para construção dos circuitos

Tabela 1: Resultados obtido no Primeiro Teste (US\$)

Soluções	Custo de Circuitos	Custo de Perdas	Custo Total
Gómez et al. (2004)	151.892	21.021	172.913
Nahman e Peric (2008)	151.892	21.021	172.899
Lavorato (2010)	151.892	20.227	172.119
1ª. Fase - AHC	158.762	19.946	177.952
2ª. Fase - VNS	151.892	20.227	172.119

Na primeira fase da metodologia proposta quando um AHC é utilizado para encontrar uma solução inicial para o VNS, foram resolvidos 22 problemas de PNL. Na segunda fase quando o problema de PSD é resolvido pela metaheurística VNS, pode-se observar que o resultado obtido é de melhor qualidade que a solução inicial (primeira fase). O tempo computacional total gasto pelo algoritmo foi de 2.800,97 segundos sendo que o VNS realizou 5.853 iterações. Os resultados foram comparados com os existentes na literatura Gómez et al. (2004), Nahman e Peric (2008), e Lavorato (2010), Tabela 1. A configuração encontrada pelo algoritmo VNS é a mesma encontrada na literatura, porém o custo de perdas é menor que em Gómez et al. (2004), Nahman e Peric (2008), e idêntico a Lavorato (2010) pois neste trabalho o PNL foi modelado da mesma forma que em Lavorato (2010), onde a tensão da subestação também é uma variável do sistema.

Observa-se também que a configuração obtida na fase do AHC está próxima da solução obtida pelo VNS. A Figura 4 apresenta as configurações obtidas pela 1ª. Fase – AHC e pela 2ª. Fase – VNS, onde ambas as topologias são radiais, já que o AHC sempre fornece uma solução factível de boa qualidade ao algoritmo VNS.

5.2 Segundo Teste: Sistema de 54 barras

Este segundo teste consiste no planejamento de um sistema de distribuição que possui 4 subestações das quais duas são existentes podendo ser repotenciadas e duas candidatas a construção, (Lavorato, 2010). A tensão nominal do sistema é 13,5 kV, com um fornecimento total de 1,078 MVA para 50 barras de carga. O sistema já possui 17 circuitos construídos e 44 possibilidades de rotas para construção de novos circuitos. Os limites de subtenção e sobretensão são de 5%, o fator de potência médio é igual a 0,9, o fator e o custo de perdas de energia são 0,35 e 0,05 US\$/kVAh respectivamente, a taxa de juros é de 10%, o custo de operação das subestações é de 0,001 US\$/kVAh² e o período de planejamento é de 20 anos. A figura 8 mostra todas as rotas possíveis e a configuração encontrada. Na tabela 2 são apresentados os resultados obtidos neste trabalho e os resultados encontrados na literatura, observa-se que os resultados encontrados pelo VNS são iguais ao apresentado na literatura.

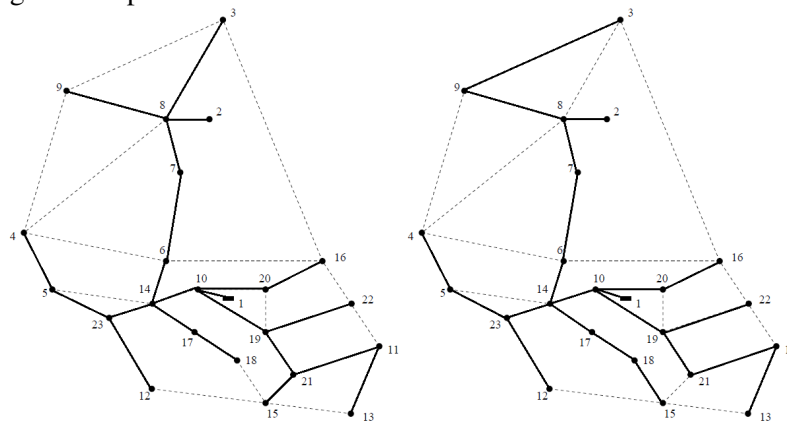


Figura 4: Configurações obtidas na 1ª. Fase – AHC e 2ª. Fase – VNS respectivamente.

Na primeira fase do algoritmo, o AHC resolveu 33 problemas de PNL. Na segunda fase quando o problema de PSD é resolvido pela metaheurística VNS, pode-se observar que o resultado obtido é de melhor qualidade que a solução inicial (primeira fase). O tempo computacional total gasto pela metodologia foi de 8.017,55 segundos e o VNS realizou 8.039 iterações. A configuração encontrada é a mesma que em (Lavorato et al, 2010) e o custo de perdas é idêntico pois o PNL resolvido neste trabalho é idêntico ao utilizado por (Lavorato et al, 2010). A Figura 5 apresenta a topologia do sistema de 54 barras cujas linhas pontilhadas representam as rotas factíveis onde os circuitos podem ser construídos e as linhas contínuas os circuitos construídos.

Tabela 2: Resultados obtidos no Segundo Teste (US\$)

Soluções	Custo de Circuitos	Custo de Perdas	Custo de subestações	Custo Total
Lavorato (2010)	39.580	2.672	540.000	582.252
1ª. Fase - AHC	39.452	3.121	540.000	582.573
2ª. Fase - VNS	39.580	2.672	540.000	582.252

Observa-se que a topologia encontrada possui quatro sistemas distintos e independentes respeitando assim a condição de não interligação das subestações. Neste sistema foram construídas duas subestações S3 e S4 e a subestação S1 foi repotenciada.

6. Conclusões

Foi apresentada neste trabalho uma metodologia para a solução do problema de PSD utilizando a metaheurística VNS e um AHC para fornecer uma solução inicial a esta metaheurística. O algoritmo VNS permite explorar de forma eficiente o espaço de busca do problema de PSD modelado neste trabalho, já que foi possível examinar de forma adequada um número considerável de diferentes configurações nas diferentes estruturas de vizinhança.

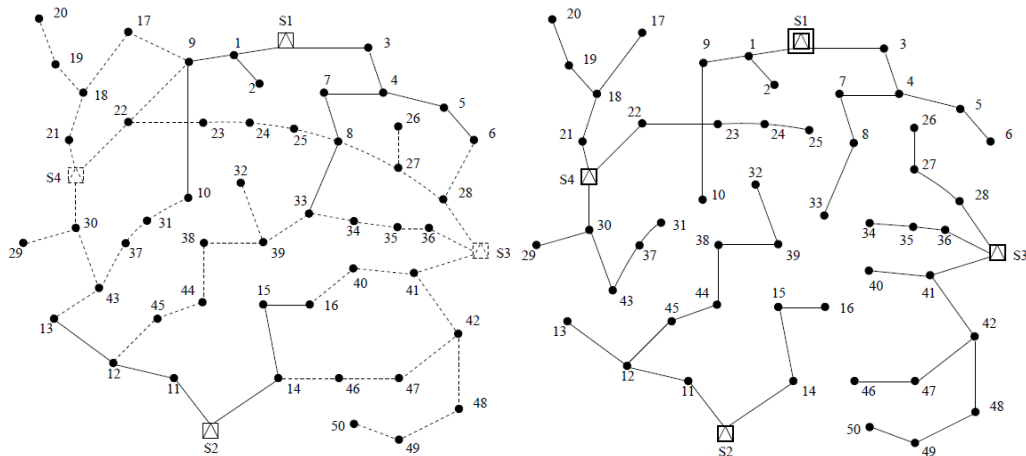


Figura 5: Rotas possíveis e o resultado final obtido.

Os resultados encontrados utilizando a metodologia proposta neste trabalho apresentam topologias radiais e independentes, respeitado a condição de não interconexão de um sistema entre duas ou mais subestações. Os resultados encontrados foram comparados com os existentes na literatura de forma a comprovar o funcionamento da metodologia proposta neste trabalho e a eficiência da mesma no que diz respeito à qualidade dos resultados.

7. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Fundo de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e à Fundação de Ensino, Pesquisa e Extensão de Ilha Solteira pelo financiamento deste projeto de pesquisa.

8. Referências Bibliográficas

Aoki, K.; Nara, K.; Satoh, T.; Kitagawa, M.; Yamanaka, K., New Approximate Optimization Method for Distribution System Planning. *IEEE Transactions on Power Systems*, 5(1):126–132, Fevereiro de 1990.

Augugliaro, A.; Dusonchet, L.; Sanseverino, E. R., An Evolutionary Parallel Tabu Search Approach for Distribution Systems Reinforcement Planning. *Advanced Engineering Informatics*, 16(3): 205–215, Agosto de 2002.

Bernal-Agustín, L., Aplicación de Algoritmos Genéticos al Diseño Optimo de Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica. *Tesis doctoral*, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Zaragoza, España, Janeiro de 1998.

Bhowmik S.; Goswami S. K.; Bhattacharjee, P. K., Distribution System Planning Through Combined Heuristic and Quadratic Programming Approach. *Electric Machines and Power Systems*, 28(1):87– 103, Janeiro de 2000.

Cossi A. M., Planejamento de redes de distribuição de energia elétrica de média e baixa tensão. *Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica*, Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Outubro 2008.

Gómez, J. F.; Khodr, H. M.; Oliveira, P. M.; Ocque L.; Yusta J. M.; Villasana, R.; Urdaneta, A. J., Ant Colony System Algorithm for the Planning of Primary Distribution Circuits. *IEEE Transactions on Power Systems*, 19(2):996–1004, Maio de 2004.

Goswami, S. K., Distribution System Planning Using Branch Exchange Technique. *IEEE Transactions on Power Systems*, 12(2):718–723, Maio de 1997.

Grigsby L. L., *Electric Power Engineering Handbook*. Boca Raton, FL: CRC/IEEE Press, 2001.

Lavorato, M.; Rider M. J.; Romero, R.; Garcia, A., A Constructive Heuristic Algorithm for Distribution System Planning. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 25, No. 3, pp. 1734 – 1742, Agosto 2010.

Mendoza, F.; Bernal Agustín, J. L.; Domínguez-Navarro, J. A., NSGA and SPEA Applied to Multi Objective Design of Power Distribution Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 21(4):1938–1945, Novembro 2006.

Miguez E.; Cidras J.; Díaz-Dorado E.; Garcia-Dornelas, J. L., An Improved Branch-Exchange Algorithm for Large-Scale Distribution Network Planning. *IEEE Transactions on Power Systems*, 17(4): 931–936, Novembro de 2002.

Mladenovic, N. e Hansen, P.(1997), Variable Neighborhood Search. *Computers and Operations Research*, 24, 1097-1100.

Nahman, J. M.; Peric, D. M., Optimal Planning of Radial Distribution Networks by Simulated Annealing Technique, *IEEE Transactions Power Systems*, vol. 23, no. 2, pp. 790–795, Maio de 2008.

Najafi, S.; Hosseinian, S. H.; Abedi, M.; Vahidnia, A.; Abachezadeh, S., A Framework for Optimal Planning in Large Distribution Networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, 24(2):1019–1028, Maio 2009.

Nara, K.; Kuwabara, H.; Kitagawa, M.; Ohtaka, K., Algorithm for Expansion Planning in Distribution Systems Taking Faults Into Consideration. *IEEE Transactions on Power Systems*, 9(1):324–330, Fevereiro de 1994.

Oliveira, M. L.; Planejamento Integrado da Expansão de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. *Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica*, Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Março 2010.

Paiva, P. C.; Khodr, H. M.; Domínguez-Navarro J. A. D.; Yusta, J. M.; Urdaneta A. J., Integral Planning of Primary-Secondary Distribution Systems Using Mixed Integer Linear Programming. *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(2):1134–1143, Maio de 2005.

Ponnavaikko, M.; Rao P., Distribution System Planning Through a Quadratic Mixed Integer Programming Approach. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2(4):1157–1163, October 1987.

Ramirez-Rosado, I. J; Dominguez-Navarro, J. A., New Multi Objective Tabu Search Algorithm for Fuzzy Optimal Planning of Power Distribution Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 21 (1):224–233, Fevereiro de 2006.

9. Apêndice

1. Dados do Sistema de 23 barras

Dados de Barra (kVA)				Dados de Circuito								
Barra	S^0	Barra	S_D	Barra De	Barra Para	Comp. km	De	Para	Comp. km	De	Para	Comp. km
1	10.000	12	320	1	10	0,20209	6	14	0,8177	13	15	0,6229
2	0	13	320	2	8	0,0756	6	16	1,1752	14	17	0,4482
Barra	S_D	14	320	3	8	2,7079	7	8	0,6866	14	23	0,486
3	640	15	320	3	9	1,8202	8	9	2,0567	15	18	0,5711
4	320	16	320	3	16	4,2237	10	14	0,4297	15	21	0,6069
5	320	17	320	4	5	0,9402	10	19	0,5949	16	20	0,5019
6	320	18	320	4	6	1,5017	10	20	0,6973	16	22	0,9483
7	320	19	320	4	8	2,3053	11	13	0,5053	17	18	0,4411
8	320	20	320	4	9	3,4479	11	21	0,6394	19	20	0,7303
9	320	21	320	5	14	1,0162	11	22	0,6925	19	21	0,555
10	320	22	320	5	23	0,64091	12	15	0,9809	19	22	0,5827
11	320	23	320	6	7	0,81807	12	23	0,6786			

Dados de Condutores				
Tipo	I_{max}	R	X	Custo
	A	Ω/km	Ω/km	US\$/km
1	230	0,605	0,429	10000
4	340	0,302	0,402	40000

2. Dados do Sistema de 54 barras

Dados de Barra (kVA)						Dados de Circuito								
Barra	S_D	Barra	S_D	Barra	S_D	Barra De	Barra Para	Comp. km	De	Para	Comp. km	De	Para	Comp. km
1	420,41	18	119,87	35	89,9	1	101	0,281	21	18	0,312	38	44	0,312
2	150,27	19	139,99	36	30,0	3	101	0,218	21	104	0,25	39	38	0,343
3	69,78	20	80,06	37	210,2	4	3	0,312	22	104	0,375	32	39	0,406
4	110,02	21	180,24	38	110,0	7	4	0,25	22	9	0,468	33	39	0,281
5	260,29	22	110,02	39	100,2	5	4	0,312	23	22	0,343	34	33	0,187
6	69,78	23	100,18	40	140,0	8	7	0,312	24	23	0,281	35	34	0,218
7	100,18	24	50,09	41	89,9	6	5	0,25	25	24	0,218	36	35	0,218
8	190,08	25	89,90	42	119,9	9	1	0,343	8	25	0,281	36	103	0,25
9	119,87	26	119,87	43	130,1	2	1	0,312	27	8	0,375	28	103	0,312
10	290,26	27	150,27	44	140,0	10	9	0,718	26	27	0,343	41	103	0,312
11	29,97	28	69,78	45	80,1	14	102	0,375	28	27	0,312	40	41	0,375
12	180,24	29	139,99	46	180,2	15	14	0,375	28	6	0,5	16	40	0,25
13	110,02	30	260,29	47	100,2	16	15	0,281	30	104	0,281	42	41	0,375
14	100,18	31	69,78	48	80,1	11	102	0,281	29	30	0,312	48	42	0,25
15	139,99	32	169,96	49	50,1	12	11	0,312	43	30	0,406	49	48	0,375
16	190,08	33	290,26	50	80,1	13	12	0,437	37	43	0,25	50	49	0,218
17	69,78	34	119,87			8	33	0,468	31	37	0,187	47	42	0,312
						20	19	0,312	10	31	0,312	46	47	0,312
						19	18	0,25	43	13	0,375	14	46	0,343
						18	17	0,406	45	12	0,25	38	44	0,312
						17	9	0,43	44	45	0,218	39	38	0,343

Dados de Condutores				
Tipo	I_{max}	R	X	Custo
	A	Ω/km	Ω/km	US\$
1	90	6,66067	4,5936	4000
2	110	5,32279	4,494	7000

Dados de Subestações					
Barra	S^0	S	Custo	Barra	S
	kVA	kVA	US\$		kVA
101	167	167	100.000	103	222
102	167	133	80.000	104	222