

IMPACTO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NA RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO BUSCA EM VIZINHANÇA VARIÁVEL

W. Guerra

Universidade Federal de Ouro Preto
Universidade Federal de Ouro Preto - MG
Instituto de Ciências Exatas ICEA
wilingthon@decea.ufop.br

Unsihuay-Vila, C.

Universidade Federal de Paraná - PR
clodomiro@eletrica.ufpr.br

N. Kagan

Universidade de São Paulo - Escola Politécnica - SP
Centro de Estudos em Regulação e Energia – Enerq-ct
nelsonk@pea.usp.br

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo do impacto da geração distribuída na reconfiguração de sistemas de distribuição. O modelo proposto considera o problema da reconfiguração ótima de sistemas de distribuição, com objetivo da redução de perdas ativas e maximização do fornecimento de energia das unidades de geração distribuída, utilizando a técnica metaheurística denominada “*Busca em Vizinhaça Variável*” VNS. Esta técnica utiliza a combinação de busca local e global, através da construção de estruturas de vizinhaça previamente determinadas. A configuração inicial da topologia assim como a alocação de unidades de geração distribuída é gerada aleatoriamente. Também é implementada a busca da primeira melhor configuração vizinha (melhor qualidade) como estratégia de percorrer o espaço de busca, além de realizar uma transição de uma estrutura que tem menor número de vizinhos para outra que tem maior número de vizinhos. São apresentados os resultados obtidos num sistema de 135 barras.

PALAVRAS CHAVE. Busca em Vizinhaça Variável, Geração distribuída, Perdas Ativas

ABSTRACT

This paper presents a study of impact in distribution system reconfiguration using distributed generation. The proposed model considers problem optimal distribution systems reconfiguration, with the aim of reducing power losses and maximizing power supply of generation units using metaheuristic technique “*Variable neighborhood search*” VNS. This technique uses a global and local search combination, through the construction neighborhood structures previously determined. The initial topology configuration and allocation of distributed generation units are randomly generated. Also was implemented search for best first neighbor configuration as strategy to move into search space, beyond do transition from a structure with fewer neighbors to other with high neighbors number. Presents results obtained in a system of 135 bars.

KEYWORDS. Variable neighborhood search, Distributed Generation, Power Losses

1. Introdução

Os sistemas de distribuição de energia elétrica, na maioria dos casos, são configurados para operar radialmente, o que significa que cada barra (nó) deve ser alimentada por uma só linha (trecho). Isto, com o objetivo de evitar problemas, tais como, coordenação da proteção e atenuação de corrente de curto-circuito. No entanto, a configuração radial pode ocasionar problemas em situações de contingência ou sobrecargas, nas quais seria necessário o ilhamento de parte do sistema, corte de carga, entre outros.

Conseqüência desses problemas, os sistemas de distribuição de energia elétrica são normalmente construídos em malha e operados radialmente. Desta forma as configurações radiais existentes nos sistemas de distribuição podem chegar a ser milhões, dependendo do tamanho da rede. Alterar um sistema radial para outro, significa reconfigurar a topologia através do fechamento e abertura de chaves de interconexão e seccionamento.

Os sistemas de energia elétrica estão prestes a sofrer uma transformação de grandes proporções. Essa transformação consiste na modernização das tecnologias de geração, transmissão, distribuição e uso final da energia elétrica, visando abordar questões que vão desde as preocupações com mudanças climáticas até a possibilidade de proporcionar ao usuário final maior participação no gerenciamento do sistema elétrico. Outros aspectos visados nessa transformação são a confiabilidade do fornecimento de energia e a intensificação do uso de geração distribuída conectada à rede de distribuição. Essa nova concepção atende pelo nome genérico de Smart Grid ou Redes Elétricas Inteligentes, como vem sendo traduzido para o Português (FALÇAO, 2009).

Nesse contexto, a Geração Distribuída isto é conexão de geradores de médio porte (poucos MW) e pequeno porte (poucos kW) às redes de distribuição em média ou baixa tensão, proporcionada pelas Redes Elétrica Inteligentes, reforçará uma tendência já observado em passado recente da introdução da geração distribuída em complementação às grandes centrais geradoras; em particular, a utilização de fontes alternativas, tais como fotovoltaica e eólica, apresenta a vantagem de reduzir o impacto ambiental de grandes centrais de geração e sistemas de transmissão a longa distância (FALÇAO, 2010).

No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) já prevê a ligação de unidades geradoras monofásicas ou trifásicas em baixa e média tensão, mas ainda há dificuldades políticas para promover a disseminação desse tipo de geração devido, em parte, ao mercado cativo das distribuidoras de energia elétrica e a ausência de indústria nacional de equipamentos de geração. No entanto, a tendência internacional para que o consumidor em baixa tensão possa exercer o direito de gerar energia elétrica contribuirá para a mudança de paradigma no país. Vários países da Europa (DISPOWER, 2006), a exemplo da Alemanha, Espanha e Portugal, já possuem tecnologias para geração, além de normas para a regulamentação da produção de energia elétrica em baixa tensão.

Sendo assim, a inserção da Geração Distribuída altera o planejamento e operação dos sistemas elétricos, colocando novos desafios nas técnicas para otimizar e operar esses sistemas elétricos.

Neste trabalho, a utilização de unidades de GD faz, em geral, com que o sistema opere com menores perdas que sem GDs. Porém, deve-se ressaltar que o suprimento usando GDs nem sempre é ótimo.

Através da reconfiguração de uma rede elétrica, quando feita adequadamente, pode-se reduzir os custos de operação assim como maximizar o fornecimento dos clientes com GDs. Dessa forma, pode-se postergar investimentos para expansão da capacidade de fornecimento de energia do sistema.

Na literatura, existem muitos métodos para resolver este problema. A maioria desses tem como objetivo a minimização das perdas ativas sem considerar GDs. Entre os mais referenciados na literatura ressalta-se um dos primeiros trabalhos, de Merlin e Back (1975), onde a técnica de otimização utilizada se baseia na abertura de chaves, começando com uma rede malhada (todas as chaves fechadas) e abrindo uma a uma, até conseguir a radialidade da rede. Um equivalente resistivo da rede é usado em Cinvalar et al. (1998) para determinar as chaves que

devem ser abertas e fechadas, mantendo a condição de radialidade da rede. Esta técnica baseia-se na transferência de carga de um alimentador para outro, minimizando o esforço computacional e eliminando opções indesejáveis. Shirmohammadi e Hong (1989) propuseram um método baseado no trabalho de Merlin e Back (1975). A solução começa fechando todas as chaves para depois executar um fluxo de carga com a rede em malha. O ramo que apresenta menor fluxo de corrente é aberto através da sua respectiva chave. O processo continua até que a rede fique radial. Goswami e Basu (1992) formulam uma técnica, que consiste em fechar só uma chave de interconexão, para então construir um padrão de fluxo ótimo PFO, que determina qual chave do laço gerado deve ser aberta, para gerar a mínima perda. Guimarães (2005) apresenta-se um algoritmo de Busca Tabu considerando unidades de GDs, sem levar em conta a sua capacidade de fornecimento. Yasin e Rahman (2006) apresentam o problema da restauração de redes elétricas considerando GDs, e a minimização de perdas ativas e otimização do perfil de tensões. O método utiliza um índice de sensibilidade para alocar as unidades de GDs e programação evolutiva para calcular o tamanho da GDs instalada. Em Li et al. (2009) apresentam também o problema de reconfiguração considerando GDs, com objetivo de reduzir as perdas ativas, utilizando também um índice de sensibilidade.

O presente trabalho apresenta a implementação da metaheurística “Busca em Vizinhaça Variável”, que tem como princípio básico explorar o maior número de configurações do espaço factível (Busca Global) e intensificar a busca sobre aquelas configurações atrativas (Busca Local). Guerra e Romero (2006) apresentam esta mesma técnica, mas sem considerar GDs. Ressalta se que a conexão de GDs aos sistemas de média e baixa tensão cria ao planejamento e operação dos sistemas elétricos maiores desafios. Então, surge uma pergunta: Como essa conexão de GDs influencia na reconfiguração de redes elétricas, por exemplo, objetivando minimizar perdas ativas? Ainda mais, considerando-se um objetivo adicional, qual é, de maximizar a potência fornecida pelos GDs. Pelos resultados obtidos, não necessariamente uma menor perda leva ao máximo fornecimento de potência dos GDs. Encontrar um ponto de compromisso entre esses dois objetivos é o propósito deste trabalho.

São apresentados os resultados obtidos na simulação de um sistema de 135 barras, com alocação das unidades de GD.

2. Formulação Genérica de Reconfiguração de Sistemas de Distribuição

O problema de reconfiguração de redes elétricas pode ser formulado como:

$$\text{Min} \rightarrow f = F_A \cdot A + F_B \cdot B \quad (1)$$

$$A = \sum_{j=1}^{n_{ger}} (P_{Maxgerada_j} - P_{gerada_j}) \quad (2)$$

$$B = \sum_{i=1}^{nr} r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{|V_i|^2} \quad (3)$$

s. a.

$$G(v) = 0 \quad (4)$$

$$V_{\min} \leq |V_{bar}| \leq V_{\max} \quad (5)$$

$$0 \leq |I_r| \leq I_{r_{\max}} \quad (6)$$

$$R(S) = 0 \quad (7)$$

$$P_{\min} \leq |P_{gerada}| \leq P_{\max} \quad (8)$$

onde:

A	: Potência ativa total não gerada pelos GDs;
B	: Perdas ativas totais da rede;
$P_{Maxgerad_j}$: Máxima potência ativa gerada pelo gerador j ;
P_{gerad_j}	: Potência ativa gerada pelo gerador j ;
P_i	: Fluxo de potência ativa do ramo i ;
P_{min}, P_{max}	: Potência mínima e máxima permitida no gerador j ;
Q_i	: Fluxo de potência reativa do ramo i ;
V_{bar}	: Tensão na barra bar ;
V_{min}, V_{max}	: Tensão mínima e máxima permitida na barra i ;
nr	: Número de ramos da rede;
$nger$: Número de geradores na rede;
r_i	: Resistência do ramo i ;
$I_{r_{max}}$: Capacidade do ramo i ;
I_{r_i}	: Corrente do ramo i ;
$G(v)$: Restrições de fluxo de carga, com variáveis fasoriais;
$R(S)$: Restrições de radialidade;
FA, FB	: Pesos das funções objetivos: Potência dos GDs e Perdas ativas.

A natureza combinatória do problema representado através da eq. (1) e a restrição de radialidade são fatores de complexidade para a solução do problema. Esta restrição é difícil de representar através de expressões matemáticas. Desta forma, este problema não é resolvido com técnicas tradicionais de otimização.

No problema de reconfiguração, considera-se que a rede esta constituída por trechos, cada um desses com uma chave, sendo que nos trechos energizados, as chaves estão fechadas (chaves seccionadoras) e nos trechos desenergizados, as chaves estão abertas (chaves de interconexão). A eq. (1) representa a função objetivo (perdas ativas e a potência total que deixam de fornecer os GDs). Cada uma dessas é afetada por um peso (FA, FB). A função objetivo pode ser determinada por meio de um cálculo de fluxo de carga.

3. Busca em Vizinhança Variável aplicado ao problema de Reconfiguração de redes radiais de distribuição utilizando GDs

A *Busca em Vizinhança Variável* (VNS), apresentada em Mladenovic (1995); Hansen e Mladenovic (1996) e Hansen e Mladenovic (1999) é uma metaheurística baseada num princípio simples, de mudança sistemática de parâmetros dentro de k estruturas de vizinhança. Fazendo uma combinação de uma busca local (intensificar) naquelas regiões mais promissórias e uma busca global (diversificar), de modo a sair dos ótimos locais. A combinação de estas duas técnicas faz com que o algoritmo seja muito eficiente.

Como mencionado, a radialidade é uma das restrições impostas para a resolução do problema e sua representação matemática constitui uma dificuldade. Entretanto, essa restrição é tratada pela VNS de forma eficiente através de uma codificação adequada das configurações dentro do processo de busca.

Foi utilizada uma estratégia de percorrido no espaço de busca, passar da solução atual para outra, caso esta última seja de melhor qualidade (função objetivo).

Por outro lado, as soluções que se encontram mediante um dos movimentos possíveis se denominam vizinhas e constituem a vizinhança. O conjunto de movimentos possíveis dá lugar a uma relação de vizinhança e estrutura de vizinhança. Para isto esta técnica da VNS utiliza uma combinação de buscas locais e globais. Nestes processos, as buscas serão não informadas, porque

não utilizam informação do passado. Além de utilizar uma estratégia de busca parcial aleatória que é a mais eficiente.

A construção das estruturas de vizinhança é fundamental no processo de busca, já que determina a qualidade do conjunto de movimentos aplicados, o qual enriquecerá a vizinhança. Com isso é possível realizar passos mais longos na aproximação à solução procurada.

Existem outras questões relevantes para o sucesso desta técnica, além da seleção da própria estrutura de vizinhança e como articular a busca, como são: a avaliação da função objetivo, o procedimento de gerar a solução inicial, o critério de parada, entre outros.

A) Codificação

Será utilizado um vetor binário para representar o “status” das chaves dos trechos que compõem a rede. No processo de codificação, “0” representa as chaves não conectadas e “1”, as chaves conectadas.

B) Avaliação da Função Objetivo

Na avaliação da qualidade da função objetivo de cada configuração, utiliza-se um programa para cálculo de fluxo de potência. Assim, para reduzir o esforço computacional deste algoritmo, necessita-se de um método de fluxo de potência que apresente a característica radial do sistema e que seja rápido e eficiente. Foi implementado o método apresentado por Shirmohammadi (1998).

Este método é iniciado escolhendo-se um valor para os módulos de tensão nas barras. Tipicamente é escolhida a mesma tensão da subestação, isto é, para cada barra k , assume-se que $V_k = V_{ref} + j0$, onde V_{ref} é o módulo de tensão da subestação. Com as tensões nas barras escolhidas, é possível conhecer a corrente de carga em todas as barras e nos ramos do sistema radial. Este processo inicia-se das barras extremas e percorrendo as barras em direção à subestação (*backward*). Com as correntes calculadas nos ramos é possível calcular as perdas ativas (e reativas) do sistema.

Com as correntes nos ramos calculados no processo (*backward*) é possível conhecer a corrente que está saindo da subestação. Então, usando os valores das correntes dos ramos e iniciando o processo a partir da subestação é possível calcular os novos valores das tensões de todas as barras do sistema. Este processo é realizado a partir da subestação e termina nas barras extremas (*forward*). Com os novos valores de tensão nas barras é possível encontrar novamente as correntes de carga nas barras e as correntes em todos os ramos do sistema (*backward*). Os novos valores de correntes dos ramos permitem encontrar novos valores de perdas ativas (e reativas) do sistema. Este processo iterativo termina com a convergência dos valores das tensões durante duas iterações sucessivas.

C) Estruturas de Vizinhança

No campo da otimização se define como ótimo local da função a otimizar qualquer ponto x^* para no qual existe uma vizinhança $N(x^*)$ tal que x^* é ótimo nessa vizinhança. Então, o ótimo global pode ser obtido examinando todos os ótimos locais, e aquele que apresente melhor valor da função objetivo fica como ótimo global. Para o problema de reconfiguração, será aquela configuração que apresente o menor valor da função objetivo f .

A partir deste conceito, pode-se definir a vizinhança de uma solução: para um problema de reconfiguração (S, f) , uma estrutura de vizinhança é uma função $N: S \rightarrow 2^S = \{X/X \subseteq S\}$ que associa a cada solução $x \in S$ um conjunto de configurações y próximas a x , tal que cada y é uma solução vizinha de x .

Para este problema, uma solução é considerada que está mais próxima que outra, quando menos chaves de seccionamento assumem estados diferentes ao atual. Portanto, deve-se induzir uma distância r definida sobre o espaço factível $S, r: S \times S \rightarrow R$, que permita avaliar a

distância existente entre duas configurações quaisquer de S , como se ilustra na Figura 1. A partir dessa definição, é possível obter as seguintes estruturas de vizinhança para uma solução qualquer de x .

$$N_k(x) = \{x' \in S : r(x, x') = k\}, k = 1, \dots, n \tag{9}$$

onde y é uma solução vizinha de x , e $r(x, y) = k$ é a estrutura de vizinhança.

Numa rede de distribuição consideramos I_s as chaves seccionadoras e I_i as chaves de interconexão. É definido um espaço de configurações chamado $\Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2$ sendo $\Omega_1 = (s_1, s_2, \dots, s_i)$ e $\Omega_2 = (t_1, t_2, \dots, t_i)$ sendo que s_i (ou t_i) representa o estado da chave seccionadora (ou da chave de interconexão) i . Assume-se que $s_i = 1$ se a chave seccionadora estiver fechada e $s_i = 0$ se estiver aberta. A mesma convenção é utilizada para as chaves de interconexão.

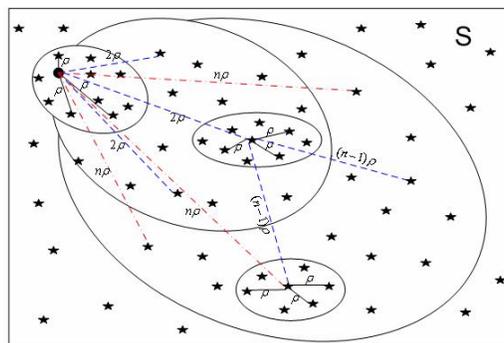


Fig. 1. Vizinhanças induzidas

D) Geração das Estruturas de Vizinhança

Em geral, as estruturas de vizinhança podem ser obtidas utilizando-se diferentes métricas ou distâncias induzidas no espaço de soluções factíveis S , como por exemplo: (i) seleção de heurísticas existentes, (ii) alteração de parâmetros dos métodos existentes, (iii) uso de k-intercâmbios, (iv) ou divisão de vizinhança. A estratégia utilizada foi através de k-intercâmbios, como ilustra a Fig. 2, que é a maneira mais fácil e natural de gerar as estruturas de vizinhança. Fechando k chaves de interconexão e abrindo k chaves de seccionamento (ou interconexão). Mantendo a restrição de radialidade. Este mecanismo funciona de forma eficiente, porque apresentou os melhores resultados no problema de minimização de perdas.

Com esta estratégia de geração de vizinhança, alguns problemas foram resolvidos como para ρ - mediana (HANSEN; MLADENOVIC 1996).

E) Ordenação da Vizinhança

Obtém-se uma ordenação natural da vizinhança aumentando a distância r existente entre a solução atual x e outra configuração com solução y . Em outras palavras, quando alteramos os estados de mais chaves simultaneamente, incrementa-se a distância r , e logo estaremos mais distantes da solução atual. Também se cumpre que, na medida de incrementar r , o número de soluções das estruturas vão aumentando, ou seja, $|N_1(x)| \leq |N_2(x)| \leq \dots \leq |N_{k_{\max}}(x)|$.

F) Estratégias de Busca e Mudança da Vizinhança

Utilizam-se estratégias com a finalidade de obter uma maior intensificação na busca naquelas regiões atrativas, onde se esperam encontrar boas soluções. Este algoritmo também tem capacidade de explorar grande quantidade de zonas (diversificação), evitando que a busca se concentre numa determinada região do espaço de busca. Para isto, considera-se que a escolha seja realizada através de duas estratégias diferentes: (i) a busca Gulosa ou a busca do melhor vizinho.

Realiza-se uma busca exaustiva transitando por todas as configurações da vizinhança da solução atual, determinando qual é a que produzirá uma maior melhoria do valor da função objetivo atual. (ii) A busca do primeiro melhor vizinho. Caracteriza-se por transitar em todas as configurações da vizinhança até que se encontre a primeira configuração vizinha de melhor qualidade que a solução atual.

Por termos duas fases importantes, no primeiro momento ao se produzir a mudança de vizinhança (segundo nível de decisão) e, segundo, quando se visitam diferentes soluções de uma mesma vizinhança (primeiro nível de decisão). Portanto, foi escolhida a busca do primeiro melhor vizinho.

Para a mudança de estrutura de vizinhança, adotou-se percorrer de forma sistemática incrementando o valor de k , ou seja, começar com $k = 1$, e quando não se puder melhorar em $N_k(x)$, passa-se $k = k + 1$. Caso se encontre uma melhor solução, reinicia-se $k = 1$.

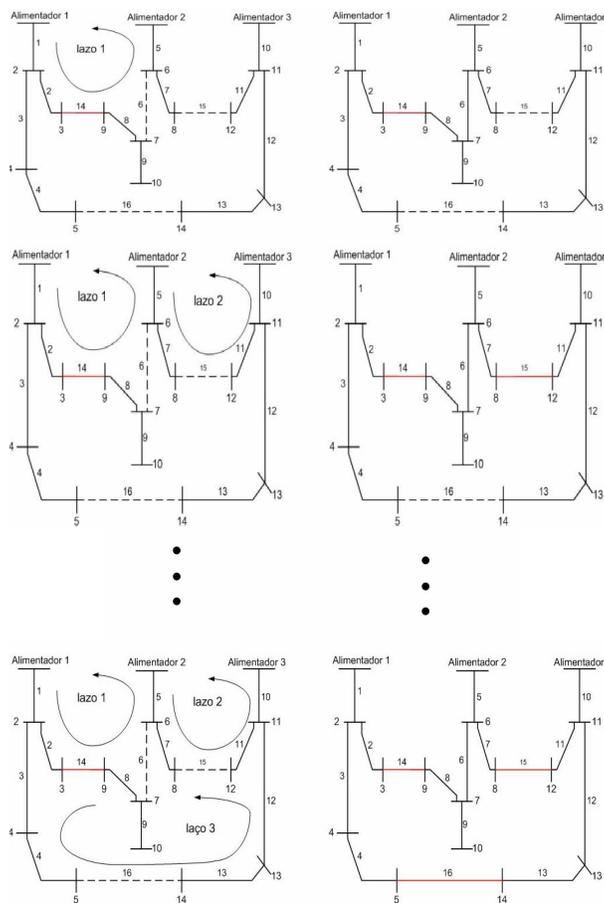


Fig. 2. Geração de estruturas de vizinhança através de k-intercâmbios

G) Critério de Parada

O critério de parada é determinado quando se considera o problema convergido. Para isso, deve-se levar em conta alguns indicadores de qualidade, tais como: (i) limite de número de iterações ou trocas, (ii) esforço computacional total, (iii) ou tempo computacional sem produzir uma melhora da solução incumbente. Para este problema o indicador adotado foi o número de transições que não produz uma melhora entre a configuração visitada e a incumbente (melhor solução encontrada).

H) Redução da Vizinhança

Este aspecto é muito importante, quando se trata de utilizar técnicas metaheurísticas, já que a maioria destas utiliza um esforço computacional grande. Este trabalho enfoca esse ponto como a diferença das outras técnicas, já que reduz significativamente o número de cálculos de fluxo de potência.

Um critério rudimentar para explorar a vizinhança de uma determinada estrutura seria transitar e considerar uma ordenação implícita ou explícita de todas as configurações do espaço factível na estrutura atual $N_k(x)$. Esta estratégia de exploração poderá ser utilizada em redes de pequeno porte. Já em redes maiores este critério torna-se inviável, e cria-se a necessidade de aplicar as seguintes estratégias de exploração nas estruturas de vizinhança, de modo a reduzir o número de soluções visitadas.

Parcial: Consiste em explorar somente parte do espaço de busca, de modo a ter uma visão geral. Para isso se estabelece critérios de probabilidade, de como organizar a seleção de abertura e fechamento das chaves de interconexão e seccionamento que participaram das trocas. Para este problema, serão aquelas chaves dos ramos que têm maior probabilidade de abrir depois de fechar as chaves de interconexão.

Aleatória: Consiste em explorar as configurações do espaço factível S de cada estrutura de vizinhança $N_k(x)$ aleatoriamente. Trata-se de uma exploração muito adequada quando o espaço é uniforme. Ou seja, a distribuição de probabilidades de abrir ou fechar uma chave tem igual probabilidade.

Para a redução da vizinhança, aplicou-se uma combinação destas duas estratégias (busca parcial e aleatória) para o primeiro e segundo nível de decisão (busca e mudança de estrutura de vizinhança). Esta estratégia é conhecida como método de Monte Carlo, apresentado em Shirmohammadi (1988).

Primeiro Nível de Decisão: O algoritmo apresentado por Guerra e Romero (2006) realiza a configuração de uma rede de distribuição utilizando um índice de sensibilidade denominado PFO (Padrão de Fluxo Ótimo). Este critério de utilizar o PFO é para reduzir o espaço de busca considerando a minimização de perdas ativas. Os grupos de chaves a serem abertas dentro do laço serão ordenados ascendentemente de acordo com este PFO. Logo se fará uma ordenação aleatória de 30% das chaves que tem o menor fluxo.

Segundo Nível de Decisão: Tem-se o grupo de chaves de interconexão que serão fechadas de acordo com a estrutura de vizinhança. Estas serão ordenadas aleatoriamente cada vez que se passe para outra estrutura de vizinhança. Também consideramos a estratégia parcial e aleatória para redes de grande porte, fazendo uma ordenação, levando-se em conta 20% dos elementos dos PFO. Para os sistemas testados as soluções ótimas foram encontradas na segunda estrutura de vizinhança.

4. Implementação do Algoritmo VNS

Este método da VNS foi implementado num ambiente de programação Matlab 6.0 com um computador pessoal Pentium, 2,8 GHz, 2 GB RAM. O processo de solução do algoritmo inicia-se com uma configuração aleatória. Ou seja, definem-se os GDs (quantidade e tamanho). Aloca-se aleatoriamente. Abre-se um número de chaves de seccionamento igual ao número de GDs, de modo que o sistema opere radialmente.

Uma vez definida a configuração inicial, iniciadas todas as variáveis necessárias para o funcionamento do algoritmo, processa-se uma busca local, ou seja, devem-se gerar todos os vizinhos desta configuração dentro da sua estrutura de vizinhança $k=1$. Estes são gerados fechando chaves de interconexão e abrindo o mesmo número de chaves de seccionamento (ou interconexão) que formam os laços.

Na primeira estrutura de vizinhança fecha-se uma chave de interconexão

aleatoriamente. Constrói-se então o PFO e ordenem-se aleatoriamente os primeiros 30% dos elementos desta lista, para depois abrir cada uma das chaves da lista (PFO). Cada um destes valores é comparado com a solução atual. Se a solução atual é melhor que a solução visitada, então esta será a nova solução e a busca será reiniciada com $k = 1$. Se a configuração gerada esta fora dos limites dos valores das potencias dos GDs, então deve-se penalizar esta solução, desconsiderando-a.

A outra possibilidade acontece quando não se encontra uma melhor solução durante o fechamento de $n/3$ chaves de interconexão, ($n =$ número de chaves de interconexão). Deve-se passar à seguinte estrutura de vizinhança.

A ordem de transição das estruturas, como já foi mencionada, é sistemática $k = k + 1$. Assim, k chaves de interconexão são fechadas aleatoriamente. Previamente estabelece-se uma construção das k chaves do PFO ordenados aleatoriamente (só 20% dos primeiros elementos das listas PFO). As k chaves de seccionamento são abertas combinando os primeiros elementos das listas PFO. Caso seja encontrada uma configuração, cujo valor da função objetivo é melhor que a solução atual, reinicia-se a busca $k = 1$. Caso contrário, se o processo chegar até 30% do número total das chaves de interconexão (número de combinações) passa-se à seguinte estrutura de vizinhança. O processo continua até chegar a um $k_{max} = 3$. O algoritmo é ilustrado na Figura 3.

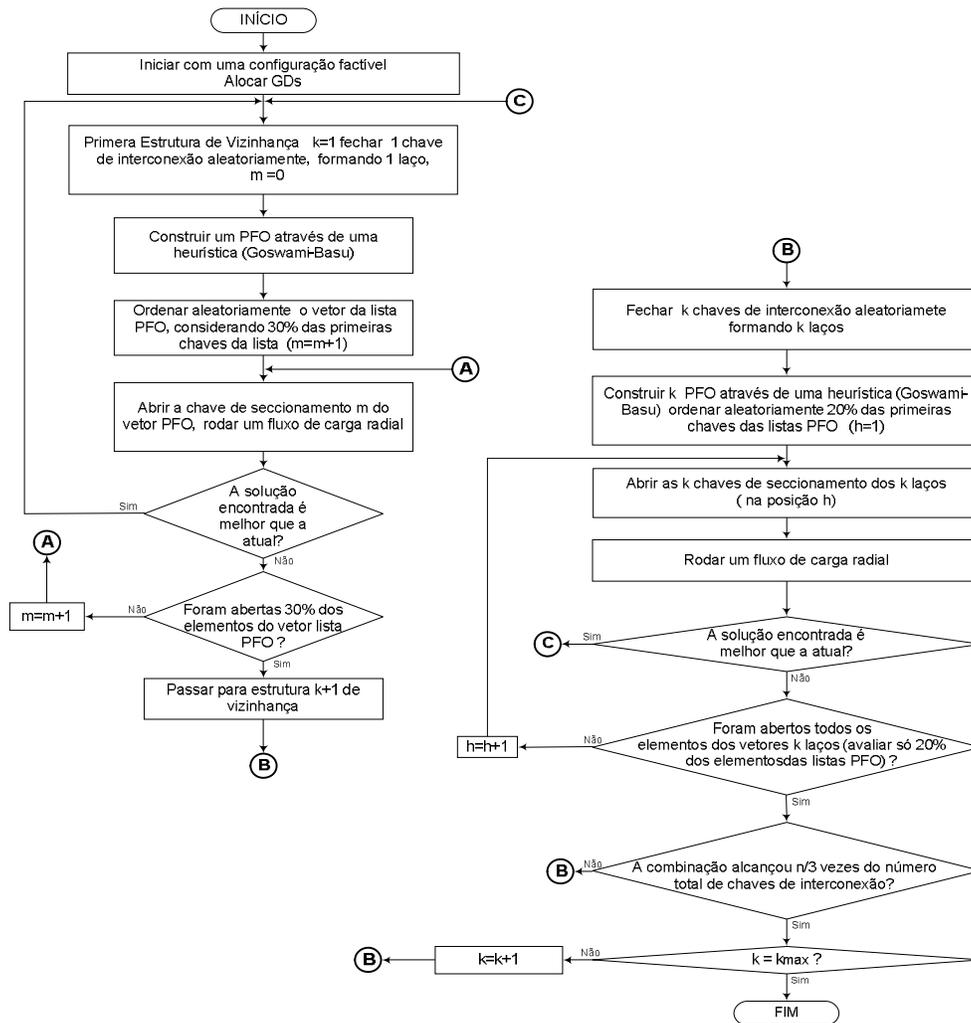


Fig. 3. Algoritmo VNS

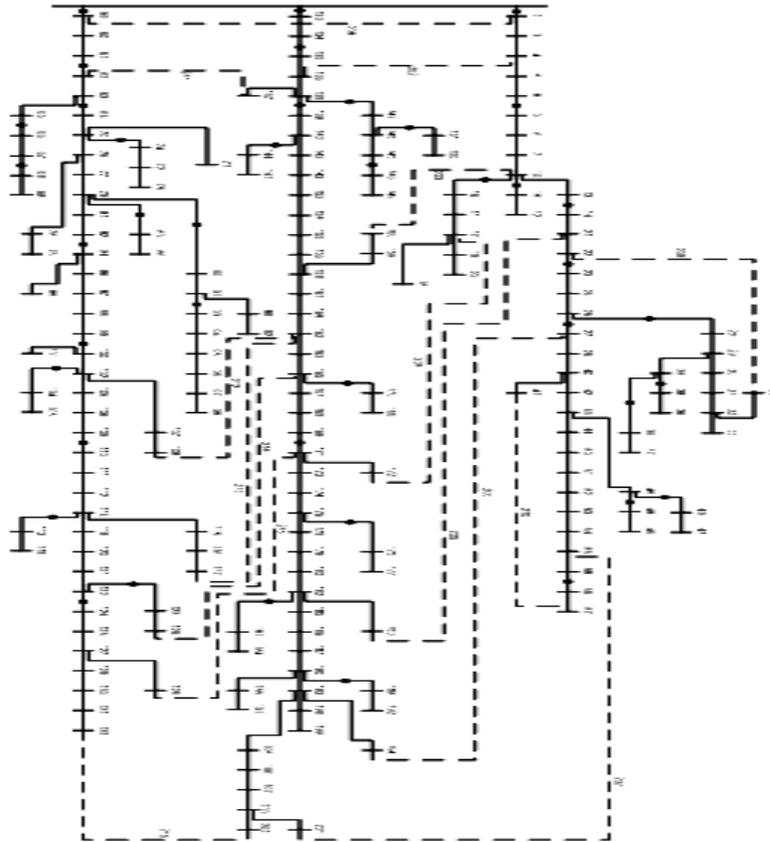


Fig. 4. Rede de 135 barras

5. Resultados

São apresentados testes experimentais com um sistema real ilustrado na Figura 4, que possui 135 barras e carga total de 18,31MW com 21 ramos de ligação normalmente abertos. Esse sistema opera com uma tensão de 13,8 kV. Considerou-se uma potência base de 100 MVA, além disso, todos os ramos têm chave de abertura/fechamento.

Os dados das barras e linhas deste sistema são encontrados em Guimarães (2005). Foram alocados 3 unidades de GDs aleatoriamente (barra 51, 110 e 132) e considerados 3 casos para simular o algoritmo:

Caso 1: Quando a potência gerada dos GDs é menor que a potência da carga conectada a mesma barra;

Caso 2: Quando o valor da potência é igual à potência da carga conectada a mesma barra.

Caso 3: Quando potência gerada dos GDs é maior que a potência da carga conectada a mesma barra, com valores iguais a 2 MW cada unidade de GDs.

Nos dois primeiros casos, a reconfiguração não sofre alteração devido à consideração de unidades de GDs. Porém, no terceiro caso, já se altera a configuração inicial. Abre-se um número de chaves de seccionamento igual ao número de unidades de GDs para que a rede opere radial.

Os resultados deste sistema são ilustrados na tabela 1. Pode ser observar que quando o peso de B é zero e A é um, consegue-se minimizar a perdas a um valor mínimo. Caso contrário, quando o peso de A é igual a zero e o de B é igual um, consegue-se minimizar a potência não fornecida pelos GDs. Encontrar um ponto de equilíbrio depende de critérios técnico-econômicos a serem considerados pelos operadores da rede. Para as simulações consideramos pesos iguais

para A e B, como ilustra a Tabela 1.

Foi considerado os valores dos pesos como valores dos custos por unidade (p.u.) da energia, assumindo-se que 1 MWhr de energia em perdas ativas custa 0,3 unidades (\$), e por outro lado 1 MWhr de energia não fornecida por um GDs custa 1 unidade (\$). Obteve-se a configuração ilustrada na tabela 1. Foi considerado que esse resultado adere-se muito bem à prática. Os valores desses pesos variam de acordo com os critérios do planejador.

TABELA 1. Resultados - Sistema de 135 barras

Conf.	Chaves abertas	Numero de GDs	Peso A (Perdas)	Peso B (Pot. GDs)	Perda (kW)	Pot. não gerada GDs (Gw)	Red. Perdas (%)	Pot. não gerada GDs (%)
Inicial	144 141 142 152 154 153 155 148 136 151 147 146 138 137 156 48 140 108 149 139 143 129 150 145	3			241,37	3,22		53,667
1	154 151 143 90 153 155 144 145 140 138 9 156 104 150 125 92 83 48 139 7 106 54 148 119	3	1	0	173,38	0,928	28,168	15,467
2	48 90 118 145 154 83 137 150 141 131 149 140 147 96 125 84 97 136 47 106 35 135 144 155	3	0	1	193,88	0,0761	19,675	1,268
3	149 138 46 136 155 94 135 147 9 154 129 106 92 140 38 48 89 54 62 118 146 145 150 144	3	0,5	0,5	184,8	0,243	23,437	4,050
4	121 38 152 151 148 118 7 150 147 91 48 9 47 140 146 145 135 49 106 149 138 144 155 154	3	0,3	1	203,45	0,486	21,871	8,100

6. Conclusões

As metaheurísticas proporcionam mecanismos adequados para sair de ótimos locais. Estes diferem muito do ótimo global. Dessa forma, este método tem impacto prático para a obtenção de melhores configurações em relação às heurísticas tradicionais.

A vantagem de utilizar várias estruturas de vizinhança reside no princípio de que um ótimo local para uma determinada estrutura de vizinhança não tem razão de ser para outra. Portanto, o processo de busca deverá continuar até se obter uma solução ótima que seja ótima local para todas as estruturas.

O método desenvolvido pela VNS com a implementação da uma heurística (GOSWAMI; BASU, 1992) para a construção do PFO, ou seja, daquelas configurações mais promissoras demonstra ser muito eficiente, porque encontrou melhores resultados.

Para este problema, foram consideradas duas funções objetivo, quais sejam minimizar as perdas ativas e minimizar a potência não gerada pelas unidades de GDs. Tais objetivos são conflitantes.

Os valores dos pesos destes dois objetivos dependem do operador, aplicando outros critérios técnicos – econômicos para operar o sistema. Tal tipo de conflito pode também ser trabalhado com outras técnicas específicas de programação matemática com múltiplos objetivos, o que não foi o escopo principal deste trabalho.

7. Referências

- ANEEL, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Módulos 3 a 8.
- Cinvanlar S. and Grainger J.J. and Lee S.S.H., Distribution feeder reconfiguration for loss reduction, IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 3, pp. 1217-1223, July. 1998.

- Dispower** – Distributed Generation with High Penetration of Renewable Energy Sources; Final Public Report / Thomas Degner, Jürgen Schmid, Philipp Strauss (Hrsg.). 1. Auflage – Kassel: ISET e.v., 5-2006.
- Falcão, D.M.** "Smart Grid e Microrredes: O Futuro já é Presente", Anais do VIII SIMPASE, Rio de Janeiro RJ, 9-14 Agosto de 2009.
- Falcão, D. M.** "Integração de Tecnologias para Viabilização da Smart Grid", Anais do III Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE), 18-21 Maio, Belém PA, 2010.
- Goswami S.K. and Basu S. K.**, A New Algorithm for the Reconfiguration of Distribution Feeders for Loss Minimization, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 3, pp. 1484-1491, July. 1992.
- Guerra W. e Romero R.**, Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando a metaheurística busca em vizinhança variável, XVI Congresso Brasileiro de Automática, Campinas, v. 1. p. 1411-1416. Agosto 2006.
- Hansen, P. and Mladenovic, N.**, An Introduction to Variable Neighborhood Search, *IEE Trans. Autom. Control*, vol. 41, pp. 358-367, March. 1996.
- Hansen P. and Mladenovic N.**, An Introduction to Variable Neighborhood Search, *Advances and Trends in Local Search Paradigms for Optimization*, Dordrech, vol. 2, pp. 433-458, June. 1999.
- Li Qiwang, Ding Wei, Zhang Jianquan and Liu Anhui**, New Reconfiguration Approach For Distribution System With Distributed Generation, *International Conference on Energy and Environment Technology*, 2009.
- Merlin A. and Back H.**, Search for a Minimum-Loss Operating Spanning Tree Configuration in an Urban Power Distribution, *Proc. 5th Power System Computation Conf.* Cambridge, U.K, pp. 1-18, 1975.
- Nascimento Guimarães M.A.**, Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica utilizando algoritmos de Busca Tabu, UNICAMP, Teses de mestrado, Abril. 2005.
- Mladenovic N.**, Variable Neighborhood Algorithm: A New Metaheuristic for Combinatorial Optimization, *Abstracts of papers presented at Optimization Days*, 1995.
- Shirmohammadi D. A. and Wayne Hong H.**, Reconfiguration of Electric Distribution Networks for Resistive Line Losses, *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 4, pp. 1492-1498, April. 1989.
- Shirmohammadi D. A.**, Compensation-Based Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution and Transmission Networks, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 3, May. 1988.
- Yasin Z. M. and Rahman T. K. A.**, Influence of Distributed Generation on Distribution Network Performance during Network Reconfiguration for Service Restoration, *First International Power and Energy Conference PECON*, November. 2006, Putrajaya, Malaysia.