

# Balanço de fases para melhorar os níveis de tensão utilizando a Metaheurística Busca em Vizinhança Variável

W. Guerra, Enerq-USP, and N. Kagan, Senior Member, IEEE

*Resumo-- Este trabalho apresenta a formulação e implementação da metaheurística “Busca em Vizinhança Variável” para o balanceamento de cargas nos sistemas de distribuição de energia elétrica, visando o melhoramento dos níveis das tensões. Este método utiliza a busca local combinada com uma busca global através da construção de estruturas de vizinhança juntamente com a mudança da conexão de fases de  $k$  - cargas. A configuração inicial das cargas foi gerada aleatoriamente, também 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 29 barras.*

**Palavras chaves-- Redes de Distribuição, Balanceamento de Fases, Busca em Vizinhança Variável.**

## I. INTRODUÇÃO

NOS sistemas de distribuição é comum encontrar cargas e configurações desbalanceadas. O desbalanço não só ocasiona aumento das perdas, mas também riscos de sobretensões e efeitos negativos sob a qualidade do serviço. Assim também, as elevadas correntes no neutro, inerentes ao desbalanço, podem ocasionar disparo nos equipamentos da proteção quanto uma limitação adicional na capacidade das linhas (pelo limite térmico do neutro). Existem várias metodologias para aumentar os níveis de tensão, entre elas destacam-se: A localização ótima de banco de condensadores, reconfiguração das redes, a troca de bitolas dos cabos e o balanço de fases. Este último consiste em encontrar a configuração ótima da conexão das cargas nas fases das redes que permita elevar os níveis de tensão.

Encontrar a configuração ótima exige analisar implícita e/ou explicitamente todas as configurações nas conexões das cargas existentes nas redes. Por ser um problema em condições desbalanceadas, sua implementação precisa de um modelamento trifásico de todos e de cada um dos componentes das redes elétricas.

Os artigos publicados ilustram métodos para resolver este problema visando a redução de perdas. Em [1], ilustra-se um algoritmo de balanço de fases que utiliza uma aproximação linear do problema. A metodologia assume modelos de carga de corrente constante e, por isso, não é necessário implementar um fluxo de carga de forma explícita. Embora

este problema requer um elevado esforço computacional em sistemas de grande porte. Na atualidade, técnicas como o método de Pontos Interiores pode ajudar a reduzir significativamente o tempo de cálculo, já que tem demonstrado ser mais eficiente que os métodos tradicionais como o Simplex. Deve-se levar em conta que estes métodos assumem um modelo aproximado e fazem uma busca numa vizinhança ao redor do ponto de operação.

Em [2], propõe-se um algoritmo de balanço de fases aplicando o método de Recozimento Simulado (Simulated Annealing). Neste método, a função objetiva é do tipo não-linear, esta considera os custos da realização de uma mudança em cada carga. Na medida em que a rede cresce, apresenta-se uma explosão combinatorial, enquadrando-se num modelo de programação não linear inteiro misto (PNLIM).

Este trabalho propõe uma aplicação da metaheurística *Busca em Vizinhança Variável*, desenvolvida em [3], demonstrando ser um método eficiente para o problema de balanço de fases das cargas numa rede elétrica.

Através de uma metodologia simples, é possível explorar o maior número de configurações do espaço factível (busca global) e intensificar naquelas regiões mais atrativas (busca local). Esta combinação de buscas se obtém através da construção de estruturas de vizinhança.

São apresentados os resultados obtidos na simulação de um sistema de 29 barras utilizando-se as características da vizinhança variável abordadas neste trabalho.

## II. FORMULAÇÃO GENÉRICA DO PROBLEMA DE BALANÇO DE FASES

O problema de desbalanço de fases nas redes de distribuição produz um aumento significativo nas quedas de tensão dos nós. Adicionalmente, produz-se circulação de correntes pelo neutro as quais não se apresentam em sistemas equilibrados.

A melhor solução é aquela que não produz correntes de seqüência zero, ou seja, aquela que gera um sistema balanceado. Embora isto não seja possível devido às características próprias das cargas (presença de cargas monofásicas, bifásicas e trifásicas).

O modelo matemático pode ser formulado como uma

W. Guerra pode ser contatado na USP - São Paulo em ENERQ (e-mail: wilingthon.guerra@poli.usp.br)

N Kagan pode ser contatado na USP-PEA, (e-mail: .nelsonk@pea.usp.br).

otimização não - linear com variáveis inteiras e reais, cuja solução envolve a seleção, dentre todas as configurações de conexão de fases possíveis, daquela que gere a menor queda de tensão dos nós do sistema e que satisfaça um conjunto de restrições. De forma geral, o problema de balanço de fases de sistemas radiais pode ser formulado como:

$$\text{Min} \rightarrow \Delta V_i = \frac{T_{nom} - T_{min}}{T_{nom}} \quad (1)$$

sa

$$P_{3\phi} = F_p(V_{3\phi}, \theta_{3\phi}) \quad (2)$$

$$Q_{3\phi} = F_p(V_{3\phi}, \theta_{3\phi}) \quad (3)$$

$$H_i \in \{1...3\} \quad (4)$$

$\Delta V$  representa a queda de tensão da barra  $i$ .  $T_{min}$  é a menor tensão encontrada na barra  $i$ .  $T_{nom}$  é a tensão nominal do sistema. As restrições (2 e 3) definem o fluxo de carga trifásico, e a quarta restrição define as configurações das cargas (monofásica, bifásica ou trifásica).

A natureza combinatória deste problema é um fator complicante, pois a troca de faseamento dos consumidores não é fácil representar, o que torna muito difícil o uso de algoritmos baseados em técnicas tradicionais de otimização para solução de (1).

### III. FORMULAÇÃO GENÉRICA DO PROBLEMA DE BALANÇO DE FASES

A *Busca em Vizinhaça Variável* (VNS) é uma metaheurística baseada num princípio simples de mudança sistemática de parâmetros dentro de  $k$  estruturas de vizinhaça. A troca de faseamento, como já foi mencionada, é de difícil representação matemática. Entretanto essa mudança de carga entre fases é tratada pela VNS, eficientemente, através de uma codificação adequada das configurações dentro do processo de busca.

De modo geral, trata-se de encontrar a configuração que gere a menor queda de tensão entre todos os nós que formam o sistema.

As soluções que se encontram mediante um dos movimentos possíveis se denominam vizinhas e constituem a vizinhaça. O conjunto de movimentos possíveis dá lugar a uma relação de vizinhaça e estrutura de vizinhaça. Para isto a VNS utiliza uma combinação de buscas locais e globais. Nestes processos, as buscas não são informadas, porque não orientam a exploração no espaço factível, além de utilizarem uma estratégia de busca parcial aleatória que é a mais eficiente.

A construção das estruturas de vizinhaça é fundamental no processo de busca, já que determina a qualidade do conjunto de movimentos aplicados, o qual enriquecerá a

vizinhaça. Com isso é possível realizar passos mais longos na aproximação ao ótimo.

Existem outras questões relevantes no êxito da busca em vizinhaça variável, além da seleção da própria estrutura de vizinhaça e como articular a busca. Questões importantes são: a avaliação da função objetivo, o procedimento de gerar a solução inicial e o critério de parada.

#### A. Codificação

Será utilizado um vetor binário para representar o “status” das fases em que as cargas estão conectadas. No processo de codificação, “0” representará as fases não conectadas e “1”, as fases conectadas.

#### B. Avaliação da Função Objetivo

Na avaliação da qualidade das configurações, utiliza-se um programa para cálculo de fluxo de potência trifásico para cada configuração. Assim, para reduzir o esforço computacional da VNS, necessita-se de um método de fluxo de potência trifásico que apresente a característica radial do sistema e que seja rápido e eficiente. Foi implementado o método apresentado em [4].

Este método é iniciado escolhendo-se um valor para os módulos de tensão nas barras. Geralmente é escolhida a mesma tensão da subestação, isto é, para cada nó  $j$ , assume-se que  $V_j = V_{ref} + j0$ , onde  $V_{ref}$  é o módulo de tensão da subestação. Com as tensões dos nós escolhidos, é possível conhecer as correntes de carga em todas as fases dos nós e as correntes em todos os ramos (para cada fase) do sistema radial. Este processo inicia-se dos nós extremos e percorre os nós em direção à subestação *backward*. Com as correntes calculadas nos ramos, é possível calcular as perdas ativas (e reativas) em cada fase do sistema.

Com as correntes em cada fase dos ramos calculadas no processo *backward* pode-se conhecer a corrente em cada fase 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 todos os nós do sistema. Este processo é realizado a partir da subestação e termina nos nós extremos *forward*. Com os novos valores de tensão dos nós consegue-se encontrar novamente as correntes de carga nas barras e as correntes em todos os ramos do sistema. Os novos valores das correntes nos ramos permitem encontrar novos valores de perdas ativas e das tensões em todos os nós do sistema. Um processo iterativo permite encontrar os valores das tensões em todos os nós.

#### C. Estruturas de Vizinhaça

No campo da otimização se define como ótimo local da função a otimizar a qualquer ponto  $x^*$  para o qual existe uma vizinhaça  $N(x^*)$  tal que  $x^*$  é ótimo nessa vizinhaça. 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. No balanço de fases, será aquela

configuração que apresente menor queda de tensão.

A partir deste conceito, pode-se definir a vizinhança de uma solução: para um problema de balanço de fases  $(S, f)$ , 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 perto a  $x$  tal que cada  $y$  será uma solução vizinha de  $x$ .

Uma solução é considerada que está mais próxima que outra, quanto menos configurações de conexão de carga são diferentes, 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 Fig. 1. A partir dessa definição, é possível obter as seguintes estruturas de vizinhança para uma solução qualquer de  $x$ .

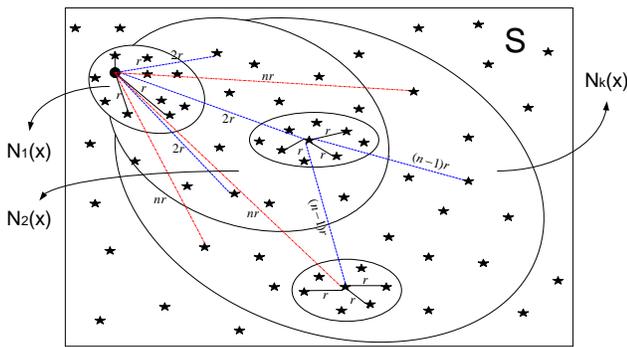


Fig. 1. Vizinhanças induzidas

$$N_k(x) = \{x' \in S : r(x, y) = k\}, k = 1, \dots, n \quad (5)$$

Onde  $y$  é uma solução vizinha de  $x$ , e  $k$  é a estrutura de vizinhança.

Numa rede de distribuição, consideramos  $n$  conexões de carga, estas serão conectadas às fases das seguintes formas:

Monofásica	a	b	c	a	b	c	a	b	c
	1	0	0	0	1	0	0	0	1
	. . .								
Bifásica	a	b	c	a	b	c	. . .		
	1	1	0	0	1	1	. . .		
	. . .								
Trifásica	a	b	c	a	b	c	. . .		
	1 <sub>a</sub>	1 <sub>b</sub>	1 <sub>c</sub>	1 <sub>b</sub>	1 <sub>c</sub>	1 <sub>a</sub>	. . .		
	. . .								

O conjunto de todas as combinações possíveis formará o espaço de soluções  $S$ , onde  $E_i$  será o estado da fase para

determinada conexão. Assume-se que  $E_i = 1$  se essa fase estiver conectada e  $E_i = 0$  se não estiver.

#### 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  $S$ . Pode-se gerar utilizando as seguintes estratégias de seleção: (i) seleção de heurísticas existentes, (ii) alteração de parâmetros dos métodos existentes, (iii) uso de k-intercâmbios, (iv) e divisão de vizinhança. A estratégia que utilizamos foi através de k-intercâmbios, como ilustra a Fig. 2, que é a maneira mais fácil e natural de gerar as estruturas de vizinhança. Mudando  $k$  fases de conexão e mantendo a restrição dos tipos de carga. Este mecanismo funciona de forma eficiente, porque apresentou os melhores resultados com mínimas quedas de tensão.

Com esta estratégia de geração de vizinhança, alguns problemas foram resolvidos como para TSP em [5] e  $\rho$  - mediana em [6].

#### 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 trocamos o maior número de conexões nas fases ao mesmo tempo, incrementará-se a distância  $r$ , este vai aumentar e logo estaremos mais distante da solução atual. Também se cumpre que as estruturas vão desde aquelas que têm menos soluções vizinhas factíveis até aquelas que contêm maior número delas, 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. Além de que, este algoritmo tenha capacidade de explorar grande quantidade de zonas (diversificação), evitando que a busca se concentre numa determinada região do espaço de busca. Para isto, tem que se considerar que a escolha seja realizada através de duas estratégias diferentes: (i) a busca Greedy ou a busca do melhor vizinho. Realiza-se uma busca exaustiva transitando por todas as configurações das cargas 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, se caracteriza por transitar em todas as configurações das cargas da vizinhança até que se encontre a primeira configuração vizinha de melhor qualidade que a solução atual.

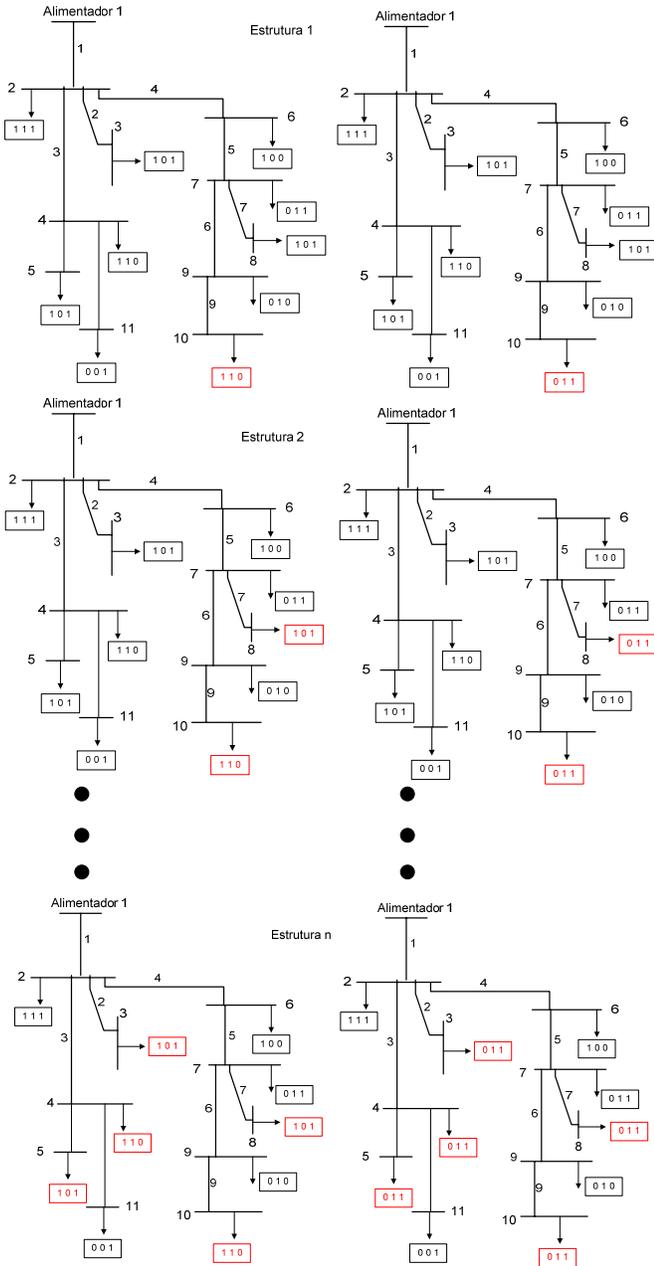


Fig. 2. Geração de estruturas de vizinhança através de  $k$ -intercâmbios

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  $k=1$  (*forward*), e quando não se pode melhorar em  $N_k(x)$ , fazer  $k=k+1$ . Reiniciar  $k=1$  caso encontrar uma melhor solução. Esta estratégia levou aos melhores resultados.

### G. Critério de Parada

O critério de parada é determinado quando se considera o problema convergido, para isso, deve-se levar em conta os indicadores de qualidade como são: (i) limite de número de iterações ou trocas, (ii) esforço computacional total, (iii) e tempo computacional sem produzir uma melhora da incumbente. Para este problema o indicador adequado foi o número de transições que não produz uma melhora entre a configuração visitada e a incumbente (melhor solução encontrada), isto se reflete no esforço computacional.

### H. Redução da Vizinhança

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 nessa estrutura  $N_k(x)$ . Evitando as repetições para impedir que o processo de busca não se torne indefinidamente cíclico. Esta estratégia de exploração poderá ser utilizada para redes de pequeno porte. Quando a rede vai crescendo este critério torna-se inviável.

Entretanto, é necessário aplicar estratégias de exploração nas estruturas de vizinhança. Pode-se fazer a exploração aplicando duas estratégias de exploração:

**Parcial:** Consiste em explorar somente parte do espaço de busca, a fim de que se tenha uma visão de todo o espaço. Para isso se estabelece critérios de probabilidade e de como organizar a mudança de conexão entre as fases de  $k$  cargas. O balanço de carga se dará naquelas cargas que têm maior probabilidade de diminuir a queda de tensão mudando a conexão das fases.

**Aleatória:** Consiste em explorar as configurações do espaço factível  $S$  de cada estrutura de vizinhança  $N_k(x)$  aleatoriamente. Trata-se de uma exploração quando o espaço é uniforme, ou seja, a distribuição de probabilidades de conectar a uma fase ou a outra tem igual probabilidade. Além desta estratégia, pode-se intensificar a busca naquelas regiões promissoras.

Para a redução da vizinhança, aplicou-se uma combinação de 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 [6].

**Primeiro Nível de Decisão:** Se fará uma ordenação começando do nó selecionado onde se produz uma maior queda de tensão numa das fases no sentido do nó de referência (nó com maior modulo de tensão). As cargas que estão conectadas mais distantes deste nó (referencia), na fase onde se tem que mudar a carga, tem maior probabilidade de participar da mudança. Se fará uma ordenação nesse sentido e participarão na troca, aleatoriamente, 40% das primeiras cargas da lista ordenada aleatoriamente.

**Segundo Nível de Decisão:** Tem-se o grupo de cargas que

participarão das trocas de acordo com a estrutura de vizinhança, estas também serão ordenadas aleatoriamente cada vez que passam para outra estrutura de vizinhança. Igualmente consideramos a estratégia parcial e aleatória para redes de grande porte, fazendo uma ordenação e levando em conta 20% dos elementos das listas ordenadas aleatoriamente. Para os sistemas testados, as soluções ótimas foram encontradas na segunda estrutura de vizinhança.

#### IV. IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO VNS

Este método da VNS foi implementado num ambiente de programação Matlab 6.0 com um computador pessoal Pentium 4, 1,8 GHz, 256 MB RAM. O processo de solução do algoritmo inicia-se com uma configuração aleatória.

Uma vez definida a configuração inicial e iniciadas todas as variáveis necessárias para o funcionamento do algoritmo, processa-se um fluxo de carga trifásico para avaliar a função objetiva e gerar todos os vizinhos desta configuração dentro da sua estrutura de vizinhança. Estas serão todas as cargas que estão conectadas na fase onde se produz a máxima queda de tensão. A carga onde se produz a máxima queda de tensão será determinada aleatoriamente considerando 20% de todas as cargas que produzem maiores quedas de tensão.

Na primeira estrutura de vizinhança, troca-se ou muda-se a primeira carga da lista de cargas vizinhas (só considera-se 40% do número de cargas candidatas). Cada um destes valores obtidos ao avaliar a função objetiva é comparado com a solução atual. Se for melhor a configuração visitada, então esta será a nova solução atual, e a busca será reiniciada  $k = 1$ .

A outra possibilidade acontece quando não se encontra uma solução melhor durante a avaliação das  $n/3$  cargas com maior queda de tensão, onde  $n$  é o número de cargas conectadas aos nós finais. Então se passará a seguinte estrutura de vizinhança.

A ordem de transição das estruturas, como já foi mencionada, será sistematicamente  $k = k + 1$ . Assim, se considerará  $k$  cargas aleatórias (que estão conectadas aos nós finais) que participaram das trocas ou mudanças de conexão de fases. Se caso encontrar uma melhora no processo de busca, volta-se à primeira estrutura de vizinhança  $k = 1$  e reinicia-se o processo de busca. Caso contrário, se o processo chega até 30% do número total de cargas com maior queda de tensão (número de combinações) passa-se a seguinte estrutura de vizinhança. O processo continua até chegar um  $k_{\max} = 3$ . O algoritmo é mostrado na Fig. 3.

São apresentados os testes experimentais num sistema de 29 nós. Os dados das barras e linhas são mostrados em [7]. A tabela I mostra os dados deste sistema.

A tabela II ilustra a melhor configuração encontrada, Com

$V_{\min} = 115.244$  como tensão mínima de 115,23 V.

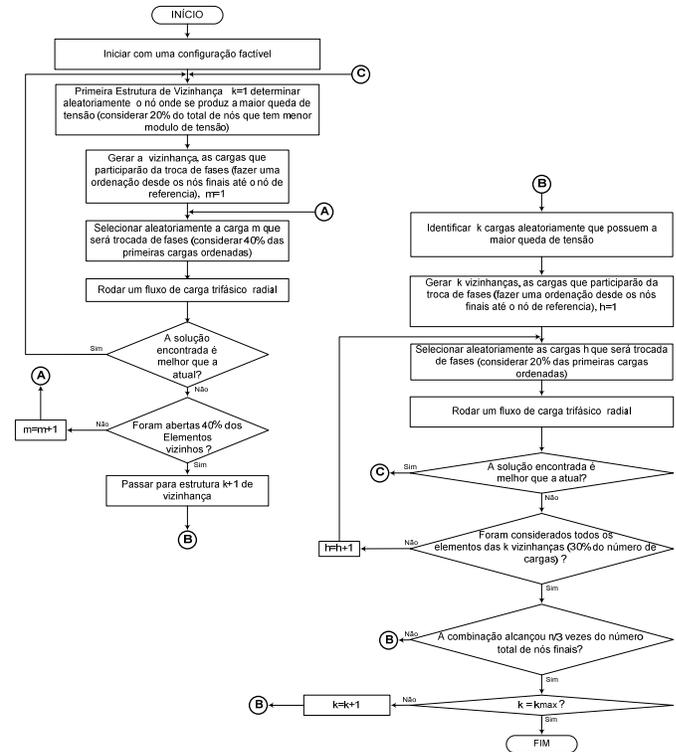


Fig. 3. Algoritmo VNS

TABELA I  
DADOS DO SISTEMA DE 29 NÓS

Nro.	PLA(p.u)	QLA(p.u)	PLB(p.u)	QLB(p.u)	PLC(p.u)	QLC(p.u)
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.4514	0.1484	0.2097	0.0689	0.000	0.000
4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	0.0000	0.0000	0.0181	0.0059	0.3292	0.1082
7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8	0.6417	0.2109	0.3979	0.1308	0.5049	0.1660
9	0.1882	0.0610	0.2688	0.0884	0.000	0.000
10	0.1660	0.0546	0.0972	0.0319	0.3493	0.1146
11	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
12	0.2625	0.0563	0.1424	0.0466	0.1201	0.0395
13	0.3264	0.1073	0.441	0.1449	0.3313	0.1089
14	0.1472	0.0484	0.3104	0.1020	0.1271	0.0418
15	0.3771	0.1239	0.3486	0.1146	0.4035	0.1326
16	10.440	0.3433	11.854	0.3896	10.201	0.3353
17	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
18	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
19	0.3306	0.1087	0.5825	0.1849	0.7542	0.2479
20	0.0000	0.0000	0.2368	0.0778	0.2160	0.0710
21	0.3111	0.1023	0.5444	0.1789	0.2347	0.0771
22	0.2944	0.0968	0.0597	0.0196	0.000	0.000
23	0.1125	0.0370	0.1125	0.0370	0.000	0.000
24	0.1139	0.0377	0.000	0.000	0.000	0.000
25	0.0000	0.0000	0.1708	0.0561	0.1708	0.0561
26	0.5708	0.1876	0.2736	0.0899	0.000	0.000

27	0.5076	0.1668	0.2910	0.0956	0.3431	0.1128
28	0.1444	0.0475	0.3667	0.1205	0.5694	0.1872
29	0.1161	0.0388	0.1181	0.0388	0.000	0.000

TABELA II  
DESEMPENHO DO ALGORITMO VNS

Nro. Barra	Fase A		Fase B		Fase C	
	T-antiga (volt)	T-nova (volt)	T-antiga (volt)	T-nova (volt)	T-antiga (volt)	T-nova (volt)
1	121,244	121,244	121,244	121,244	121,244	121,244
2	118,593	118,593	118,440	118,440	118,685	118,779
3	118,039	117,748	118,041	117,842	118,214	118,213
4	115,961	115,960	115,653	115,652	116,167	116,355
5	115,244	114,667	115,056	114,662	115,856	116,045
6	115,721	115,721	115,489	115,489	115,584	115,757
7	115,961	115,960	115,653	115,652	115,199	115,198
8	113,585	113,584	113,044	113,043	115,199	115,198
9	114,580	113,730	113,792	113,320	115,021	115,178
10	115,081	114,503	114,952	114,556	114,552	114,851
11	113,292	112,703	113,455	112,942	114,796	114,795
12	115,497	115,496	115,353	115,352	114,586	114,727
13	111,827	111,826	110,851	110,850	114,586	114,712
14	114,094	112,974	112,774	112,227	114,680	114,679
15	111,348	110,747	111,860	111,230	114,389	114,530
16	110,408	110,406	109,093	109,091	114,348	114,489
17	113,759	112,371	112,044	111,424	112,943	113,353
18	109,784	109,172	110,616	109,871	112,602	112,601
19	110,043	110,042	108,515	108,514	111,724	112,244
20	113,738	112,349	111,826	111,204	111,719	112,239
21	113,447	112,055	111,533	110,910	111,678	112,198
22	113,759	112,106	112,044	111,355	111,642	112,161
23	109,136	108,521	110,228	109,481	110,560	111,189
24	109,680	109,068	110,609	109,865	110,506	110,504
25	108,975	108,358	109,769	108,913	109,557	110,296
26	108,597	107,979	109,948	109,199	108,902	109,748
27	108,184	107,562	109,086	108,119	108,789	109,738
28	107,893	107,268	108,710	107,634	108,745	108,744
29	107,780	107,153	108,699	107,518	108,014	108,012

## V. CONCLUSÕES

As metaheurísticas proporcionam mecanismos adequados para sair dos ótimos locais. Estes diferem muito dos ótimos globais, e, dessa forma, têm impacto prático das melhorias dos resultados obtidos com as metaheurísticas em relação às heurísticas tradicionais. Pode-se observar isto através dos resultados neste trabalho.

A vantagem de utilizar várias estruturas de vizinhança, baseia-se no princípio que um ótimo local para uma determinada estrutura de vizinhança não tem porque ser para outra. Portanto, o processo de busca deverá continuar até obter

uma solução ótima que seja ótima local para todas as estruturas.

A análise foi baseada num processo de busca do primeiro melhor para a implementação da VNS. Combinando com uma busca parcial aleatória dentro do processo de otimização. As estratégias empregadas podem variar de acordo com o ponto de vista do investigador, já que como na implementação de qualquer metaheurística aplicam-se mais a intuição do que a dedução.

O método desenvolvido pela VNS demonstrou ser eficiente, já que chegou a encontrar configurações de alta qualidade.

## VI. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES pelo financiamento do projeto de pesquisa, que originou os resultados apresentados neste artigo.

## VII. REFERÊNCIAS

- [1] Z. Jinxiang, G. Bilbao and C. Mo-Yuen, "Phase balancing using Mixed-Integer programming," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 13, pp. 1487-1492, Nov. 1998.
- [2] E. H. Miller, "Phase balancing using Simulated Annealing," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 14, pp. 1508-1513, Nov. 1999.
- [3] N. Mladenovic, "Variable Neighborhood Algorithm: A New Metaheuristic for Combinatorial Optimization," *Abstracts of papers presented at Optimization Days*, 1995.
- [4] C. S. Cheng and D. Shlrmoammadi, "A Three-phase Power Flow Method for real-time Distribution System Analysis," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 10, pp. 671-679, May. 1995.
- [5] P. Hansen and N. Mladenovic, "An Introduction to Variable Neighborhood Search," *IEE Trans. Autom. Control*, vol. 41, pp. 358-367, March. 1996.
- [6] B. Melián and J. A. Moreno and J. M. Moreno, "Metaheuristics: A global view," *Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*, vol. 1, pp. 007-028, March. 2003.
- [7] R. M. Ciric and Antonio Padilha and Luis F. Ochoa, "Power Flow in Four-Wire Distribution Networks--- General Approach," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 18, pp. 1283-1290, Nov. 2003.