

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA JÚLIO DE MESQUITA FILHO - UNESP

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de
Energia Elétrica Utilizando a Metaheurística Busca
em Vizinhança Variável**

Wilingthon Guerra Zvietcovich

Prof. Dr. Rubén Augusto Romero Lázaro
Orientador

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO” - UNESP, CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA, para preenchimento dos pré-requisitos parciais para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

25 de Agosto de 2006

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando a Metaheurística Busca em Vizinhança Variável

Autor: WILINGTHON GUERRA ZVIETCOVICH

Orientador: Prof. Dr. RUBEN AUGUSTO ROMERO LÁZARO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em ENGENHARIA ELÉTRICA pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. RUBEN AUGUSTO ROMERO LÁZARO

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

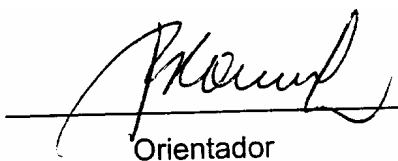
Prof. Dr. JOSE ROBERTO SANCHES MANTOVANI

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Dr. LUIZ CARLOS PEREIRA DA SILVA

Departamento de Sistemas de Energia Elétrica / Universidade Estadual de Campinas

Data da realização: 25 de Agosto de 2006.



Orientador

*Dedico esta dissertação à minha família,
por todo apoio, compreensão, amor e
carinho que sempre me concederam.*

Agradecimentos

Dedico meus sinceros agradecimentos:

- Á Deus, por conceder-me saúde e inteligência;
- Ao professor doutor Rubén Romero, por dar-me a oportunidade de alcançar uma das minhas metas profissionais, também pela orientação, apoio e amizade;
- Aos professores doutores Antonio Padilha, José Mantovani e Sérgio Azevedo, pelas sugestões e atenção que me deram;
- Às funcionárias da seção de pós-graduação, pelo bom atendimento;
- Aos meus amigos da Pós-graduação, com quem muito aprendi e fiz grande amizade;
- Á FEPISA, pelo apoio financeiro;

*“Todo grito de dor, tem por eco
uma alegria”*

Anônimo.

Sumário

Resumo	p. 8
Abstract	p. 9
Lista de Figuras	p. 10
Lista de Tabelas	p. 12
Introdução	p. 14
1 Cálculo de Fluxo de Carga para Redes de Distribuição Radiais	p. 17
1.1 Introdução	p. 17
1.2 Método de Varredura	p. 18
1.2.1 Processo de <i>Backward</i>	p. 18
1.2.2 Processo de <i>Forward</i>	p. 19
1.3 Método de Soma de Potências	p. 21
1.3.1 Processo de <i>Backward</i>	p. 22
1.3.2 Processo de <i>Forward</i>	p. 23
2 Reconfiguração de Sistemas de Distribuição Radiais	p. 25
2.1 Introdução	p. 25
2.2 Algoritmo Heurístico de Cinvanlar (CINVANLAR; GRAINGER; LEE, 1988)	p. 28
2.2.1 Características Desejáveis do Método de Solução	p. 29
2.2.2 Cálculo de Variação de Perdas	p. 30
2.2.3 Comentários	p. 32

2.3	Algoritmo Heurístico de Shirmohammadi (SHIRMOHAMMADI; HONG, 1989)	p. 32
2.3.1	Procedimento para a Determinação do Padrão de Fluxo Ótimo em uma Rede Malhada	p. 32
2.3.2	Comentários	p. 33
2.4	Algoritmo Heurístico de Goswami - Basu (GOSWAMI; BASU, 1992) . . .	p. 34
2.4.1	Seleção da Chave Aberta que será Fechada	p. 34
2.4.2	Determinação do Padrão de Fluxo Ótimo	p. 35
2.4.3	Comentários	p. 37
3	Busca em Vizinhaça Variável	p. 38
3.1	Conceitos Básicos	p. 38
3.1.1	Metaheurística de Busca	p. 39
3.1.2	Buscas Locais e Globais	p. 39
3.2	Escolha da Configuração Inicial	p. 41
3.3	Representação e Codificação do Problema	p. 41
3.4	Estruturas de Vizinhaças	p. 43
3.4.1	Geração das Estruturas de Vizinhaças	p. 44
3.4.2	Geração de Estruturas de Vizinhaças Através de k-intercâmbios	p. 45
3.4.3	Ordenação das Estruturas de Vizinhaça	p. 47
3.5	Estratégia de Busca e Mudança de Vizinhaça	p. 47
3.6	Critério de Parada	p. 49
3.7	Redução da Vizinhaça	p. 51
3.7.1	Estratégias de Exploração	p. 51
3.7.2	Estratégia Utilizada	p. 51
3.8	Implementação dos Algoritmos VNS e VND	p. 53
3.8.1	Descrição do Algoritmo Implementado para Minimização de Perdas	p. 55

4 Resultados Obtidos	p. 61
4.1 Sistema de 14 barras	p. 61
4.2 Sistema de 32 barras	p. 62
4.3 Sistema de 69 barras	p. 63
4.4 Sistema de 135 barras	p. 64
4.5 Sistema de 202 barras	p. 66
4.5.1 Com limitação de chaveamento	p. 66
4.5.2 Sem limitação de chaveamento	p. 67
4.6 Conclusões	p. 68
5 Conclusões	p. 70
Referências	p. 72
Apêndice A – Dados dos Sistemas Testados	p. 75
A.1 Sistema de 14 barras	p. 75
A.2 Sistema de 32 barras	p. 76
A.3 Sistema de 69 barras	p. 77
A.4 Sistema de 135 barras	p. 80
A.5 Sistema de 202 barras	p. 86

Resumo

A reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica consiste em alterar a topologia das redes através da abertura/fechamento das chaves de interconexão. Normalmente este procedimento é feito para fins de isolamento de faltas, minimização de perdas ativas, balanceamento de cargas entre alimentadores ou para melhoria dos níveis de tensão. Atingir estes objetivos é difícil, devido ao grande número de variáveis envolvidas e das restrições impostas, sendo a radialidade uma restrição de difícil representação matemática. Este problema pode ser classificado dentro dos problemas de programação não linear inteiro misto (PNLIM) e apresenta o fenômeno da explosão combinatória. Neste trabalho tem-se como principal objetivo o desenvolvimento de uma metaheurística chamada Busca em Vizinhança Variável para a reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica com respostas no planejamento da operação em função da racionalidade da carga. Verificamos que este método mostrou ser eficiente, pois através de uma metodologia simples, obteve-se resultados melhores em relação aos apresentados na literatura.

Palavras chaves: Redes de Distribuição, Otimização de Perdas, Busca em Vizinhança Variável.

Abstract

The network reconfiguration of electric power distribution consists of changing the topology of networks through the opening/closing of interconnection switches. This procedure is usually done to isolate fault, reduction real power losses, balance the load among feeders or for improvement of tension levels. To reach these objectives is difficult, due to the great number of involved variables and the imposed constraints, being the constraint of radial structure of difficult mathematical representation. This problem can be classified as nonlinear mixed integer programming problems and it presents the phenomenon of combinatorial explosion. The main objective of this work is to develop a metaheuristic called Variable Neighbourhood Search for network reconfiguration of electric power distribution for operation planning based on rationality of load. This method showed to be efficient using a simple methodology, getting better results in relation to the presented in Literature.

keywords: Distribution Networks, Optimization of lost, Variable Neighbourhood Search.

Lista de Figuras

1	Sistema de distribuição hipotético.	p. 14
2	Métodos propostos para resolver o problema de reconfiguração de redes elétricas.	p. 15
3	Cálculo de corrente de carga.	p. 19
4	Sistema de 4 barras	p. 19
5	Cálculo de tensão na barra.	p. 20
6	Diagrama de blocos do algoritmo fluxo de carga radial varredura. . . .	p. 21
7	Sistema de duas barras.	p. 22
8	Diagrama de blocos do algoritmo de fluxo de carga radial Soma de Potência. .	p. 24
9	Sistema de três alimentadores.	p. 29
10	Diagrama de blocos do algoritmo proposto por (CINVANLAR; GRAINGER; LEE, 1988).	p. 31
11	Diagrama de blocos do algoritmo proposto por Shirmohammadi (SHIRMOHAMMADI; HONG, 1989).	p. 33
12	Laço formado ao se fechar uma chave normalmente aberta	p. 35
13	Laço formado para determinar o PFO.	p. 36
14	Diagrama de blocos do algoritmo proposto por (GOSWAMI; BASU, 1992). .	p. 37
15	Diagrama de blocos do algoritmo busca local.	p. 40
16	Busca local com arranques múltiplos.	p. 41
17	Sistema de 14 barras	p. 42
18	Vizinhanças induzidas.	p. 44
19	Geração de estruturas de vizinhança através de k-intercâmbios.	p. 46

20	Diagrama de blocos utilizando a busca EII em todas as estruturas de vizinhança (VNS).	p. 49
21	Diagrama de blocos utilizando a busca EII para a primeira estrutura de vizinhança e busca EI nas outras estruturas de vizinhança.	p. 50
22	Diagrama de blocos - algoritmo utilizando estratégia Parcial - Aleatória - PFO no processo de busca (VNS).	p. 53
23	Diagrama de blocos - algoritmo utilizando estratégia Parcial - Aleatória - PFO no processo de busca (VND).	p. 54
24	Diagrama de blocos do algoritmo VNS.	p. 59
25	Diagrama de blocos do algoritmo VND.	p. 60
26	Sistema de 14 barras.	p. 62
27	Sistema de 32 barras	p. 63
28	Sistema de 69 barras.	p. 64
29	Sistema de 135 barras.	p. 65
30	Sistema de 202 barras.	p. 66

Lista de Tabelas

1	Resultados obtidos: algoritmo de Cinvanlar (CINVANLAR; GRAINGER; LEE, 1988).	p. 31
2	Resultados obtidos: algoritmo de Shirmohammadi (SHIRMOHAMMADI; HONG, 1989).	p. 33
3	Resultados obtidos: algoritmo Goswami e Basu (GOSWAMI; BASU, 1992).	p. 37
4	Parâmetros do algoritmo para a rede de 135 barras utilizando uma configuração inicial de operação.	p. 56
5	Resultados obtidos sistema de 135 barras usando uma configuração inicial de operação.	p. 56
6	Parâmetros do algoritmo para a rede de 135 barras usando o algoritmo de Goswami e Basu.	p. 56
7	Resultados obtidos sistema de 135 barras usando uma configuração inicial obtida pelo algoritmo de Goswami e Basu.	p. 56
8	Resultados obtidos sistema de 14 barras.	p. 62
9	Resultados obtidos sistema de 32 barras.	p. 63
10	Resultados obtidos sistema de 69 barras.	p. 64
11	Resultados obtidos sistema de 135 barras.	p. 65
12	Resultados obtidos sistema de 202 barras - com limitação de chaveamento	p. 67
13	Resultados obtidos sistema de 202 barras - sem limitação de chaveamento.	p. 68
14	Parâmetros do algoritmo VNS.	p. 69
15	Parâmetros do algoritmo VND.	p. 69
16	Dados sistema de 14 barras.	p. 75
17	Dados sistema de 32 barras.	p. 76

18	Dados sistema de 69 barras.	p. 77
19	Dados sistema de 135 barras.	p. 80
20	Dados sistema de 202 barras.	p. 86

Introdução

O mercado de energia atualmente competitivo sob os aspectos técnico-econômicos exige que as empresas concessionárias de energia elétrica desenvolvam esforços no sentido de melhorar as condições de operação de suas redes. Uma das técnicas para otimizar a operação das redes de distribuição é através de sua reconfiguração. As redes de distribuição possuem um conjunto de dispositivos de controle e proteção que permitem alterar facilmente a sua configuração, através de manobras destes dispositivos, viabilizando ações que permitam operar o sistema sempre da maneira mais adequada, isto é, com redução nas perdas activas e melhoria nos níveis de tensão mantendo a condição de radialidade do sistema. Esta condição faz com que alguns ramais estejam operando e outros não.

Este é um problema conhecido como reconfiguração ótima para planejamento da operação de um sistema de distribuição. Encontrar a topologia ótima exige analisar implícita e/ou explicitamente todas as topologias radiais existentes na rede.

A modelagem matemática do problema de reconfiguração é um problema de programação não linear inteiro misto (PNLIM), representando uma explosão combinatória do número de topologias possíveis, sendo que a exigência de radialidade é um fator adicional que complica a resolução do problema. A Figura 1 mostra uma rede pequena muito usada pelos especialistas em reconfiguração.

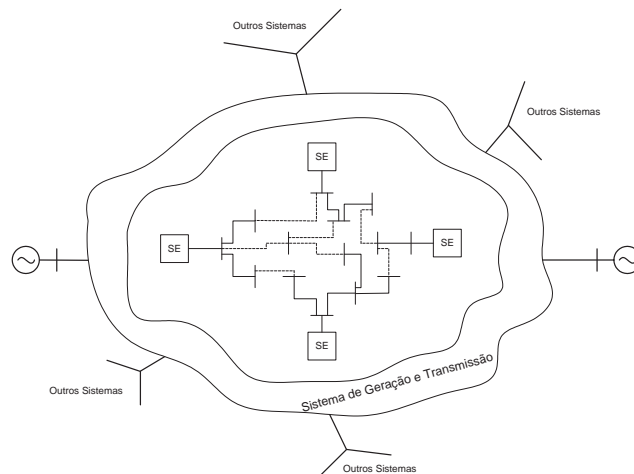


Figura 1: Sistema de distribuição hipotético.

Os principais métodos apresentados na literatura para resolver o problema da reconfiguração podem ser classificados como mostra a Figura 2.

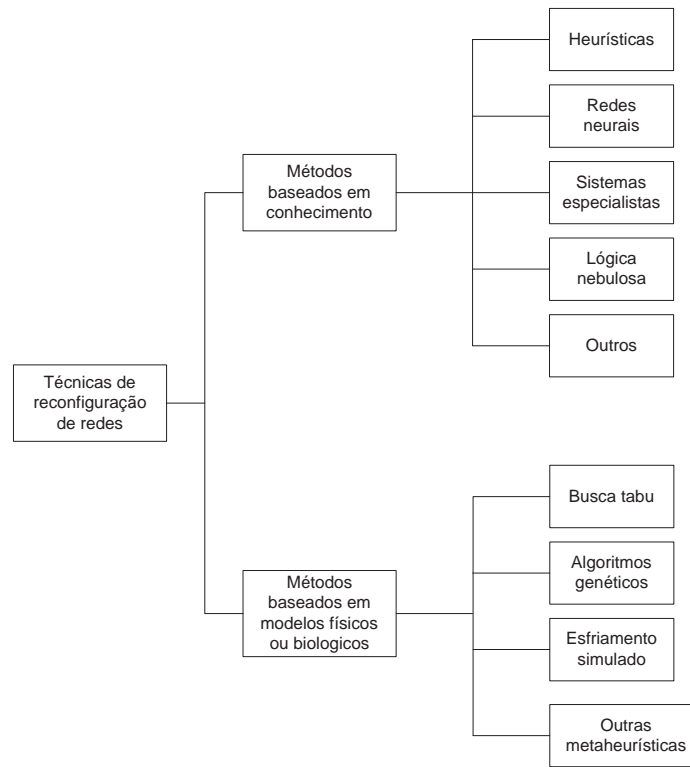


Figura 2: Métodos propostos para resolver o problema de reconfiguração de redes elétricas.

Numa primeira categoria estão os métodos baseados em conhecimento, que se fundamentam na experiência dos operadores sobre as manobras dos sistemas. Com base neste conhecimento desenvolveram-se muitos algoritmos que facilitam a busca das novas configurações da rede de distribuição, tentando obter uma solução perto da ótima. Dentro desta categoria encontram-se as heurísticas, tais como as propostas por (CINVANLAR; GRAINGER; LEE, 1988; GOSWAMI; BASU, 1992; BARAN; WU, 1989a; SHIRMOHAMMADI; HONG, 1989), que encontram boas topologias, especialmente para sistemas de grande porte, utilizando esforços computacionais pequenos.

Recentemente técnicas como os Sistemas Especialistas, Lógica Nebulosa e Redes Neurais apresentados por (LIU; LEE; VENKATA, 1988; BOUCHARD et al., 1993; KIM; KO; JUNG, 1993) respectivamente, foram também aplicadas para solucionar o problema de reconfiguração de redes. Estas técnicas foram implementadas com regras heurísticas para solucionar os problemas com menor esforço computacional.

A segunda categoria corresponde aos métodos baseados em modelos físicos ou biológicos que existem na natureza, os quais não têm uma formulação matemática rigorosa que

permita estabelecer com certeza seu comportamento em cada situação. Como exemplo destas técnicas temos “Simulated Annealing” por (NARA; KITAGAWA, 1991), Algoritmos Genéticos por (LIN; CHENG; TSAY, 2000), Genético Modificado por (ROMERO, 2001), Busca Tabu por (DUARTE, 1999; GUIMARÃES, 2005), etc. Essas técnicas estão sendo muito usadas para resolver problemas complexos em áreas muito variadas, assim como para resolver o problema da reconfiguração. Esses métodos encontram soluções ótimas ou quase ótimas de sistemas de grande porte, mas geralmente com esforços computacionais elevados.

Neste trabalho de pesquisa propõe-se verificar a viabilidade em resolver o problema de reconfiguração da rede, objetivando a minimização das perdas de potência ativa, através da técnica de “Busca em Vizinhança Variável”. Que é um procedimento metaheurístico, classificado na Figura 2 dentre outras metaheurísticas.

A Busca em Vizinhança Variável (VNS) foi proposta por N. Mladenovic em 1995 (MLADENOVIC, 1995), e está demonstrando ser uma técnica muito eficiente e de fácil aplicação em muitos problemas da vida real.

A dissertação está organizada em 5 capítulos descritos a seguir:

No capítulo 1, são apresentados estudos sobre alguns métodos de fluxo de carga para redes radiais, utilizados como ferramentas de análise na reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica.

No capítulo 2, é realizada a revisão bibliográfica sobre algoritmos para reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica.

No capítulo 3, são apresentados os conceitos básicos do algoritmo Busca em Vizinhança Variável e sua aplicação na reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica.

No capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos com a implementação do algoritmo de reconfiguração para minimização das perdas de potência ativa.

No capítulo 5, são apresentadas as conclusões concernentes à aplicação dos algoritmos propostos.

No apêndice A é apresentado os dados completos dos sistemas analisados.

1 Cálculo de Fluxo de Carga para Redes de Distribuição Radiais

1.1 Introdução

O algoritmo de fluxo de carga resolve um problema de equações não lineares para encontrar o estado de operação de uma rede (módulos e ângulos de tensão nodal). Uma vez obtido o estado da rede é calculado o fluxo de potência, correntes nos ramos, etc.

Na literatura especializada existem vários algoritmos tais como os algoritmos de Gauss, Gauss-Seidel, Newton e as versões desacopladas desses algoritmos. O método de Newton (MONTICELLI, 1983) apresenta um desempenho superior comparado com outros métodos (ELGERD, 1978). Este algoritmo é muito usado na análise de sistemas de energia elétrica, mas os sistemas de distribuição apresentam características muito específicas: (i) Operam em forma radial e, (ii) apresentam uma relação de R/X elevada, comparados com os valores típicos encontrados em sistemas de sub-transmissão e transmissão. A primeira característica é uma vantagem porque simplifica consideravelmente a complexidade do problema, entretanto a segunda característica é uma desvantagem porque produz divergência quando usamos o método de Newton.

Dentro da resolução da metaheurística Busca em Vizinhança Variável (VNS) para o problema de reconfiguração é necessário avaliar a função objetivo (calcular as perdas totais da rede para cada configuração) com o processamento de centenas de problemas de fluxo de carga. Por isto é preciso utilizar um método de fluxo de potência rápido e eficiente.

Foram desenvolvidos e apresentados muitos algoritmos especializados para resolver o problema de fluxo de carga de sistemas de distribuição radial (SHIRMOHAMMADI, 1988; BARAN; WU, 1989b; CÉSPEDES, 1990; GOSWAMI; BASU, 1992). Todos estes algoritmos apresentam a vantagem adicional de que são muito mais rápidos que as versões desacopladas de Newton.

Pela necessidade de avaliar a função objetivo dentro do processo de solução da reconfiguração de redes, e as vantagens mencionadas dos algoritmos especializados em sistemas de distribuição, são analisados neste capítulo dois algoritmos de fluxo de carga radial: Método de varredura (BRANDINI, 2000), que apresenta características muito parecidas com o algoritmo apresentado por (SHIRMOHAMMADI, 1988) e o método de soma de potências, desenvolvido por (CÉSPEDES, 1990).

1.2 Método de Varredura

Este algoritmo é conhecido como método de Varredura porque apresenta um processo iterativo das barras finais em direção à subestação e vice-versa (BRANDINI, 2000). O processo consiste previamente em escolher um valor para os módulos de tensão nas barras, este valor é tipicamente 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 e $j0$ é a parte imaginária de V_k . Com as tensões nas barras escolhidas é possível conhecer a corrente de carga em todas as barras e as correntes em todos os ramos do sistema radial. Este processo é implementado, iniciando 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. Assim, é encontrado um valor aproximado das perdas no 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 e geralmente é chamado de *forward*. Com os novos valores de tensão das barras é possível encontrar, novamente, as correntes de carga nas barras e as correntes em todos os ramos do sistema. Os novos valores de correntes dos ramos permitem encontrar novos valores de perdas ativas (e reativas) do sistema. Um processo repetitivo permite encontrar as perdas do sistema.

1.2.1 Processo de “*Backward*”

Na Figura 3 são apresentadas duas barras, a carga é representada na forma $S_k = P_k + jQ_k$ e a tensão de barra na forma $V_k = V_{kr} + jV_{ki}$, se tem as seguintes relações matemáticas:

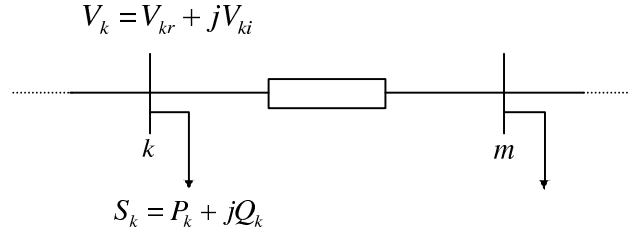


Figura 3: Cálculo de corrente de carga.

$$S_k = P_k + jQ_k \quad V_k = V_{kr} + jV_{ki} \quad (1.1)$$

$$S_k = V_k I_k^* \Rightarrow I_k^* = \frac{P_k + jQ_k}{V_{kr} + jV_{ki}} \cdot \frac{(V_{kr} - jV_{ki})}{(V_{kr} - jV_{ki})} \quad (1.2)$$

Fazendo $I_k = I_{kr} + jI_{ki}$ e igualando com a relação anterior, pode-se encontrar as relações matemáticas para a corrente de carga separando as partes real e imaginária:

$$I_{kr} = \frac{P_k V_{kr} + Q_k V_{ki}}{V_{kr}^2 + V_{ki}^2} \quad (1.3)$$

$$I_{ki} = \frac{P_k V_{ki} + Q_k V_{kr}}{V_{kr}^2 + V_{ki}^2} \quad (1.4)$$

Da Fig. 4, pode-se deduzir:

$$I_{34} = I_4 \quad I_{23} = I_{34} + I_3 \quad I_{12} = I_{23} + I_2 \quad (1.5)$$

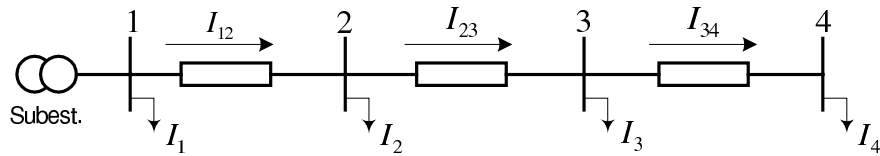


Figura 4: Sistema de 4 barras

1.2.2 Processo de “Forward”

Na Figura 5, duas barras de um sistema de distribuição radial são apresentadas, neste caso são conhecidas as tensões nas barras $V_k = V_{kr} + jV_{ki}$ e as correntes nos ramos $I_{km} = I_{kmr} + jI_{kmi}$, se tem:

$$I_{km} = I_{kmr} + jI_{kmi} \quad (1.6)$$

Tem-se a seguinte relação matemática:

$$V_k = V_{kr} + jV_{ki} = V_m + (r_{km} + jx_{km})(I_{kmr} + jI_{kmi}) \quad (1.7)$$

Pode-se deduzir:

$$V_{mr} = V_{kr} - r_{km}I_{kmr} + x_{km}I_{kmi} \quad (1.8)$$

$$V_{mi} = V_{ki} - r_{km}I_{kmi} + x_{km}I_{kmr} \quad (1.9)$$

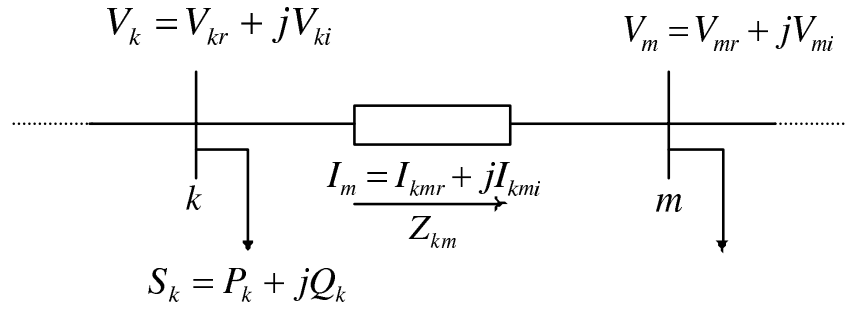


Figura 5: Cálculo de tensão na barra.

Da Figura 4, tem-se:

$$V_2 = V_1 - I_{12}Z_{12} \quad V_3 = V_2 - I_{23}Z_{23} \quad V_4 = V_3 - I_{34}Z_{34} \quad (1.10)$$

Calculado os novos valores de tensão em todas as barras e correntes em todos os ramos, pode-se calcular facilmente as perdas ativas e reativas. Da Figura 5 tem-se:

$$P_{kmp} = r_{km}I_{km}^2 \quad (1.11)$$

$$Q_{kmp} = x_{km}I_{km}^2 \quad (1.12)$$

Então as perdas totais do sistema são:

$$P_t = \sum_{(k,m) \in \Omega} r_{km}I_{km}^2 \quad (1.13)$$

$$Q_t = \sum_{(k,m) \in \Omega} x_{km}I_{km}^2 \quad (1.14)$$

Em que Ω representa o conjunto de todos os ramos do sistema elétrico. O diagrama de blocos do algoritmo é apresentado na Figura 6.

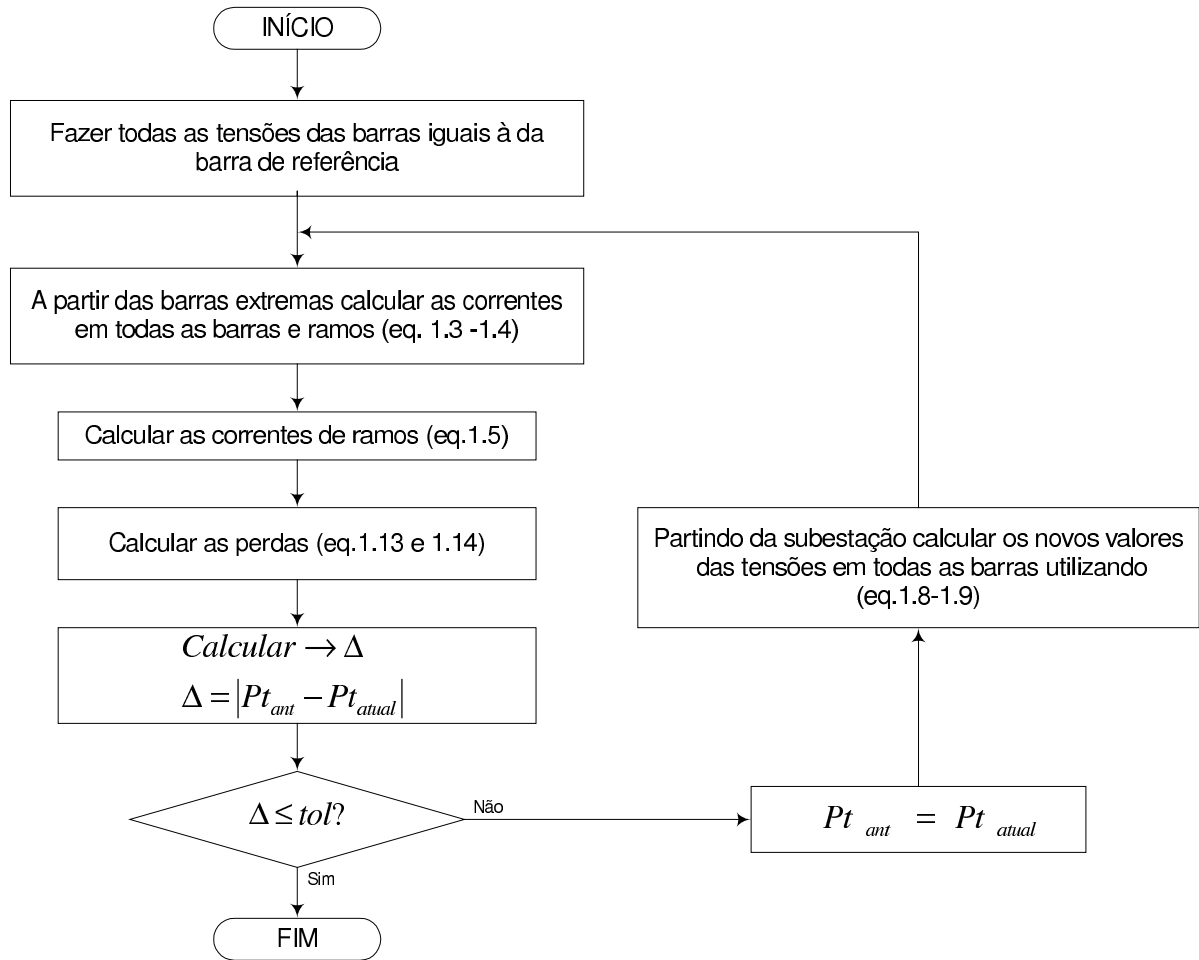


Figura 6: Diagrama de blocos do algoritmo fluxo de carga radial varredura.

1.3 Método de Soma de Potências

Este algoritmo é conhecido como método de Soma de Potências e desenvolvido por (CÉSPEDES, 1990), também é relativamente simples de implementar e eficiente na resolução de problemas de fluxo de carga radial.

O processo de resolução é iniciado escolhendo um valor para os módulos de tensão nas barras, frequentemente na maioria dos casos é a mesma tensão da barra de referência. Com as tensões nas barras é possível conhecer a carga equivalente em cada barra do sistema, esta carga equivalente é obtida somando os seguintes componentes: (i) As cargas conectadas às barras, (ii) mais as perdas nos ramos. Este processo é realizado para cada barra do sistema, conhecido como *backward*, porque o processo é iniciado a partir das

barras extremas na direção à subestação. Neste processo é possível calcular paralelamente as perdas totais do sistema.

Conhecido os valores das cargas equivalentes é possível calcular os novos valores dos módulos de tensão nas barras do sistema. Este processo é conhecido como *forward*, começa a partir da subestação até chegar às barras extremas.

Pode-se deduzir que o algoritmo consiste num processo *backward* - *forward* e termina quando a variação de perdas em duas iterações é menor que uma tolerância especificada. O algoritmo é ilustrado no diagrama de blocos da Figura 8.

1.3.1 Processo de “*Backward*”

Da Figura 7, deduzem-se as seguintes relações matemáticas:

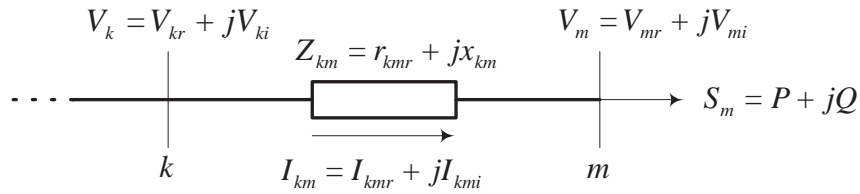


Figura 7: Sistema de duas barras.

$$S_m = V_m I_{km}^* \Rightarrow I_{km}^* = \frac{S_m}{V_m}$$

$$I_{km}^* = \frac{P + jQ}{V_{mr} + jV_{mi}} \rightarrow I_{km} = \frac{P - jQ}{V_{mr} - jV_{mi}} \Rightarrow I_{km}^2 = \frac{P^2 + jQ^2}{V_m^2} \quad (1.15)$$

Portanto, as perdas ativas assumem a seguinte forma:

$$P_{kmp} = I_{km}^2 r_{km} = r_{km} \frac{P^2 + jQ^2}{V_m^2} \quad (1.16)$$

$$Q_{kmp} = I_{km}^2 x_{km} = x_{km} \frac{P^2 + jQ^2}{V_m^2} \quad (1.17)$$

Onde P_{kmp} e Q_{kmp} são as perdas ativas e reativas respectivamente na linha.

Uma vez calculadas as perdas em todos os ramos do sistema é possível calcular os novos valores das cargas equivalentes em todos os ramos do sistema. Este processo para trás (*backward*) simplesmente consiste em concentrar as cargas de todas as barras que são alimentadas pela barra analisada considerando as perdas dos ramos.

Da Figura 4, pode-se mostrar o processo da seguinte forma:

$$P_{34} = r_{34} \frac{P_4 + jQ_4}{V_4^2} \Rightarrow P_3 = P_3 + P_4 + P_{34}$$

$$Q_{34} = x_{34} \frac{P_4 + jQ_4}{V_4^2} \Rightarrow Q_3 = Q_3 + Q_4 + Q_{34}$$

$$P_{23} = r_{23} \frac{P_3 + jQ_3}{V_3^2} \Rightarrow P_2 = P_2 + P_3 + P_{23}$$

$$Q_{23} = x_{23} \frac{P_3 + jQ_3}{V_3^2} \Rightarrow Q_2 = Q_2 + Q_3 + Q_{23}$$

$$P_{12} = r_{12} \frac{P_2 + jQ_2}{V_2^2} \Rightarrow P_1 = P_1 + P_2 + P_{12}$$

$$Q_{12} = x_{12} \frac{P_2 + jQ_2}{V_2^2} \Rightarrow Q_1 = Q_1 + Q_2 + Q_{12}$$

1.3.2 Processo de “*Forward*”

Da Figura 7, pode-se fazer a seguinte análise: Conhecidas as cargas equivalentes em todas as barras, se fará um processo que inicia da subestação até as barras extremas para calcular os novos módulos das tensões em todas as barras.

Desenvolvendo uma série de relações e deduções matemáticas (BRANDINI, 2000), chega-se a seguinte expressão:

$$V_m^4 + [2(r_{km}P + x_{km}Q) - V_k^2]V_m^2 + (P^2 + Q^2)(r_{km}^2 + x_{km}^2) = 0 \quad (1.18)$$

Com esta expressão é possível calcular a tensão da barra m conhecidas a tensão da barra k , a carga equivalente na barra m e a impedância do ramo respectivo.

Embora seja de quarta ordem, é simples de resolver, sendo reduzida em uma equação de segunda ordem. Se as duas soluções são positivas, deve-se considerar o maior valor da magnitude de tensão.

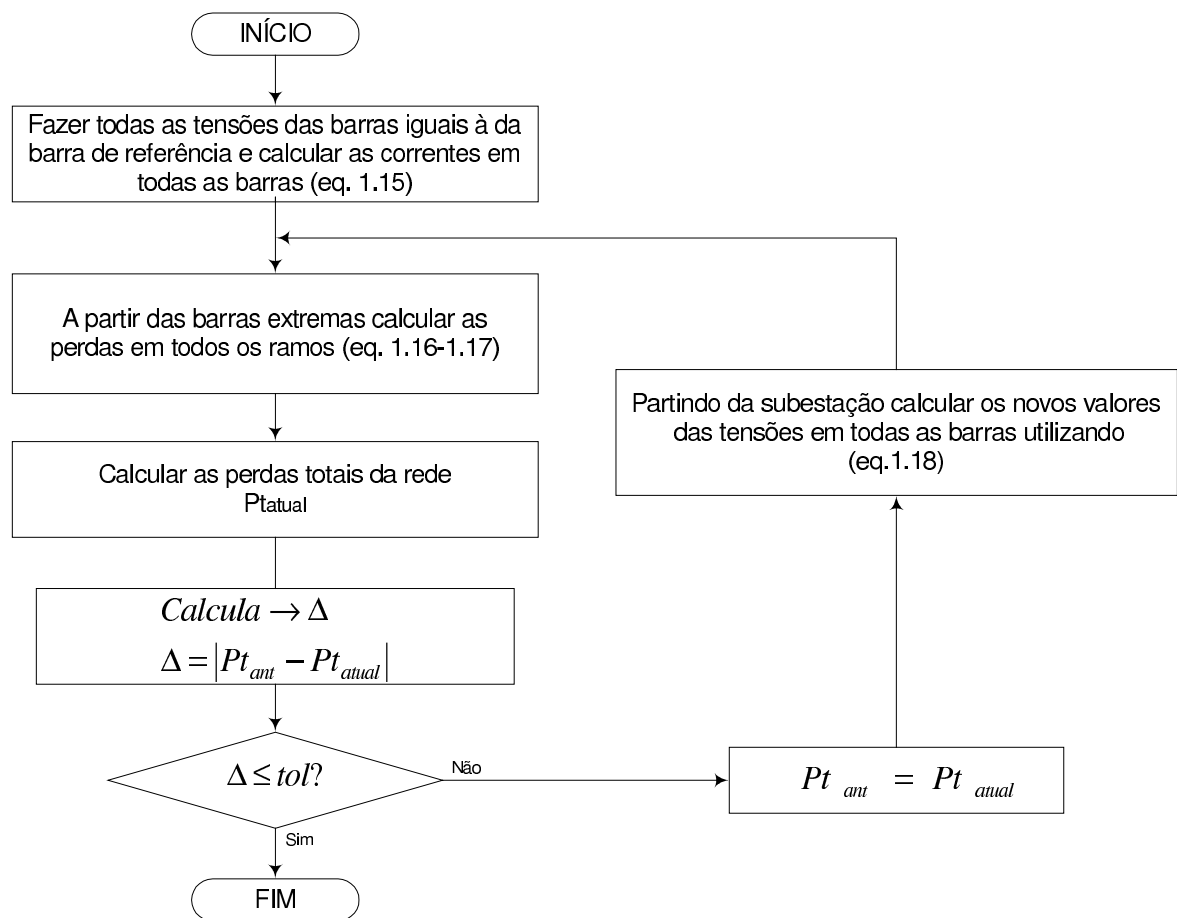


Figura 8: Diagrama de blocos do algoritmo de fluxo de carga radial Soma de Potência.

2 Reconfiguração de Sistemas de Distribuição Radiais

2.1 Introdução

Várias publicações têm tratado do assunto da reconfiguração de redes de distribuição. Os algoritmos heurísticos e mais recentemente a aplicação de métodos de inteligência artificial têm contribuído para a resolução do problema de forma cada vez mais eficiente.

Como já foi mencionado na categoria dos métodos baseados em conhecimentos estão as heurísticas. Estas técnicas foram aplicadas à reconfiguração de redes através de duas técnicas.

Primeiro, o método proposto por (MERLIN; BACK, 1975) e posteriormente modificado por (SHIRMOHAMMADI; HONG, 1989), consiste em fechar todas as chaves de interconexão obtendo uma rede malhada. Utilizando-se um fluxo de carga ótimo, começa-se abrindo as chaves seccionadoras até obter novamente uma rede radial. Através deste processo é construído um padrão de fluxo ótimo, para logo abrir o ramo que apresente o menor fluxo de corrente, obtendo uma maior redução de perdas. Este algoritmo é melhorado por Goswami e Basu (GOSWAMI; BASU, 1992). A técnica também utiliza um padrão de fluxo ótimo, mas apenas fecha uma chave de interconexão formando um laço por vez e abre a mesma chave ou outra chave seccionadora que pertence ao laço, de forma a tornar a rede novamente radial.

Segundo, o método desenvolvido por (CINVANLAR; GRAINGER; LEE, 1988), posteriormente modificado por (BARAN; WU, 1989a), utiliza-se uma técnica baseada na troca de ramos, mantendo a radialidade do sistema. Consiste em fechar uma chave de interconexão formando um laço e procura-se uma chave que deve ser aberta. Este processo de busca é realizado mediante duas regras heurísticas: (i) Quando se considera a abertura de uma chave de interconexão é necessário transferir a carga, desde a barra com maior queda de tensão até a barra com queda de tensão mais baixa; (ii) só é possível uma redução

de perdas, se existe uma diferença considerável de tensão entre as barras do ramo de interconexão a fechar. Mediante este procedimento escolhem-se as opções que reduzem as perdas, as quais são calculadas através de uma expressão matemática. De acordo com o método empregado, realiza-se uma busca selecionando a opção de maior redução de perdas e verificando-se as restrições, que cumpram estas, se por acaso cumpriram, o processo se repete até não obter mais opções que reduzam as perdas.

Outro método baseado em conhecimento é a técnica de Lógica Nebulosa, que direciona sua busca combinada com os métodos heurísticos. Para que o processo de busca seja mais eficiente, definem-se os coeficientes que quantificam as regras heurísticas permitindo orientar a busca. Esta técnica parte de uma rede malhada para logo tornar-se outra malhada com menores perdas que as iniciais (LIN, 1998). Para isso, definem-se índices calculados a partir de um fluxo de carga para rede malhada e dos parâmetros das linhas. As decisões de abertura se dão nos ramos onde os índices de perdas nos componentes são menores, o que ocorre entre as barras onde há pouca diferença de tensão entre as barras e as impedâncias são grandes. Os índices utilizados são: índice de tensão, índice ôhmico, fator de peso e decisão. Estes índices são calculados para cada malha formada no sistema. O procedimento de abertura se inicia das malhas mais próximas à fonte, e se avaliam as restrições de fluxo de carga; se são violadas, então se seleciona a seguinte chave com maior fator de decisão até que as restrições não sejam violadas.

Em (LIU; LEE; VENKATA, 1988) a técnica utilizada para restauração de redes é baseada em sistemas especialistas. Utilizando-se o conhecimento do operador da rede, se extrai regras sobre as manobras que tendem a reduzir as perdas do sistema. Este método não utiliza um fluxo de carga para verificar restrições; utiliza-se o sistema SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) para ter informações das variáveis de tensão e corrente. Se ao executar uma manobra o operador verifica que os limites das variáveis foram violados, então desfaz a manobra, e de acordo com a base de conhecimento procede a realizar a manobra seguinte.

As técnicas de Redes Neurais também foram utilizadas para o problema de reconfiguração, selecionando estruturas definidas pelas redes neurais. Nos artigos estudados por (BOUCHARD et al., 1993; KIM; KO; JUNG, 1993) são mencionadas as redes de Hopfield e Perceptron multi-layer. Começa em uma determinada estrutura de rede, esta é treinada com exemplos que se encontram dentro do algoritmo de aprendizagem, os quais permitem encontrar fatores de peso de interconexão dos neurônios que logo utilizam-se para avaliar as possíveis soluções das reconfigurações. Este método não utiliza fluxo de carga para

verificar as restrições porque não são modeladas as restrições do tipo operativo, desta maneira a solução fornece configurações ótimas das chaves para minimizar perdas, mas, não necessariamente pode ser implementada.

Outro algoritmo utilizado é Simulated Annealing, que consiste na simulação do processo de solidificação de um metal. A técnica começa gerando aleatoriamente uma configuração, esta tem que cumprir as restrições do tipo operativo (NARA; KITAGAWA, 1991). A avaliação da função objetivo realiza-se através de um problema de fluxo de carga e aplica-se o critério de aceitação que consiste, a partir de uma variação das perdas e da temperatura, calcula um índice de probabilidade, que é comparado com um número gerado aleatoriamente entre 0 e 1. Se o índice calculado é maior que o número gerado, aceita-se a configuração proposta como a configuração inicial e gerando-se novas configurações até que o parâmetro de controle da temperatura pare o processo. Se o índice é menor, volta-se à configuração prévia e o processo é repetido até que cumpra o critério de parada. Ao final do processo é possível que se obtenha um mínimo global.

O algoritmo Busca Tabu também foi utilizado para resolver este problema. Desenvolvido por (DUARTE, 1999; GUIMARÃES, 2005), e consiste no gerenciamento de um algoritmo heurístico de busca local, com a finalidade de sair dos ótimos locais, utiliza diversas estratégias como proibir (tabu) temporariamente a visita em algumas soluções para evitar a ciclagem. A Busca Tabu realiza uma série de transições através do espaço de busca e as melhores soluções são armazenadas. A avaliação da qualidade das soluções geradas é realizada utilizando índices como estabilidades de tensões e outros, que geram pouco esforço computacional.

Outra técnica utilizada para minimizar as perdas é o algoritmo Genético que é baseado nos mecanismos de seleção e genética natural. Este processo inicia-se gerando um conjunto de configurações que se denominam pais, os quais têm que cumprir com as restrições de tipo operativo. Depois, avalia-se a função objetivo de cada uma das configurações propostas. A partir destas geram-se cópias idênticas dos pais que tem uma redução maior de perdas, isto com o fim de garantir que as configurações tenham maiores possibilidades nas etapas seguintes (reprodução). Com novas cópias obtidas geram-se (recombinação) novas soluções que se denominam filhos, também se avaliam as restrições operativas. Ocasionalmente se modifica uma das soluções (mutação) para evitar laços e configurações não radiais. O processo termina quando transcorrendo um número de transições não se obtém melhores configurações. Um algoritmo Genético Modificado é proposto por (ROMERO, 2001; LIN; CHENG; TSAY, 2000), em que uma nova forma de recombinação

evita a geração de configurações não radiais. Os resultados obtidos são muito bons para os sistemas testados.

Para aumento da margem de carregamento é proposto por (VENKATESH; RANJAN; GOOI, 2004) um método que utiliza Lógica Fuzzy e um índice de estabilidade para avaliar as configurações.

Outra técnica de reconfiguração é proposta por (KASHEM; GANAPATHY; JASMON, 2000) com o propósito de maximizar a margem de carregamento. É utilizado um índice de estabilidade baseado nas equações *Simplified Distflow*, sendo apresentado também um método para eliminar as configurações não factíveis.

Para o desenvolvimento da Busca em Vizinhança Variável aplicado ao problema de reconfiguração é necessário implementar um algoritmo heurístico para gerar uma configuração inicial, assim como avaliar configurações dentro do processo da busca através de um técnica que utiliza pouco esforço computacional. Por estes motivos neste capítulo são estudados com detalhes os algoritmos heurísticos propostos por (CINVANLAR; GRAINGER; LEE, 1988), (SHIRMOHAMMADI; HONG, 1989) e (GOSWAMI; BASU, 1992) para a resolução do problema, tendo por objetivos a redução de perdas de potência ativa.

2.2 Algoritmo Heurístico de Cinvanlar (CINVANLAR; GRAINGER; LEE, 1988)

Apresentado por (CINVANLAR; GRAINGER; LEE, 1988) para resolver o problema de reconfiguração da operação de sistemas de distribuição radiais. O problema pode ser ilustrado através da Figura 9. Os ramos 14, 15 e 16 representam os ramos de interconexão que normalmente estão abertos, assumindo-se que existem chaves seccionadoras em cada ramo do sistema.

A carga da barra 9 pode ser transferida ao alimentador 1, fechando a chave de interconexão 14 e abrindo a chave de seccionamento 8. Similarmente as cargas das chaves 9, 7 e 10 podem ser transferidas ao alimentador 1, fechando a chave de interconexão 14 e abrindo a chave de seccionamento 6. O método apresentado enfoca a discussão da reconfiguração em redes de distribuição, fechando uma chave de interconexão e abrindo uma chave seccionadora para preservar a radialidade da rede. O par combinado formado por uma chave de interconexão e outra chave de seccionamento é chamada de opção de chaveamento. Entretanto a aplicação sucessiva do esquema proposto poderia tratar de múltiplas operações de chaveamento.

Pode-se verificar facilmente que existem 15 opções factíveis de chaveamento. Note-se que a melhor opção de chaveamento poderia encontrar-se simulando 15 estudos de fluxo de carga para analisar todas as possíveis configurações do sistema.

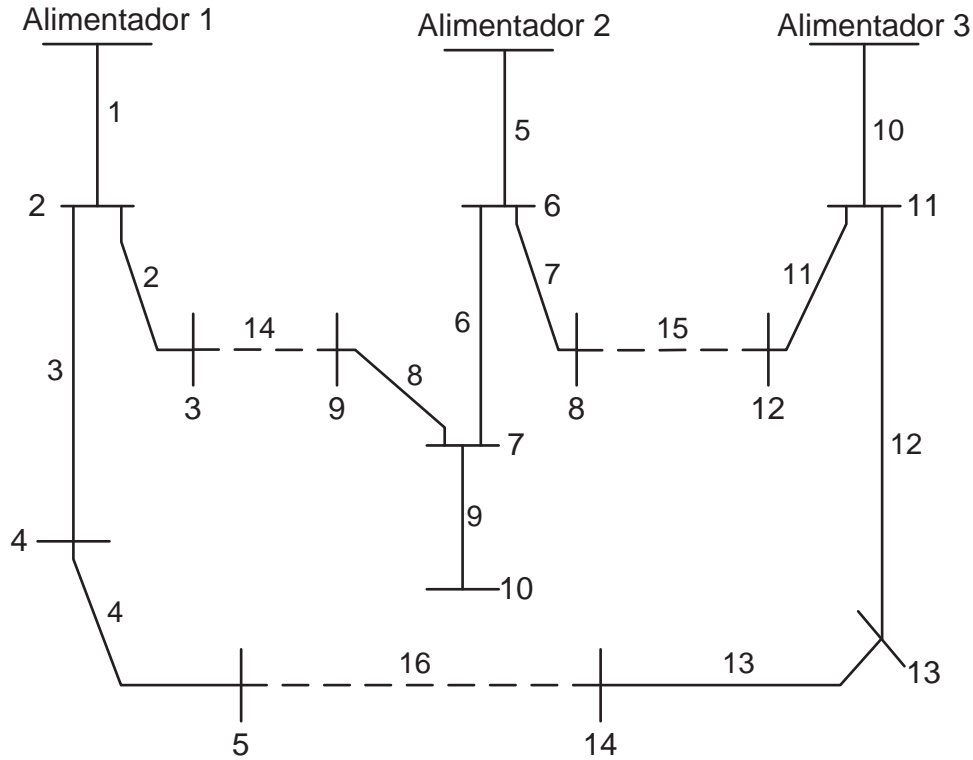


Figura 9: Sistema de três alimentadores.

2.2.1 Características Desejáveis do Método de Solução

Esta técnica proporciona duas características: (i) Capacidade de estimar com o mínimo esforço computacional a mudança nas perdas resultantes da configuração do sistema e, (ii) critérios que podem ser usados para eliminar propostas de reconfiguração pouco interessantes, de forma a acelerar a convergência do processo de otimização.

A fórmula desenvolvida para o método para estimar as mudanças das perdas requer pouca informação adicional, além da solução do fluxo de carga do caso base (isto é, antes da reconfiguração do sistema). Além disso, a fórmula proposta sugere um mecanismo de filtragem para eliminar aquelas opções de chaveamento que não produzem redução de perdas.

O primeiro objetivo é deduzir uma expressão aproximada, para encontrar a redução de perdas de potência através de uma transferência de carga, para determinar: (i) Se

uma opção de chaveamento especificada resultaria num aumento ou redução de perdas e,
(ii) Entre as opções de chaveamento qual opção produziria a maior redução de perdas.
Em outras palavras, procura-se encontrar a melhor topologia sem necessidade de resolver problemas de fluxo de carga adicionais.

2.2.2 Cálculo de Variação de Perdas

A variação de perdas resultante por transferir um grupo de cargas do alimentador 2 ao alimentador 1 pode ser estimada com a seguinte equação:

$$\Delta P = Re \left\{ 2 \left(\sum_{i \in D} I_i \right) (E_m - E_n)^* \right\} + R_{loop} \left| \sum_{i \in D} I_i \right|^2 \quad (2.1)$$

Sendo:

D - conjunto de barras que são desconectadas do alimentador 2 e conectadas ao alimentador 1;

m - barras do alimentador 1 nas quais as cargas do alimentador 2 serão conectadas;

n - barras do alimentador 2 que serão conectadas a barra m através de uma chave de interconexão;

I_i - corrente complexa na barra i ;

R_{loop} - resistência série do ramo de conexão das duas barras de interconexão dos alimentadores 1 e 2 através do fechamento da chave de interconexão especificada;

E_m - componente de $E = R_{bus} I_{bus}$ correspondente a barra m . R_{bus} , é a matriz de resistência nodal do alimentador 1 antes da transferência de carga que é encontrada usando a barra da subestação como referência. I_{bus} , é o vetor de correntes das barras para o alimentador 1;

E_n - análogo a E_m , porém definido para a barra n do alimentador 2;

$Re, *, |$ - parte real, conjugado complexo e valor absoluto, respectivamente.

Deve-se calcular E_m e E_n usando as correntes I_i das barras do caso base antes da transferência de carga. Sugere-se incorporar os efeitos dos capacitores nas correntes de barras para facilitar a eficiência computacional. ΔP representa uma redução (incremento) em KW quando este é negativo (positivo).

A redução de perdas pode ser obtida apenas se existe uma diferença de tensão entre as barras de interconexão, esta observação pode ser usada como um critério interessante para eliminar operações de chaveamento indesejáveis durante o processo de eliminação. O algoritmo é apresentado na Figura 10 e os resultados obtidos para algumas redes de distribuição são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Resultados obtidos: algoritmo de Cinvanlar (CINVANLAR; GRAINGER; LEE, 1988).

<i>Rede</i>	<i>Conf. final</i>	<i>Perda inicial (KW)</i>	<i>Perda final (KW)</i>	<i>Redução (%)</i>	<i>Melhor solução conhecida (KW)</i>
14	8 7 16	511,41	466,11	8,52	466,11
32	7 11 14 36 37	202,68	143,41	29,24	139,55
69	11 21 15 56 65	20,68	11,14	53,86	9,34

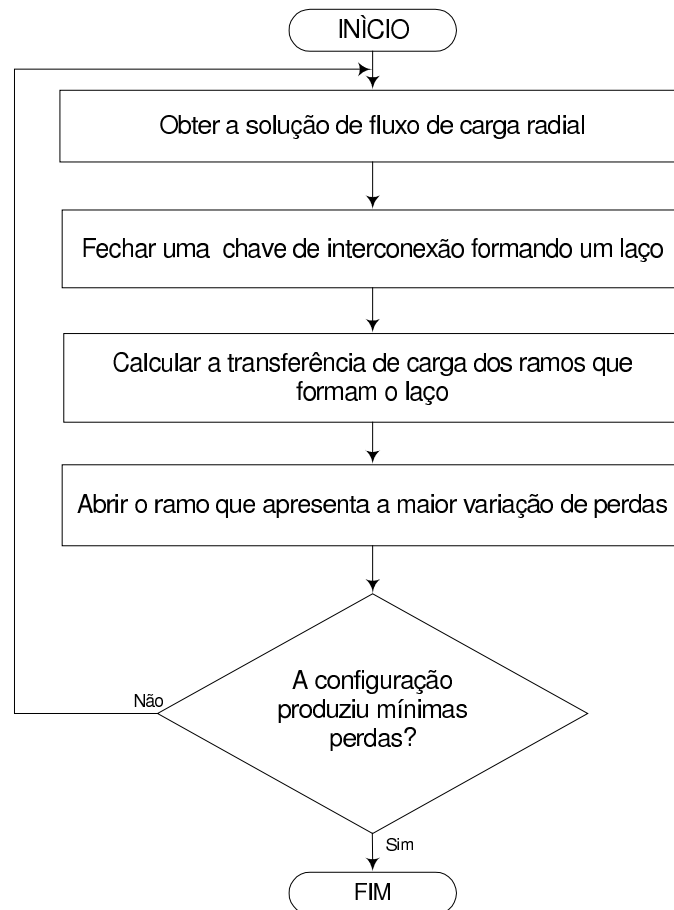


Figura 10: Diagrama de blocos do algoritmo proposto por (CINVANLAR; GRAINGER; LEE, 1988).

2.2.3 Comentários

Este algoritmo alcançou a configuração ótima global apenas no sistema de 14 barras, por não possuir muitas alternativas para reconfigurar. Nos outros sistemas os valores obtidos são de boa qualidade, estão próximos às melhores soluções conhecidas. Se o sistema cresce, encontram-se valores das perdas mais distante dos melhores valores conhecidos.

2.3 Algoritmo Heurístico de Shirmohammadi (SHIRMOHAMMADI; HONG, 1989)

Este algoritmo realiza reconfiguração de sistemas de distribuição radial, com a finalidade de reduzir as perdas ativas. É inicializado fechando-se todos os ramos, convertendo ao sistema radial em um sistema malhado, para logo utilizar um fluxo de carga para redes malhadas. Com esta informação monta-se um padrão de fluxo ótimo (PFO). O ramo que tem menos corrente vai-se abrindo até que a rede se torne radial. Na Figura 11 é ilustrado o algoritmo.

2.3.1 Procedimento para a Determinação do Padrão de Fluxo Ótimo em uma Rede Malhada

O processo pode ser descrito da seguinte forma:

1. Resolver o fluxo de carga AC para a rede malhada e determinar as correntes nodais;
2. Converter a rede malhada em uma rede puramente resistiva desconsiderando os componentes reativos da impedância de cada ramo;
3. Calcular as correntes pelos ramos da rede puramente resistiva para as injeções de correntes nodais calculadas no passo 1;
4. Uma vez calculado o PFO, as chaves ainda fechadas, devem ser abertas considerando o menor fluxo encontrado nos ramos.

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos para algumas redes de distribuição bastante conhecidas na literatura.

Tabela 2: Resultados obtidos: algoritmo de Shirmohammadi (SHIRMOHAMMADI; HONG, 1989).

<i>Rede</i>	<i>Conf. final</i>	<i>Perda inicial (KW)</i>	<i>Perda final (KW)</i>	<i>Redução (%)</i>	<i>Melhor solução conhecida (KW)</i>
14	8 7 16	511,41	466,11	8,52	466,11
32	7 14 11 28 32	202,68	141,35	12,57	139,55
69	14 56 62 70 71	20,68	9,35	54,78	9,34
135	7 9 53 84 90 96 106 118 126 128 138 139 140 141 144 145 147 148 150 151 156	320,28	282,48	11,80	280,14

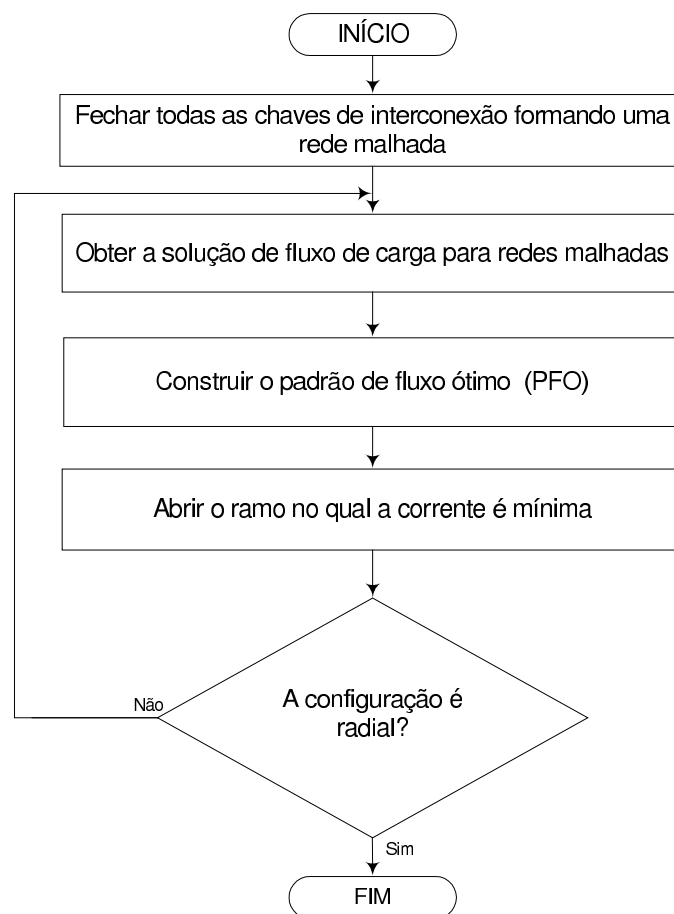


Figura 11: Diagrama de blocos do algoritmo proposto por Shirmohammadi (SHIRMOHAMMADI; HONG, 1989).

2.3.2 Comentários

Observando-se as respostas mostradas, podemos mencionar que o algoritmo não chegou às configurações ótimas globais, exceto para o sistema de 14 barras, onde encontrou-se o ótimo global. Estas configurações estão próximas aos melhores valores conhecidos. O

fato de não chegar aos valores mínimos conhecidos é devido que as técnicas heurísticas trabalham em uma estrutura de vizinhança, além de que o PFO é calculado considerando condições que não correspondem às condições normais, como por exemplo, só considerar a parte resistiva dos ramos.

2.4 Algoritmo Heurístico de Goswami - Basu (GOSWAMI; BASU, 1992)

No Padrão de Fluxo Ótimo (PFO) desenvolvido por (SHIRMOHAMMADI; HONG, 1989) fecham-se todas as chaves de interconexão, estando este critério longe da realidade, já que os sistemas de distribuição operam radialmente e apenas quando o último laço for aberto podemos encontrar uma topologia que estaria perto da realidade. Então seria uma boa alternativa considerar um laço por vez.

O método proposto por (GOSWAMI; BASU, 1992) utiliza o conceito de PFO, mas em um único laço da rede. Dessa forma em vez de fechar todas as chaves da rede, para formar uma rede com laços e abrir as chaves uma após a outra, se fecharia apenas uma chave por vez para introduzir um laço no sistema, para logo abrir uma chave seccionadora do laço, tornando-se novamente a rede radial.

Na Figura 12 pode-se observar um laço formado pelo fechamento da chave $i - j$. Para manter a topologia da rede radial é necessário a abertura de uma das chaves pertencentes ao laço.

2.4.1 Seleção da Chave Aberta que será Fechada

O algoritmo começa com uma solução de fluxo de carga para uma rede radial. A chave de interconexão que fechará o laço, será selecionada baseando-se em três critérios que são:

- Fechar a chave na qual a tensão é máxima (esperando que devido à maior diferença de tensão o chaveamento cause a máxima redução de perdas);
- Fechar a chave na qual a tensão é mínima (esperando que devido à mínima diferença de tensão uma solução modificada possa ser encontrada rapidamente);
- Selecionar a chave arbitrariamente, uma após a outra.

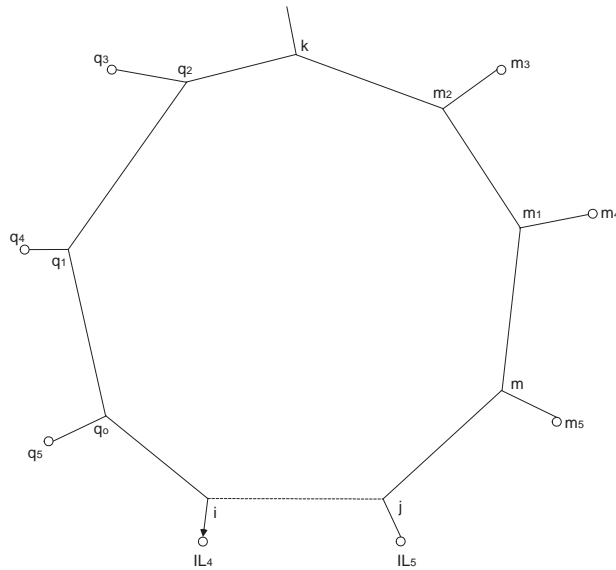


Figura 12: Laço formado ao se fechar uma chave normalmente aberta

Estes três critérios proporcionam a mesma configuração final nos sistemas testados pelos autores.

2.4.2 Determinação do Padrão de Fluxo Ótimo

Uma vez determinada a chave de interconexão a ser fechada, deve-se construir o padrão de fluxo ótimo, que consiste em calcular os fluxos em todos os ramos que formam o laço. Pode-se dividir o processo em dois passos:

- Usando os resultados encontrados para o fluxo de carga do sistema radial e através de um processo iterativo do tipo *forward* e *backward* são calculadas as novas correntes dos ramos e as tensões dos nós que formam o laço. Em (GOSWAMI; BASU, 1992) são propostas três formas diferentes para calcular estes parâmetros, e todas elas apresentam desempenhos equivalentes. Com estes resultados se recalculam as correntes da operação injetadas em cada nó do laço.
- Este passo consiste em encontrar o padrão de fluxo ótimo através dos ramos do laço, utilizando a primeira (KCL) e segunda (KCV) lei de Kirchhoff nos nós e no laço respectivamente, considerando só a parte resistiva dos ramos do laço. Na Figura 13 IL_1, IL_2, \dots, IL_8 são as correntes injetadas pelos nós q_2, q_1, \dots, m_2 respectivamente. Pode-se mencionar que existe uma corrente i_2 através do ramo $q_2 - q_1$, que será a soma da corrente que passa pelo ramo $k - q_2$ mais a corrente IL_1 . Similarmente a

corrente i_2, i_3, \dots, i_8 , etc. que são as correntes através dos ramos laterais dos nós mais as correntes IL_2, IL_3 , etc. Para a Figura 13, o sistema pode ser resolvido utilizando o sistema de eqs. (2.2).

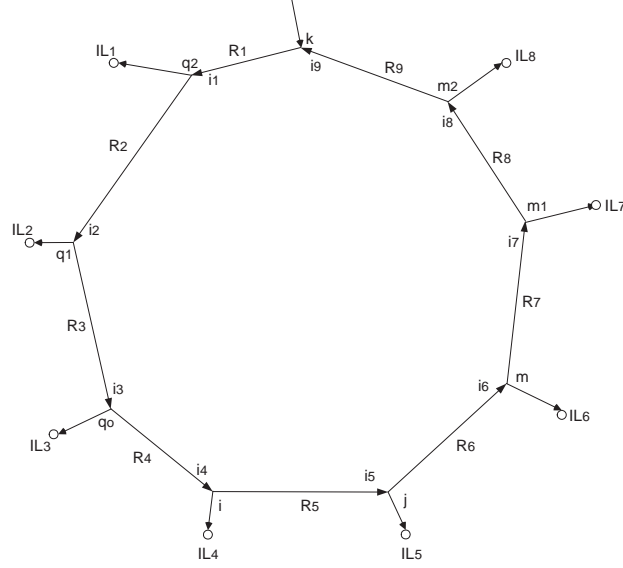


Figura 13: Laço formado para determinar o PFO.

$$\begin{vmatrix} R_1 & R_2 & R_3 & R_4 & R_5 & R_6 & R_7 & R_8 & R_9 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \\ i_6 \\ i_7 \\ i_8 \\ i_9 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ IL_1 \\ IL_2 \\ IL_3 \\ IL_4 \\ IL_5 \\ IL_6 \\ IL_7 \\ IL_8 \end{vmatrix} \quad (2.2)$$

Onde i_1, i_2, \dots, i_9 , formam o padrão de fluxo ótimo e se abre o ramo que apresenta menor valor no qual o fluxo é mínimo, restaurando a rede numa configuração radial. O algoritmo é ilustrado na Figura 14, assim como os resultados obtidos em algumas redes de distribuição na Tabela 3.

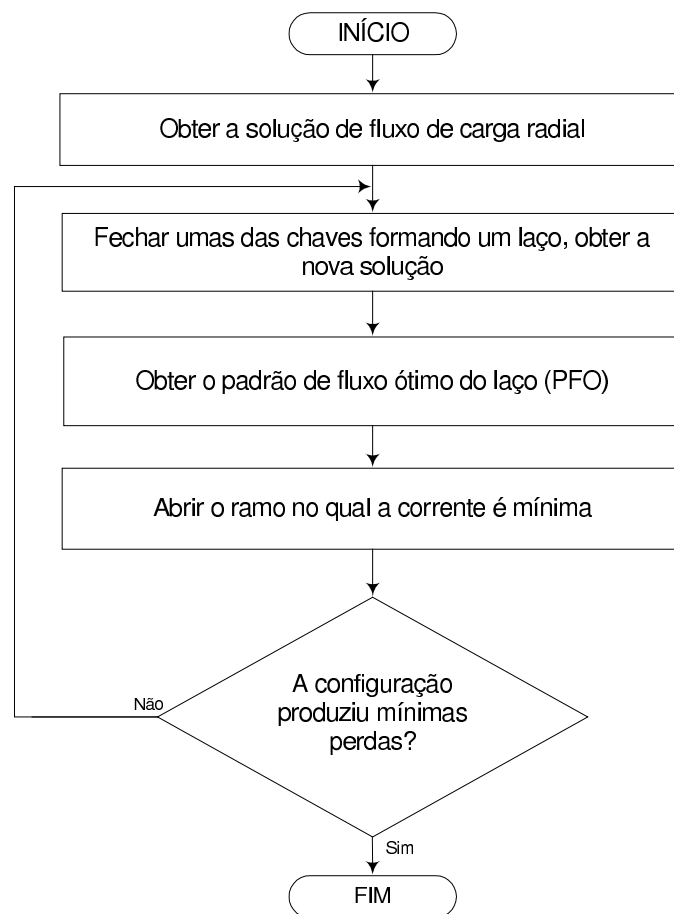


Figura 14: Diagrama de blocos do algoritmo proposto por (GOSWAMI; BASU, 1992).

Tabela 3: Resultados obtidos: algoritmo Goswami e Basu (GOSWAMI; BASU, 1992).

<i>Rede</i>	<i>Conf. final</i>	<i>Perda inicial (KW)</i>	<i>Perda final (KW)</i>	<i>Redução (%)</i>	<i>Melhor solução conhecida (KW)</i>
14	8 7 16	511,41	466,11	8,52	466,11
32	7 14 11 28 32	202,68	141,35	12,57	139,55
69	14 59 62 70 71	20,68	9,35	54,77	9,34
135	7 51 53 84 90 106 118 126 128 137 138 139 141 144 145 147 148 150 151 152 156	320,28	280,87	12,30	280,14

2.4.3 Comentários

Para o sistema de 135 barras o resultado obtido é melhor que o adquirido pelo algoritmo (SHIRMOHAMMADI; HONG, 1989). Estão muito próximos aos melhores valores conhecidos, porque as condições de análise estão mais próximas à realidade que as dos demais algoritmos apresentados, assim como a simplicidade e eficiência computacional são uma vantagem.

3 Busca em Vizinhaça Variável

3.1 Conceitos Básicos

A Busca em Vizinhaça Variável (VNS) é uma metaheurística proposta por (MLADENOVIC, 1995). Esta técnica tem demonstrado ser uma técnica muito eficiente e de fácil aplicação em muitos problemas de otimização.

Um problema de otimização consiste em encontrar, dentro de um conjunto S de soluções, uma solução que represente o melhor valor da função objetivo. Em geral pode-se definir este problema do tipo:

$$\begin{aligned} \min f(x) \\ \text{s.a. } x \in S \end{aligned}$$

Onde x representa uma solução alternativa, f é a função objetivo e S o espaço de soluções factíveis do problema.

Defina-se um ponto $x^* \in S$ para o qual existe uma vizinhaça $N(x)$, tal que, x^* é ótimo nessa vizinhaça (ótimo local). 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. Na reconfiguração de redes será aquela configuração que apresente menor perda de potência ativa.

A partir deste conceito é possível definir a vizinhaça para o problema de reconfiguração: Seja um problema de reconfiguração (S, f) . Uma estrutura de vizinhaça é uma função $N : S \rightarrow 2^S = \{X/X \subseteq S\}$ que associa a cada solução $x \in S$ um conjunto de configurações próximas de x , tais que cada y será uma solução vizinha de x .

Como esta definição é muito geral, se deverá definir quando duas soluções estão próximas. Para o caso da reconfiguração definimos que duas configurações estão mais próximas, quanto menos ramos ativos da rede são diferentes. A partir dessa dedução podemos especificar uma distância r definida sobre o espaço factível S , $r : S \times S \rightarrow \mathbb{R}$,

que permitirá avaliar a distância existente entre duas configurações quaisquer de S , como ilustra a Figura 18, que será generalizada mais adiante.

A eleição da estrutura de vizinhança é fundamental no processo de busca, já que determina a qualidade do conjunto de movimentos aplicados. Uma adequada alteração de parâmetros ou mudanças enriquecem as vizinhanças, com isso é possível realizar passos mais longos na aproximação ao ótimo.

Outra característica importante das mudanças é a factibilidade das soluções avaliadas. No caso do problema da reconfiguração deverá considerar-se só mudanças factíveis, porque o tamanho do espaço geral (factíveis e infactíveis) é muito maior ao espaço restrito (factíveis) e o número de transições seria não viável.

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

3.1.1 Metaheurística de Busca

A metaheurística de busca monta estratégias para resolver de forma mais eficiente um problema, desenvolvendo uma busca sobre um espaço de configurações, onde os elementos deste espaço representam soluções candidatas alternativas.

Para guiar a busca dentro do processo de otimização existe: (i) Buscas informadas, que usam informação obtida no processo de otimização e, (ii) buscas não informadas, que só têm em conta a estrutura de vizinhança.

O Busca em Vizinhança Variável utiliza buscas não informadas, assim também implementa estratégias para organizar a exploração eficiente dentro do espaço de busca. Traduzindo-se numa busca em vizinhança exaustiva, parcial e aleatória, que são as mais usadas.

3.1.2 Buscas Locais e Globais

Um dos procedimentos que utiliza as heurísticas para resolver os problemas de otimização combinatória é a busca local, que caracteriza-se por realizar uma série de mudanças no espaço de soluções, melhorando em cada uma delas o valor da função objetivo. O algoritmo é ilustrado na Figura 15.

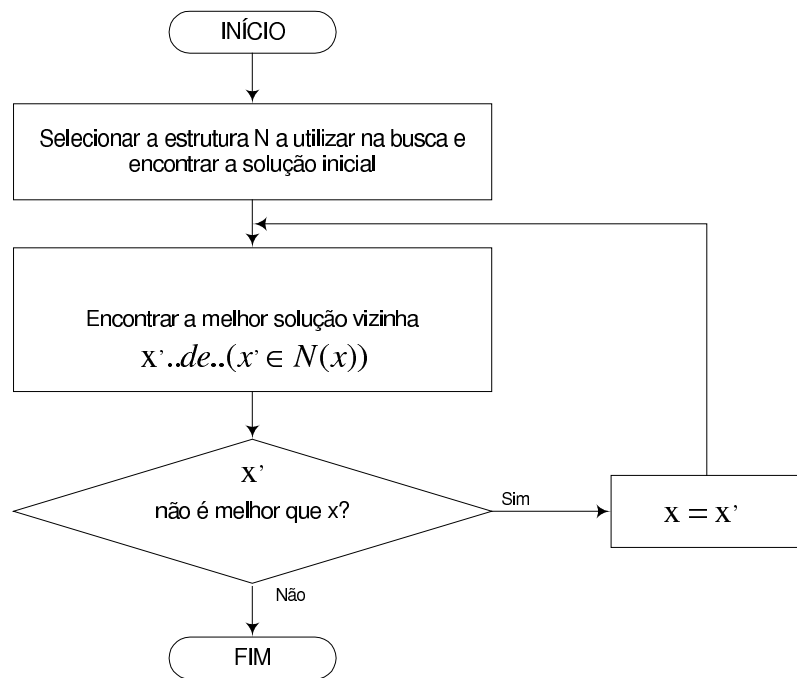


Figura 15: Diagrama de blocos do algoritmo busca local.

O principal inconveniente das buscas locais é que se aproximam a uma solução localmente ótima ou ótimo local (uma configuração que é melhor que qualquer da sua vizinhança) e a solução atual fica presa em sua vizinhança (AARTS; LENSTRA, 1997; YAGIURA; IBARAKI, 2002). Então surgem três principais formas de sair desta situação:

- Voltar e começar a busca a partir de outra solução inicial;
- Permitir movimentos de deterioração da solução atual;
- Modificar a estrutura de vizinhança.

A primeira forma é conhecida como busca local com arranque múltiplo. É adequada naqueles casos em que os ótimos locais se distribuem aleatoriamente no espaço de soluções. Isto nem sempre acontece, já que em muitos casos se observa que os ótimos locais tendem-se concentrar em pequenas regiões no espaço de soluções, o que dificulta a obtenção da solução ótima. A Figura 16 ilustra o quanto complicado seria obter o ótimo global utilizando uma busca local com arranque múltiplo já que teria que gerar uma grande quantidade de soluções aleatórias.

A segunda forma para sair do ótimo local, seria permitir movimentos de deterioração da função. Este procedimento dependendo da estratégia ficaria numa só região ou caminharia a passos longos. Portanto seria difícil encontrar a solução ótima global.

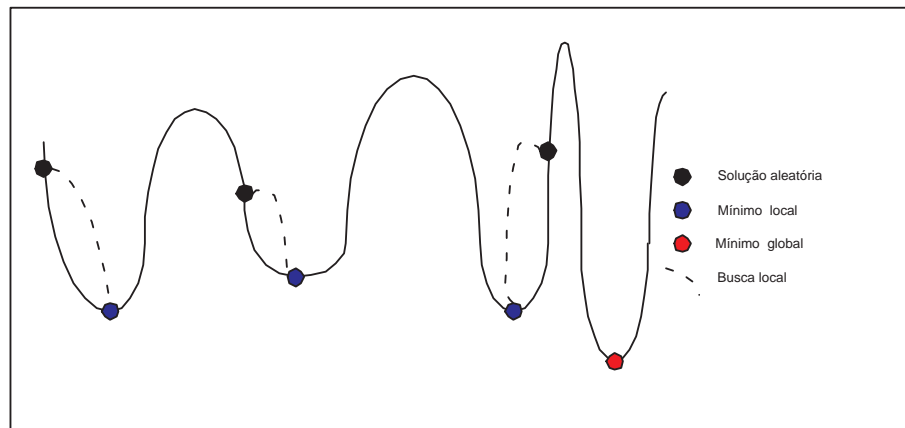


Figura 16: Busca local com arranques múltiplos.

Nos últimos anos foram propostas muitas metaheurísticas, com o objetivo de melhorar o algoritmo da busca local, evitando que o procedimento fique preso numa busca local. Sendo os mais conhecidos Simulated Annealing e Busca Tabu.

A Busca em Vizinhança Variável utiliza a técnica de sair dos ótimos locais mudando de estrutura em vizinhança, que será mais adiante generalizada.

3.2 Escolha da Configuração Inicial

A estratégia da escolha da configuração inicial é de grande importância para um bom desempenho do algoritmo. Por ser este um algoritmo com ênfase na aleatoriedade (o caminho de busca não é direcionado), uma configuração inicial de boa qualidade pode encontrar de maneira mais rápida a configuração ótima ou quase ótima procurada. Quando o algoritmo é iniciado com uma configuração de boa qualidade, a configuração ótima é encontrada com menor esforço computacional. No entanto deve-se levar em conta o acréscimo de esforço computacional devido ao uso de um algoritmo para essa finalidade.

3.3 Representação e Codificação do Problema

Será analisado a seguir o problema de reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica e o processo utilizado em sua codificação. Os sistemas estudados neste trabalho possuem as seguintes características:

- Supõe-se que tem uma chave em cada ramal da rede, exceto quando indicado em contrário;

- Além das chaves existentes nos ramos, existem as chaves de interconexão que permitem alterar a topologia da rede;
- O comando para a abertura das chaves é realizado através de um vetor (sch), que indica sempre as chaves que deverão ser abertas e, portanto, todas as outras estarão fechadas;

Observa-se na Figura 17 um exemplo de uma rede de distribuição radial bastante conhecida na literatura (CINVANLAR; GRAINGER; LEE, 1988). Pode-se observar que as chaves 14, 15 e 16 são de interconexão e, na configuração inicial encontram-se abertas.

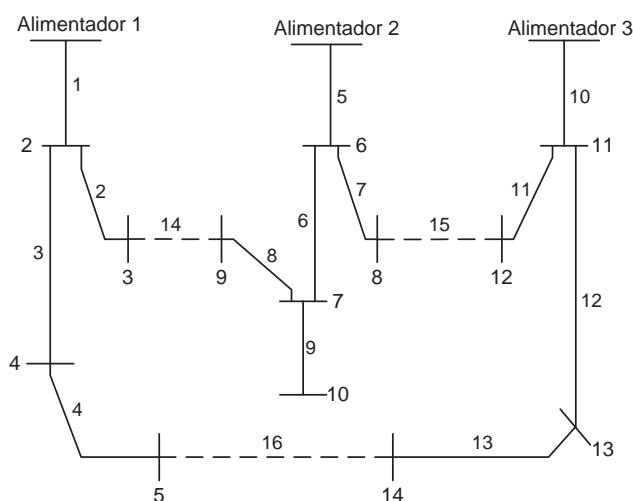


Figura 17: Sistema de 14 barras

Pode-se codificar a rede da seguinte forma:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$sch =$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0

O vetor sch é usado internamente para identificar quais chaves estão abertas e quais estão fechadas. Este método de codificação é eficiente porque é possível controlar facilmente a topologia da rede, pois se uma chave de interconexão é fechada, formara-se um laço, sendo que para tornar a rede novamente radial, é necessário abrir uma chave no ramo pertencente a esse laço.

Exemplo: Com o fechamento da chave número 14, um laço será formado pelas seguintes chaves: 1, 2, 5, 6, 8 e 14 e o vetor sch é representado da seguinte forma:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
<i>sch</i> =	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0

Para a rede voltar a ser radial deve-se escolher e abrir uma das chaves pertencente ao laço em questão. Como visto, a codificação interna do programa usa vetor binário para representar o “status” das chaves. No entanto, para o comando de quais chaves serão abertas ou fechadas, adota-se um vetor de variáveis inteiras onde são representadas apenas as chaves a serem abertas em cada configuração. Esse vetor é denominado *ch* como mostrado a seguir:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
<i>sch</i> =	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0

$$ch = [7 \ 8 \ 16]$$

Como se pode observar, o vetor *ch* representa as chaves abertas da rede, e assim sendo, só poderão haver 3 chaves abertas simultaneamente para esse caso. O método utilizado permitiu a simplificação do comando dos problemas de fluxo de carga, não sendo necessário utilizar-se vetores binários, de dimensão proporcional ao número total de chaves da rede.

3.4 Estruturas de Vizinhanças

Uma das etapas importantes desta técnica é a construção das estruturas de vizinhança, que são definidas para resolver problemas combinatórios e contínuos a partir de uma distância definida sobre o espaço de soluções factíveis S .

Como já foi mencionado, podemos especificar um parâmetro r , definido sobre o espaço factível S , $r : S \times S \rightarrow \mathbb{R}$, que permite avaliar a distância existente entre duas configurações quaisquer de S , como ilustra na Figura 18.

Desta maneira podem ser geradas as seguintes estruturas de vizinhanças, induzidas a partir de r para uma solução quaisquer:

$$N_k(x) = \{y \in S : r(x, y) = k\}, k = 1, 2, \dots, n$$

Numa rede, consideram-se I_s as chaves seccionadoras e I_t as chaves de interconexão. É definido um espaço de configurações chamado $\Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2$, sendo $\Omega_1 = (s_1, s_2, \dots, s_i)$

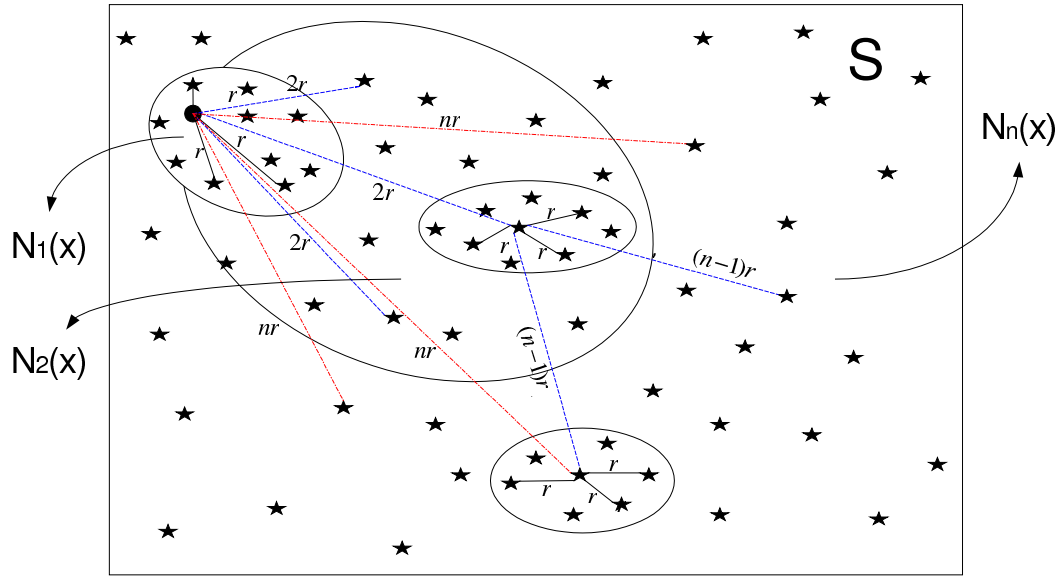


Figura 18: Vizinhanças induzidas.

e $\Omega_2 = (t_1, t_2, \dots, t_i)$, onde 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.

A vantagem de utilizar várias estruturas de vizinhança, se baseia 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 ótimo local para todas as estruturas.

3.4.1 Geração das Estruturas de Vizinhanças

Em geral as estruturas de vizinhanças podem ser obtidas, utilizando diferentes métricas ou distâncias introduzidas no espaço de soluções factíveis S . Pode-se gerar utilizando as seguintes estratégias de seleção:

1. Seleção de Heurísticas Existentes:

Para o problema de reconfiguração de redes de distribuição existem algumas heurísticas desenvolvidas (CINVANLAR; GRAINGER; LEE, 1988; BARAN; WU, 1989a; SHIRMOHAMMADI; HONG, 1989; GOSWAMI; BASU, 1992). Foram testadas fazendo uma combinação destas, chegando numa solução próxima a solução ótima global.

2. Troca de Parâmetros dos Métodos Existentes:

Algumas heurísticas baseadas nas buscas locais (GOSWAMI; BASU, 1992), se caracterizam por utilizar vizinhanças com tamanho dependente de uma série de parâmetros, onde estes são escolhidos antes de executar o algoritmo. Em lugar de fixá-los poderíamos ir mudando sistematicamente seus valores dentro de limites razoáveis, ou seja, utilizando um padrão de fluxo ótimo (PFO), abrindo do laço a chave do primeiro elemento da lista padrão numa primeira estrutura de vizinhança, em uma segunda a chave do segundo elemento da lista padrão, obtendo assim um conjunto de estruturas de vizinhança que poderão utilizar-se num esquema da *Busca em Vizinhança Variável*. Este esquema de mudar os parâmetros preestabelecidos foi utilizado inicialmente para resolver o problema do caixeiro viajante (MLADENOVIC.; HANSEN, 1997).

Esta estratégia apresentou melhores resultados que utilizando só técnicas heurísticas, mas não chegou a obter valores ótimos.

3. Uso de k-intercâmbios:

É a maneira mais fácil e natural de obter as estruturas de vizinhanças, fechando k chaves de interconexão e abrindo k chaves de seccionamento (ou interconexão), mantendo a restrição de radialidade. Este mecanismo funciona de forma eficiente e apresenta os melhores resultados com mínimas perdas. Muitos problemas foram resolvidos, como por exemplo a ρ - mediana (HANSEN; MLADENOVIC, 1997) com esta estratégia de geração de vizinhanças.

4. Divisão de vizinhanças:

Outra possibilidade é dividir uma determinada vizinhança em várias sub-vizinhanças menores, gerando sub-estruturas de vizinhança. Desta forma se examinam várias sub-vizinhanças em lugar de toda a vizinhança.

3.4.2 Geração de Estruturas de Vizinhanças Através de k-intercâmbios

Esta estratégia consiste numa (adição/subtração) proposta em (CHIANG; JEAN-JUMEAU, 1990). A técnica de construir estruturas de vizinhança é obtida mudando sistematicamente as chaves de interconexão e chaves de seccionamento.

Para gerar uma estrutura de vizinhança $N_k(x)$, se fecham k chaves (t_1, t_2, \dots, t_k) do conjunto de chaves de interconexão Ω_2 e se abrem k chaves (s_1, s_2, \dots, s_k) do conjunto de chaves de seccionamento Ω_2 , para que a rede volte a ser radial, como ilustra a Figura 19.

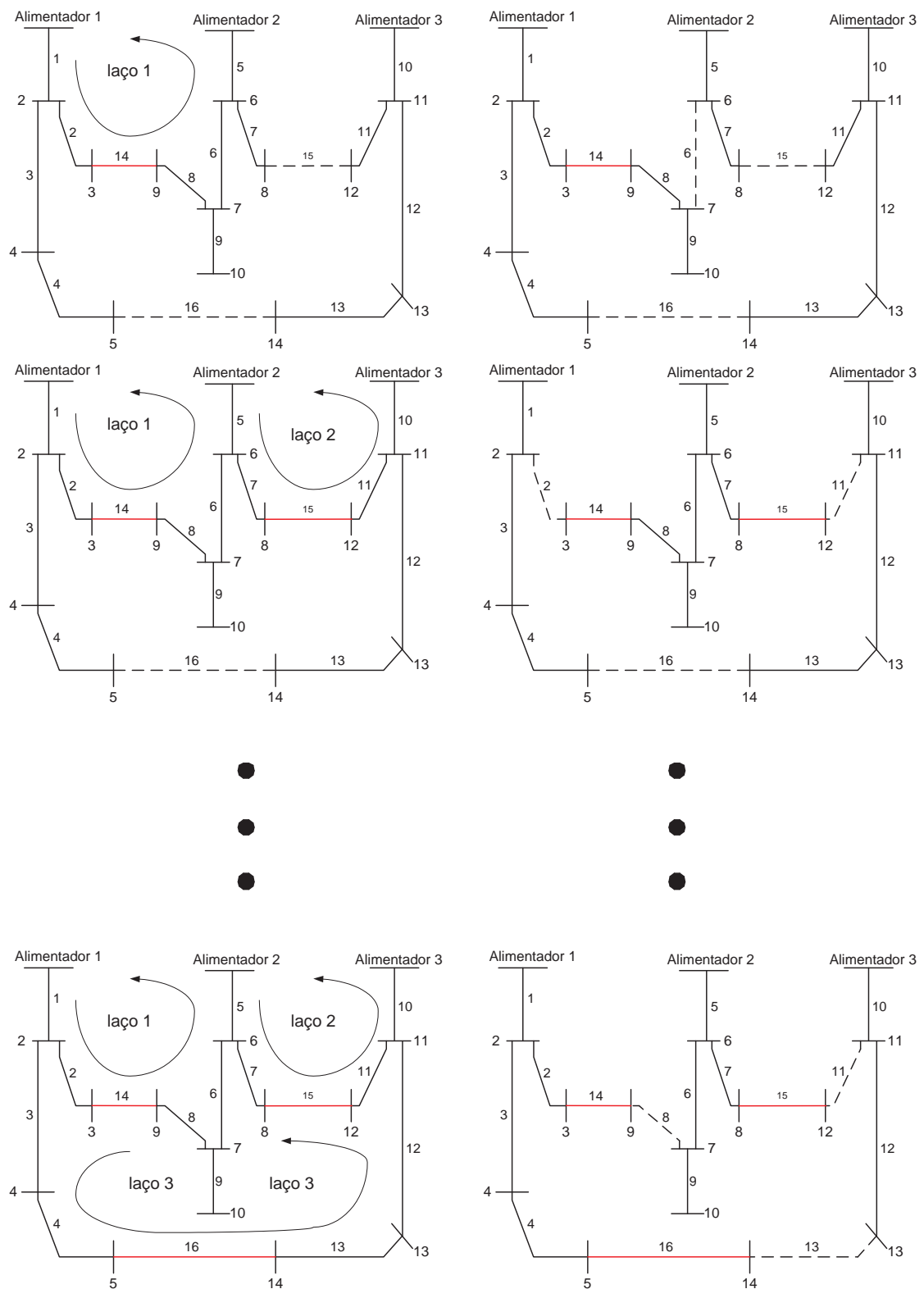


Figura 19: Geração de estruturas de vizinhança através de k -intercâmbios.

3.4.3 Ordenação das Estruturas de Vizinhança

Uma ordenação natural das estruturas de vizinhança se obtém aumentando a distância (r) existente entre a solução da configuração atual x e outra configuração com solução y , em outras palavras quando abrimos e fechamos chaves, o maior número de chaves fechadas e abertas ao mesmo tempo incrementará a distância r , e estaremos mais distante da solução atual. Também cumpre-se que as estruturas vão desde aquela que tem menos soluções vizinhas factíveis até aquela que contém maior número delas ou seja $|N_1(x)| \leq |N_2(x)| \leq \dots \leq |N_{kmax(x)}|$.

3.5 Estratégia de Busca e Mudança de Vizinhança

As diversas estratégias utilizadas no processo de busca e mudança de estrutura em vizinhança, têm a finalidade de intensificar a busca naquelas regiões mais atrativas, onde se espera ter boas soluções, além de explorar a maior quantidade de zonas (diversificar) para evitar que o processo de busca se concentre numa determinada região do espaço de busca, portanto, deve-se considerar as seguintes estratégias:

- Estratégia I (EI): No campo de otimização operacional é conhecida como busca gulosa, ou busca do melhor. Se realiza uma busca exaustiva, transitando por todas as configurações da vizinhança da solução atual, encontrando a topologia vizinha de melhor qualidade. Esta estratégia será referenciada como: Estratégia I (EI).
- Estratégia II (EII): Conhecida como busca do primeiro melhor. Se caracteriza em transitar pelas configurações da vizinhança, até que se encontre a primeira configuração de melhor qualidade que a configuração corrente. Esta estratégia será referenciada como: Estratégia II (EII).

Como temos duas fases importantes, primeiro, quando se produz a troca da estrutura de vizinhança (segundo nível de decisão), e segundo, quando se visitam diferentes soluções de uma mesma estrutura de vizinhança (primeiro nível de decisão), portanto se poderia combinar estas duas estratégias obtendo quatro possibilidades:

1. Primeiro e segundo níveis de decisão, (EI);
2. Primeiro e segundo níveis de decisão, (EII);

3. Primeiro nível de decisão, (EI), e segundo nível de decisão, (EII);
4. Primeiro nível de decisão, (EII) e segundo nível de decisão, (EI);

Considiram-se a segunda e a quarta possibilidade já que os esforços computacionais para encontrar a solução final são menores que os das demais. A primeira possibilidade será referenciada como VNS, e a terceira possibilidade como VND.

Outra possibilidade seria, uma busca aleatória para o segundo nível de decisão, ou seja, gerar aleatoriamente uma configuração numa estrutura de vizinhança para logo fazer a busca local, esta estratégia encontra as soluções com mínimas perdas em tempos computacionais extremamente demorados.

A ordem em que se alteram as estruturas de vizinhanças $N_k(x)$ é muito importante para obter uma solução final de boa qualidade.

As possibilidades de explorar as estruturas serão:

1. Explorar de forma sistemática incrementando o valor de k (*forward*), ou seja começar com $k = 1$ (*forward*) e quando não for possível melhorar em $N_k(x)$ a função objetivo, fazer $k = k + 1$, reinicializar com $k = 1$ caso encontrar uma melhor solução. Esta estratégia encontrou os melhores resultados. Os algoritmos são ilustrados nas Figuras 20 e 21 para o VNS e VND respectivamente.
2. Explorar em sentido contrário com $k = k_{max}$ (*backward*) diminuindo ($k = k - 1$), no caso que se encontre uma melhor solução se volta para ($k = k_{max}$). Esta estratégia é viável na reconfiguração quando o número dos ramos de interconexão é grande, por outro lado a implementação computacional se faz mais dificultosa em relação ao *forward*, além de que as melhores configurações (com mínimas perdas) são encontradas na segunda estrutura de vizinhança.
3. Explorar ambos sentidos (*forward* ou *backward*) utilizando parâmetros k_{min} e k_{step} para controlar as mudanças nas estruturas em vizinhanças. Esta estratégia é adequada quando a rede é de grande porte, para os sistemas testados não foi necessária a implementação desta estratégia.

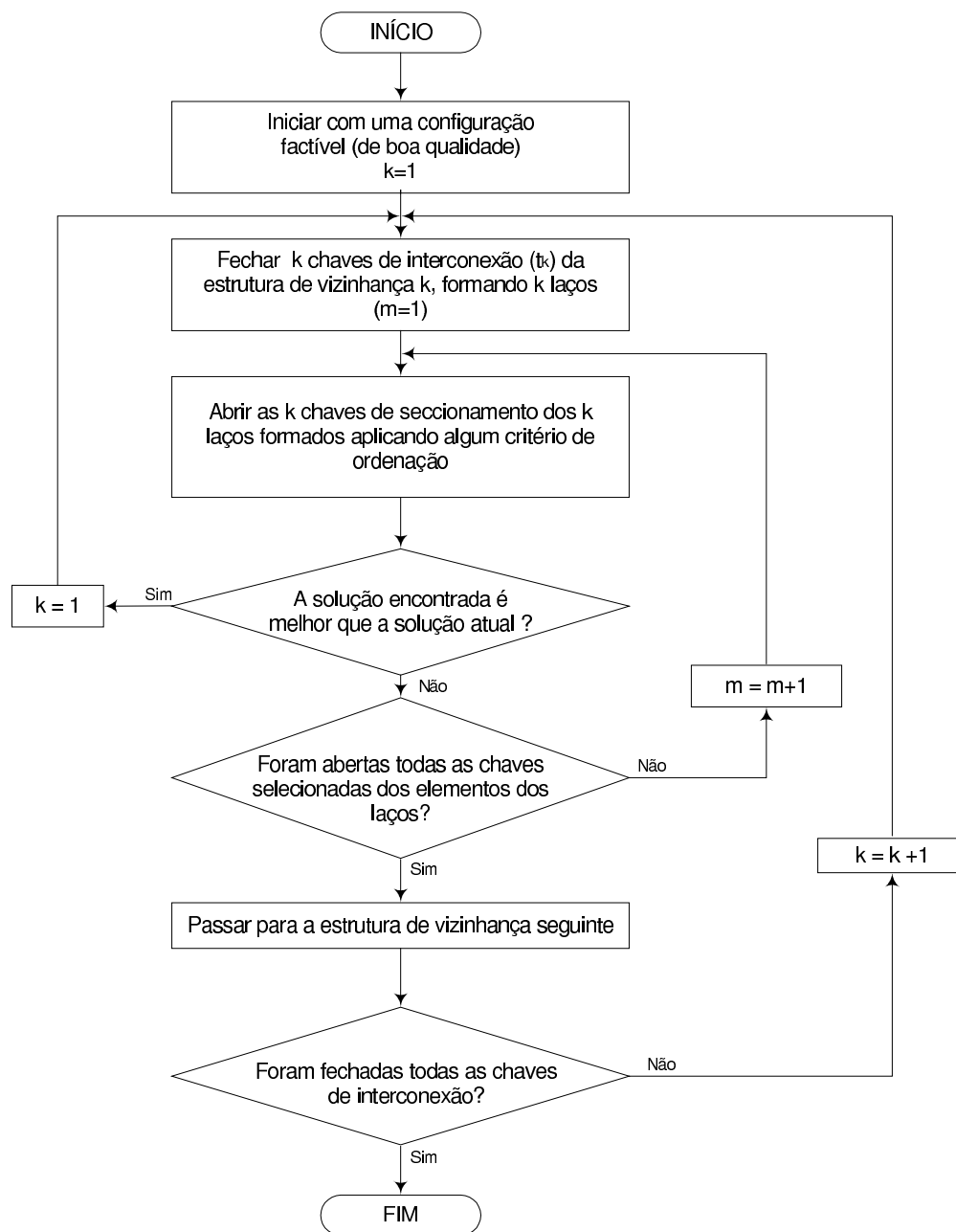


Figura 20: Diagrama de blocos utilizando a busca EII em todas as estruturas de vizinhança (VNS).

3.6 Critério de Parada

O critério de parada determina quando se considera o problema resolvido, para isso deve-se considerar alguns indicadores de qualidade, que são:

- Limite de número de iterações ou trocas;
- Esforço computacional total;

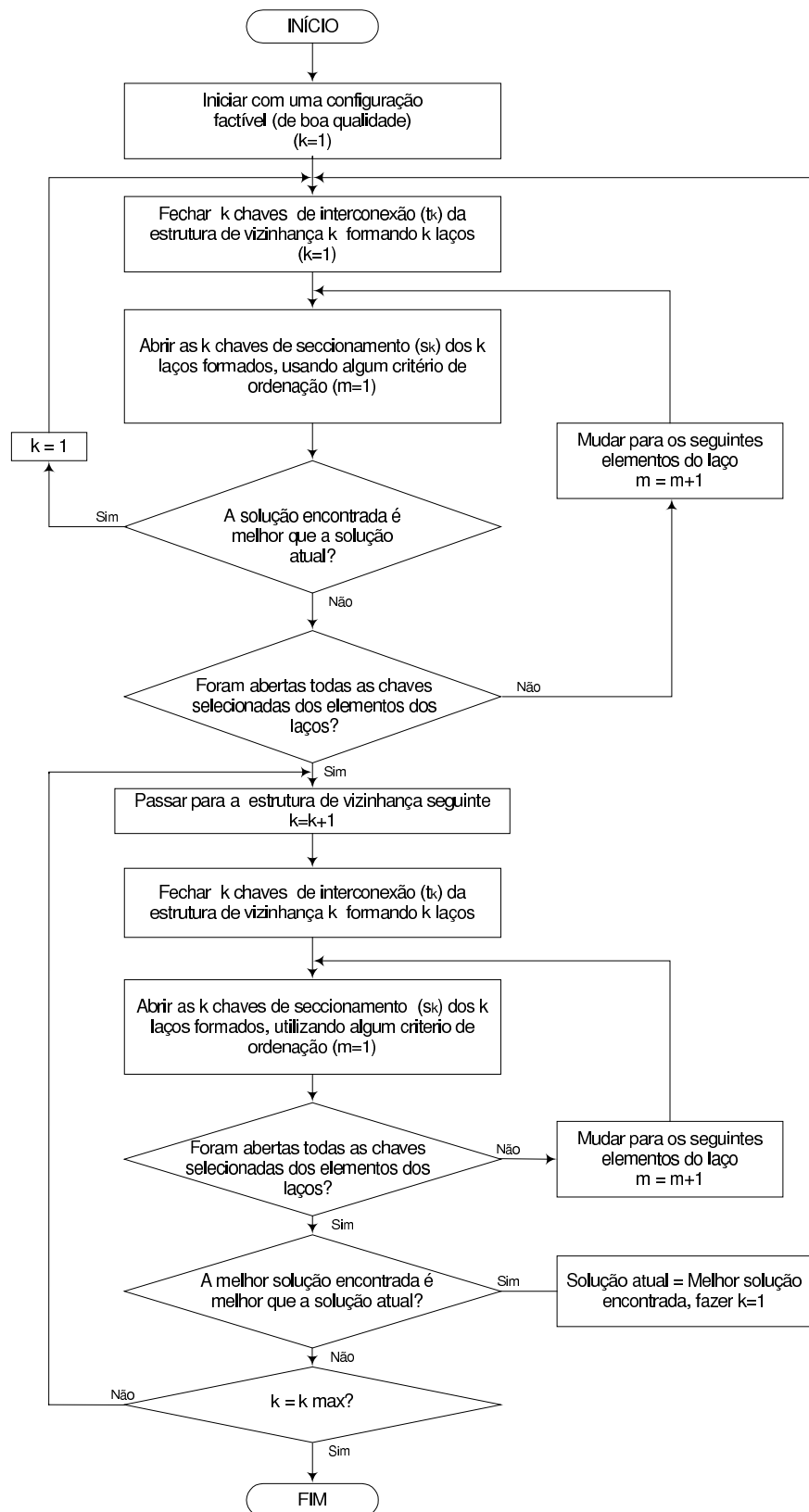


Figura 21: Diagrama de blocos utilizando a busca EII para a primeira estrutura de vizinhança e busca EI nas outras estruturas de vizinhança.

- Tempo computacional sem que se produza uma melhora da incumbente.

Para a reconfiguração o indicador adequado foi o número de transições que não se produz uma melhora entre as configurações analisadas e a incumbente (melhor solução encontrada), isto se reflete no esforço computacional.

3.7 Redução da Vizinhança

3.7.1 Estratégias de Exploração

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 se torna 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, para se ter uma visão de todo o espaço. Para isso se estabelecem critérios de probabilidade de como organizar a seleção de abertura e fechamento das chaves de interconexão e seccionadoras que participaram das trocas. Para a reconfiguração são naquelas 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 quando o espaço é uniforme, ou seja, a distribuição de probabilidades de abrir ou fechar uma chave tem igual probabilidade, além desta estratégia pode-se intensificar a busca naquelas regiões promissoras.

3.7.2 Estratégia Utilizada

Para a redução da vizinhança aplica-se uma combinação de busca parcial e aleatória para o primeiro e segundo nível de decisão (busca e mudança de estrutura em vizinhança).

Esta estratégia é conhecida como método de Monte Carlo (MELIAN; MORENO; MORENO, 2003).

Primeiro Nível de Decisão: Tem-se duas estratégias:

- a) Fechando uma chave de interconexão t_k , se criará um laço na rede anteriormente denotado como l_k . Escolhe-se aleatoriamente uma chave de seccionamento (para voltar a radialidade da rede) dentro deste espaço (laço), este conjunto de chaves serão ordenadas aleatoriamente, e só em torno de 60% do número de chaves participarão das trocas. Este valor foi determinado experimentalmente. Esta estratégia foi implementada inicialmente;
- b) O algoritmo de Goswami - Basu (GOSWAMI; BASU, 1992) realiza a configuração de uma rede de distribuição utilizando um índice de sensibilidade denominado PFO (Padrão de Fluxo Ótimo) detalhado no capítulo 2. O grupo de chaves (configurações vizinhas) a serem abertas dentro do laço formado serão só aquelas classificadas dentro do PFO. Esses vizinhos são escolhidos aleatoriamente considerando 40% dos primeiros elementos (chaves) do PFO. Também este valor foi determinado experimentalmente.

Nos dois métodos testados conseguiu-se encontrar a configuração ótima para os sistemas testados, sendo que para o primeiro caso foi necessário um número maior de iterações. Isso se deve ao fato da qualidade dos vizinhos considerados no segundo caso serem de melhor qualidade, proporcionando uma rápida convergência até alcançar as configurações ótimas. Nas Figuras 22 e 23 são mostrados os algoritmos utilizados com estas estratégias.

Segundo Nível de Decisão: Tem-se o grupo de chaves de interconexão que são fechadas de acordo com a estrutura de vizinhança. Similarmente à estratégia utilizada no primeiro nível de decisão, as chaves a serem abertas são ordenadas aleatoriamente através dos PFO. O grupo de chaves (configurações vizinhas) a serem abertas são escolhidas aleatoriamente considerando 20% dos primeiros elementos (chaves) das listas PFO. Também este valor foi determinado experimentalmente.

Como já foi mencionado para os sistemas testados, as soluções ótimas foram encontradas na segunda estrutura de vizinhança.

Nas Figuras 22 e 23 são mostrados os algoritmos utilizados com esta estratégia.

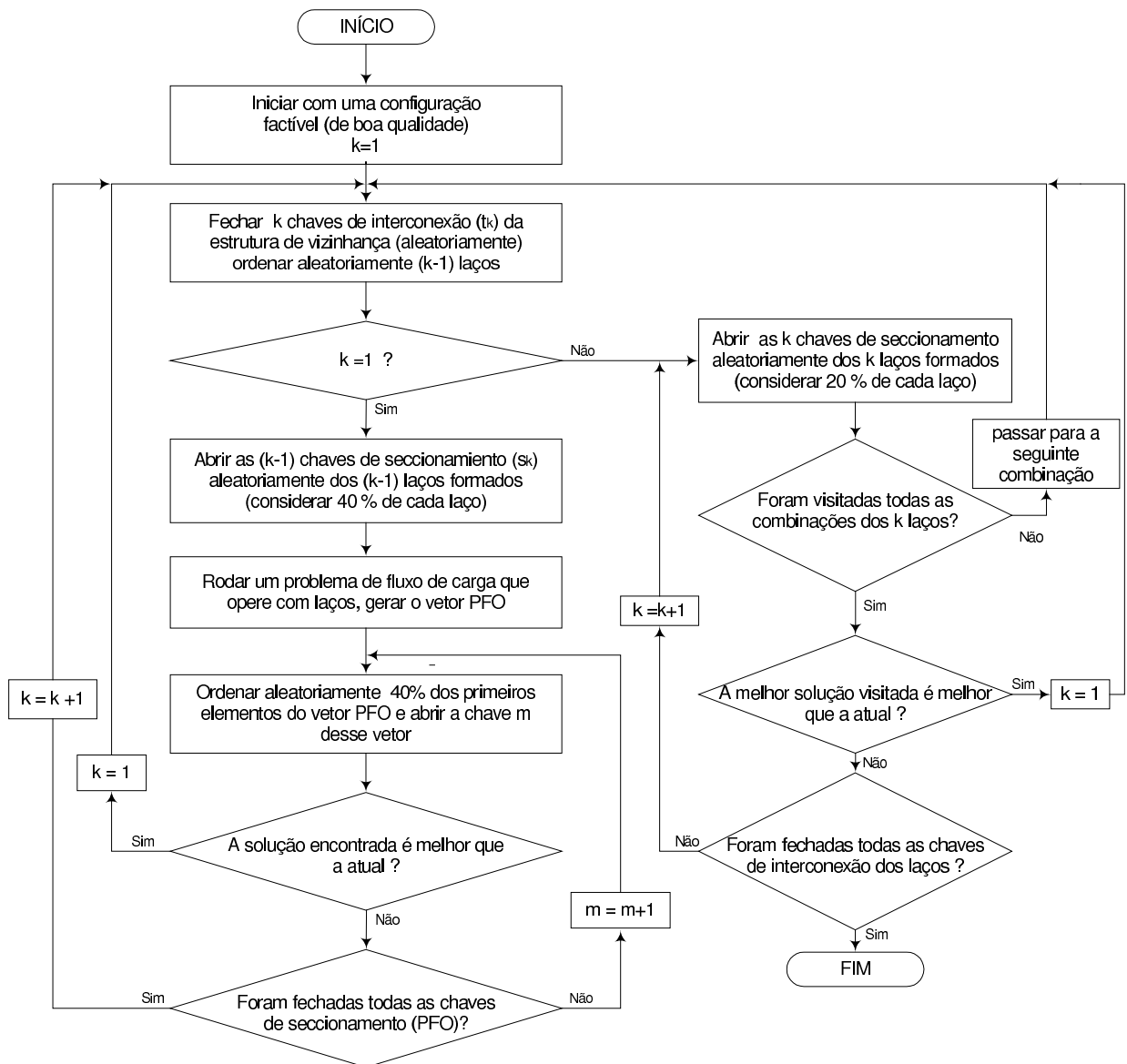


Figura 23: Diagrama de blocos - algoritmo utilizando estratégia Parcial - Aleatória - PFO no processo de busca (VND).

putacional do algoritmo deve-se ao cálculo de fluxo de carga, essencial para a avaliação das configurações candidatas.

Neste trabalho o fluxo de carga utilizado foi o método de Varredura apresentado no capítulo 1 para a avaliação das configurações, embora possa ser utilizado qualquer rotina de fluxo de carga que seja muito rápida para essa função.

3.8.1 Descrição do Algoritmo Implementado para Minimização de Perdas

A formulação do problema de perdas pode ser escrita como (LIN; CHENG; TSAY, 2000):

$$\begin{aligned} \min f &= \sum_{i=1}^{nr} r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{|V_i|^2} \\ \text{s.a. } G(x, u) &= 0 \\ V_{min}^i &\leq V_i \leq V_{max}^i \\ \text{Topologia} &\text{ radial} \end{aligned}$$

P_i : fluxo de potência ativa do ramo i ;

Q_i : fluxo de potência reativa do ramo i ;

$V_i, V_{min}^i, V_{max}^i$: tensão, tensão mínima e máxima respectivamente na barra i ;

nr : número de ramos de rede;

r_i : resistência do ramo i .

$G(x, u)$: variáveis do algoritmo de fluxo de carga.

De forma adicional a topologia da rede deve ser sempre radial.

Com todas as informações fornecidas até aqui, é possível desenvolver os algoritmos VNS e VND para a resolução do problema. Nas Figuras 24 e 25 estão ilustradas os diagramas de blocos dos algoritmos desenvolvidos.

O algoritmo inicializa-se com uma configuração factível (cumpra com todas as restrições) qualquer ou por uma configuração de boa qualidade gerada por um algoritmo heurístico. A vantagem de utilizar-se uma configuração inicial de boa qualidade nos testes feitos, é a redução do número de iterações necessárias para o algoritmo encontre as melhores soluções conhecidas. A desvantagem é o aumento do esforço computacional total do algoritmo, e que deve ser tomado em conta nesse caso. Para ilustração desta metodologia foi usado para os dois casos o sistema de 135 barras. Os resultados encontram-se na Tabela 5, para o caso de uma configuração inicial qualquer, e na Tabela 7, para uma configuração inicial de boa qualidade gerado por um algoritmo heurístico.

Foi utilizado nesse caso o algoritmo de Goswami e Basu (GOSWAMI; BASU, 1992) para a geração de uma solução inicial de boa qualidade. A Tabela 4 apresenta a configuração

inicial com o valor das perdas, e a Tabela 6 apresenta a configuração inicial após a aplicação do algoritmo de Goswami e Basu .

Tabela 4: Parâmetros do algoritmo para a rede de 135 barras utilizando uma configuração inicial de operação.

<i>Conf. inicial</i>	<i>Perda inicial (KW)</i>
136 137 138 139 140 141 142 143 144 145 146 147 148 149 150 151 152 153 154 155 156	320,28

Tabela 5: Resultados obtidos sistema de 135 barras usando uma configuração inicial de operação.

<i>Conf. final</i>	<i>Perda final (KW)</i>	<i>Red.(%)</i>
7 51 53 84 90 96 106 118 126 128 137 138 139 141 144 145 147 148 150 151 156	280,166	12,523
7 38 51 53 84 90 96 106 118 126 128 137 138 141 144 145 147 148 150 151 156	280,281	12,487
7 49 51 53 84 90 96 106 118 126 128 137 138 139 144 145 147 148 150 151 156	280,303	12,481
7 51 53 84 90 106 118 126 128 137 138 139 141 144 145 147 148 150 151 152 156	280,875	12,302
7 51 53 95 106 120 126 137 138 139 141 144 145 146 147 148 149 150 151 155 156	282,428	11,817

Tabela 6: Parâmetros do algoritmo para a rede de 135 barras usando o algoritmo de Goswami e Basu.

<i>Conf. inicial</i>	<i>Perda inicial (KW)</i>
7 51 53 84 90 106 118 126 128 137 138 139 141 144 145 147 148 150 151 152 156	280,870

Tabela 7: Resultados obtidos sistema de 135 barras usando uma configuração inicial obtida pelo algoritmo de Goswami e Basu.

<i>Conf. final</i>	<i>Perda final (KW)</i>	<i>Red.(%)</i>
7 35 51 90 96 106 118 126 135 137 138 141 142 144 145 146 147 148 150 151 155	280,138	12,532
7 51 53 84 90 96 106 118 126 128 137 138 139 141 144 145 147 148 150 151 156	280,166	12,523
7 38 51 53 90 96 106 118 126 137 138 <i>141 144 145 146 147 148 150 151 155 156</i>	280,243	12,500
7 38 51 53 84 90 96 106 118 126 128 137 138 141 144 145 147 148 150 151 156	280,281	12,487
7 49 51 53 84 90 96 106 118 126 128 137 138 139 144 145 147 148 150 151 156	280,303	12,481

Uma vez definida a configuração inicial e inicializada todas as variáveis necessárias para o funcionamento do algoritmo, realiza-se uma busca local, ou seja, geram-se todos os vizinhos desta configuração dentro da sua estrutura de vizinhança, adotando as estratégias já apresentadas.

No algoritmo desenvolvido os vizinhos para a busca local são gerados fechando chaves de interconexão e abrindo o mesmo número de chaves de seccionamento (ou interconexão) que formam os laços.

Numa primeira estrutura de vizinhança, fecha-se uma chave de interconexão qualquer, e depois abre-se a primeira chave do vetor de elementos do PFO, que são ordenados aleatoriamente. Para esta estratégia deve-se avaliar apenas 40% do número de elementos do vetor PFO, com a finalidade de reduzir o número de vizinhos. Cada um destes valores é comparado com a incumbente (melhor solução encontrada). Se a solução é a de melhor qualidade, então, esta será a nova solução atual, e a nova busca deve ser reiniciada. A outra possibilidade acontece quando, não se encontra uma melhor solução durante o fechamento aleatório de $n/3$ chaves de interconexão, onde n é o número de chaves de interconexão, então, se passará para à próxima estrutura de vizinhança.

A ordem de transição das estruturas é sistemática, então a próxima estrutura de vizinhança é k igual a 2. O processo de busca se inicia, fechando k chaves de interconexão quaisquer, e abrindo k chaves de interconexão (ou seccionamento) quaisquer dos laços formados. Para esta escolha previamente constroi-se o PFO para cada laço. Ordenam-se aleatoriamente os elementos destas listas PFO e avaliam-se apenas 20% dos elementos.

As estratégias a utilizar como já foi mencionado, são diferentes tanto para o VNS e VND. Estas estratégias são detalhadas:

- Para o algoritmo VNS: se dentro deste processo de busca, abrir/fechar chaves, encontra-se uma configuração com solução de melhor qualidade que a incumbente, então reinicia-se o processo de busca com k igual a 1. Caso não encontra, passa-se a seguinte combinação aleatória das k chaves de interconexão, até alcançar 30% do número total de chaves de interconexão (combinações de k -chaves). O algoritmo implementado está ilustrado na Figura 24;
- Para o algoritmo VND: caracteriza-se porque, no processo de busca, abrir/fechar chaves, depois de explorar configurações, até alcançar 30% do número total de chaves de interconexão (combinações de k -chaves), avaliam-se as configurações visitadas e aquela que apresente uma solução de melhor qualidade compara-se com a solução

da incumbente. Se é melhor, escolhe-se esta como a incumbente e reinicia-se o processo de busca com k igual a 1. Caso contrário, passa-se a próxima estrutura de vizinhança. O algoritmo implementado está ilustrado na Figura 25.

O algoritmo termina quando se alcança o número de estruturas de vizinhanças igual a K_{max} , onde $n/3 = K_{max}$.

Nos testes feitos as melhores configurações foram encontradas na segunda estrutura de vizinhança.

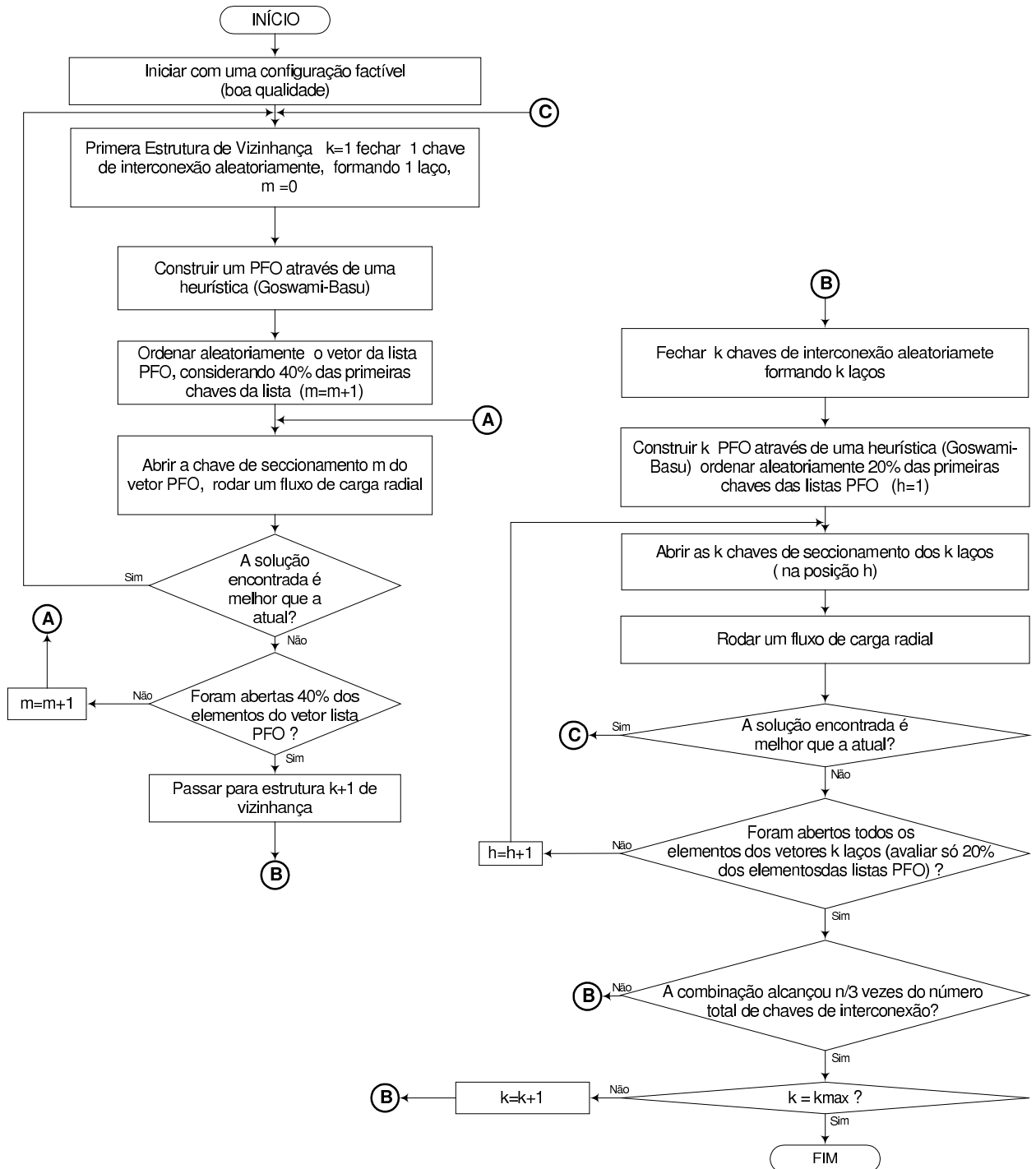


Figura 24: Diagrama de blocos do algoritmo VNS.

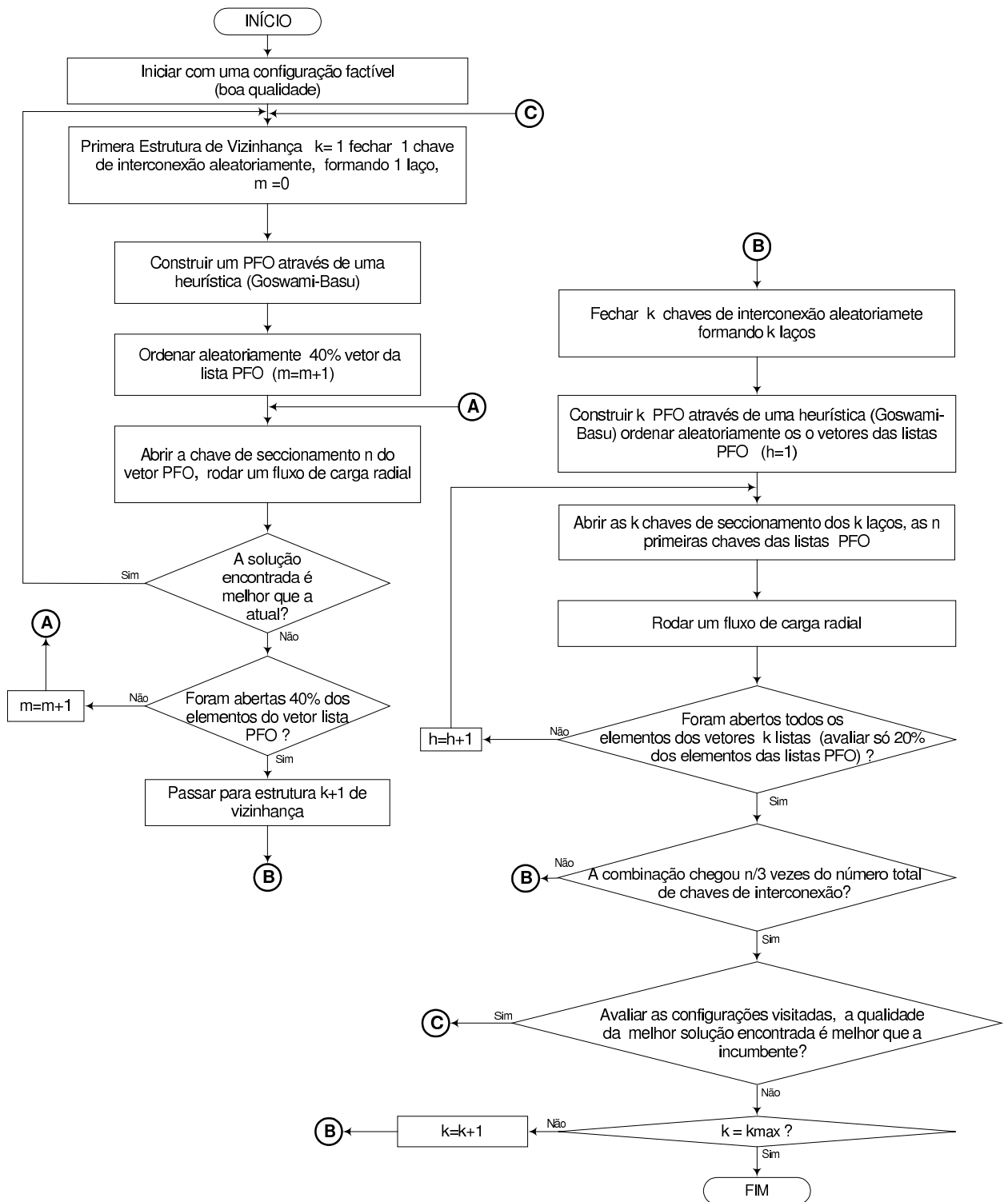


Figura 25: Diagrama de blocos do algoritmo VND.

4 *Resultados Obtidos*

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos em diversas simulações utilizando a metaheurística proposta de Busca em Vizinhança Variável, tendo como objetivo a minimização de perdas de potência ativa. São apresentados testes para diferentes sistemas, de 14 barras (CINVANLAR; GRAINGER; LEE, 1988), 32 barras (BARAN; WU, 1989a) e 69 barras (CHIANG; JEAN-JUMEAU, 1990). Estes sistemas são bastante conhecidos na literatura especializada. Também apresentam resultados de testes de dois sistemas reais, um com 135 barras e outro com 202 barras. Os dados destes sistemas são apresentados no Apêndice A. A potência e a tensão base utilizadas foram de 1000 kVA e a tensão da subestação respectivamente.

Os sistemas foram testados utilizando o algoritmo da VNS, porque encontrou os valores ótimos globais num menor número de transições, que o algoritmo VND. Assim também, para gerar a configuração inicial, se utilizou um algoritmo heurístico proposto por (GOSWAMI; BASU, 1992).

Os tempos de processamento foram obtidos utilizando um computador pessoal Pentium 4, 1,8 GHz, 256 MB RAM.

4.1 Sistema de 14 barras

O sistema é mostrado na Figura 26. Inicialmente o sistema apresenta 14 barras, 16 circuitos e carga total de 28,9 MW, os ramos de ligação são 14, 15, 16. Na Tabela 8 mostram-se os resultados obtidos para este sistema.

Tabela 8: Resultados obtidos sistema de 14 barras.

<i>Configuração</i>	<i>Chaves abertas</i>	<i>Perda(kW)</i>	<i>Red.(%)</i>
1-Inicial	14 15 16	511,4106	-
2	7 8 16	466,1137	8,5165
3	7 8 13	492,8172	8,4532
4	4 7 8	479,2779	5,8533

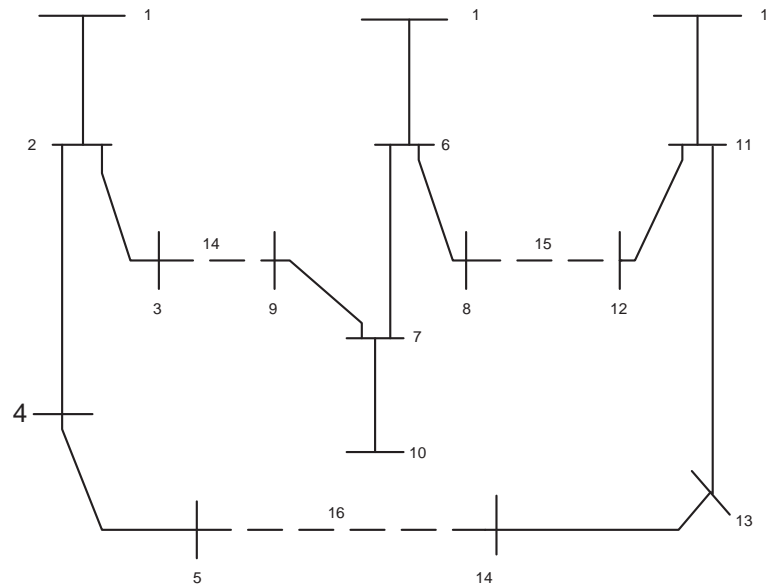


Figura 26: Sistema de 14 barras.

4.2 Sistema de 32 barras

O sistema é mostrado na Figura 27. Inicialmente o sistema apresenta 32 barras, 37 circuitos e carga total de 3715 kW, os ramos de interconexão são 33, 34, 35, 36. Na Tabela 9 mostram-se os resultados obtidos para este sistema.

Tabela 9: Resultados obtidos sistema de 32 barras.

<i>Configuração</i>	<i>Chaves abertas</i>	<i>Perda(kW)</i>	<i>Red.(%)</i>
1-Inicial	33 34 35 36 37	202,676207	-
2	7 9 14 32 37	139,5497	31,146
3	7 9 14 28 32	139,9767	30,936
4	7 10 14 32 37	140,2773	30,787
5	7 10 14 28 32	140,7043	30,577
6	7 11 14 32 37	141,2025	30,331

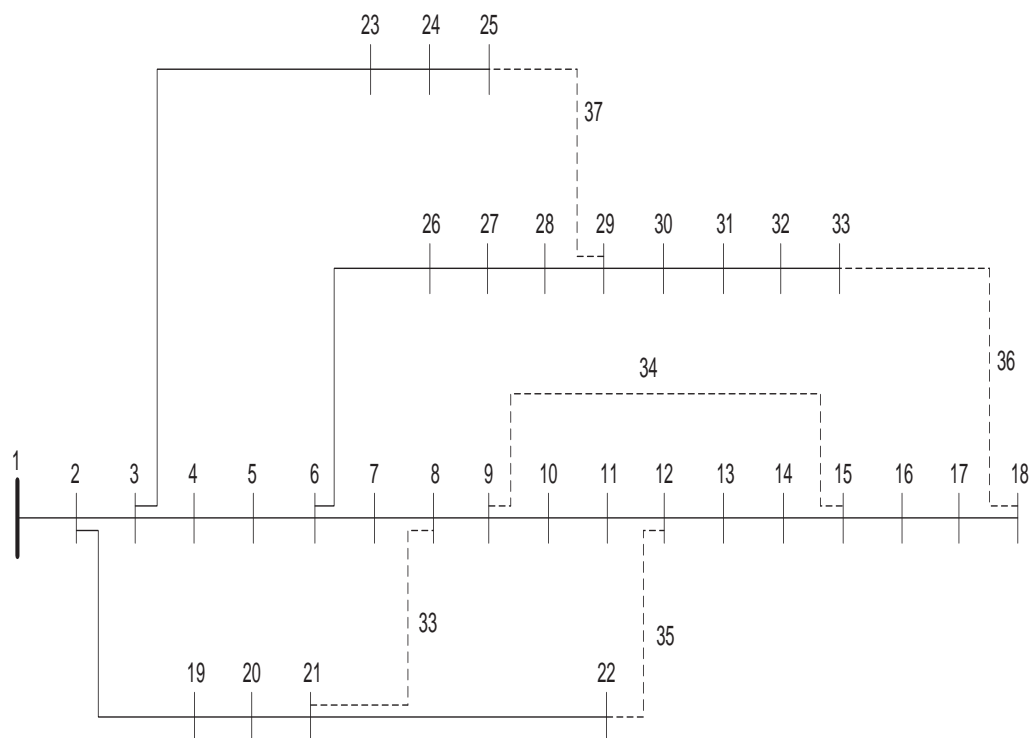


Figura 27: Sistema de 32 barras

4.3 Sistema de 69 barras

O sistema é mostrado na Figura 28. Inicialmente o sistema apresenta 69 barras, 74 circuitos e carga total de 1108 kW, os ramos de interconexão são 70, 71, 72, 73, 74. Na Tabela 10 mostram-se os resultados obtidos para este sistema.

Tabela 10: Resultados obtidos sistema de 69 barras.

Configuração	Chaves abertas	Perda(kW)	Red.(%)
1-Inicial	70 71 72 73 74	20,6826	-
2	15 59 62 70 71	9,3408	54,838
3	15 56 62 70 71	9,34076	54,838
4	15 58 62 70 71	9,34076	54,838
5	15 57 62 70 71	9,34077	54,838
6	14 59 62 70 71	9,34932	54,796
7	14 56 62 70 71	9,34932	54,796

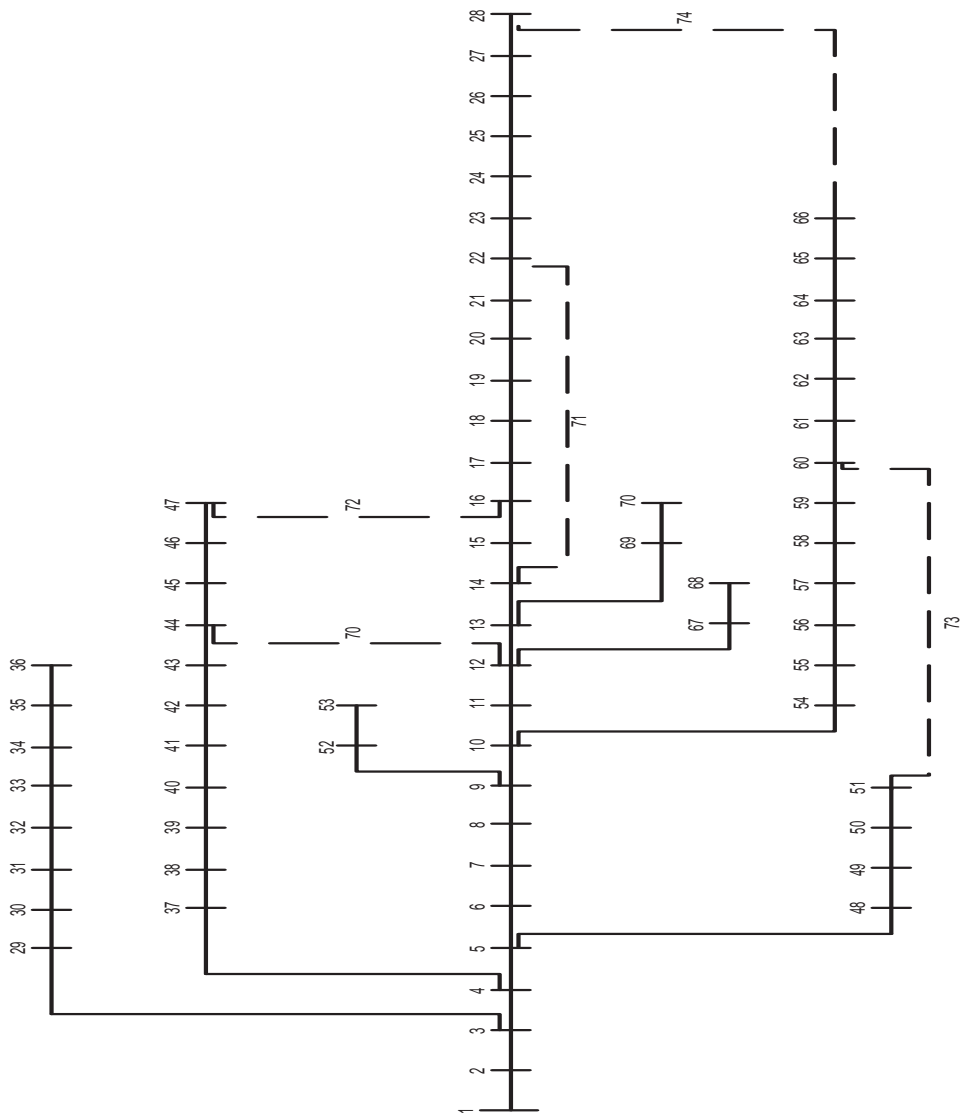


Figura 28: Sistema de 69 barras.

4.4 Sistema de 135 barras

O sistema é mostrado na Figura 29. Inicialmente o sistema apresenta 135 barras, 156 circuitos e carga total de 18313, 81 kW, os ramos de interconexão são 136, 137, 138, 139, 140,

141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156. Na Tabela 11 mostram-se os resultados obtidos para este sistema.

Tabela 11: Resultados obtidos sistema de 135 barras.

<i>Configuração</i>	<i>Chaves abertas</i>	<i>Perda(kW)</i>	<i>Red.(%)</i>
1-Inicial	136 137 138 139 140 141 142 143 144 145 146 147 148 149 150 151 152 153 154 155 156	320,276	-
2	7 35 51 90 96 106 118 126 135 137 138 141 142 144 145 146 147 148 150 151 155	280,138	12,532
3	7 51 53 84 90 96 106 118 126 128 137 138 139 141 144 145 147 148 150 151 156	280,166	12,523
4	7 38 51 53 90 96 106 118 126 137 138 141 144 145 146 147 148 150 151 155 156	280,243	12,500
5	7 38 51 53 84 90 96 106 118 126 128 137 138 141 144 145 147 148 150 151 156	280,281	12,487
6	7 49 51 53 84 90 96 106 118 126 128 137 138 139 144 145 147 148 150 151 156	280,303	12,481

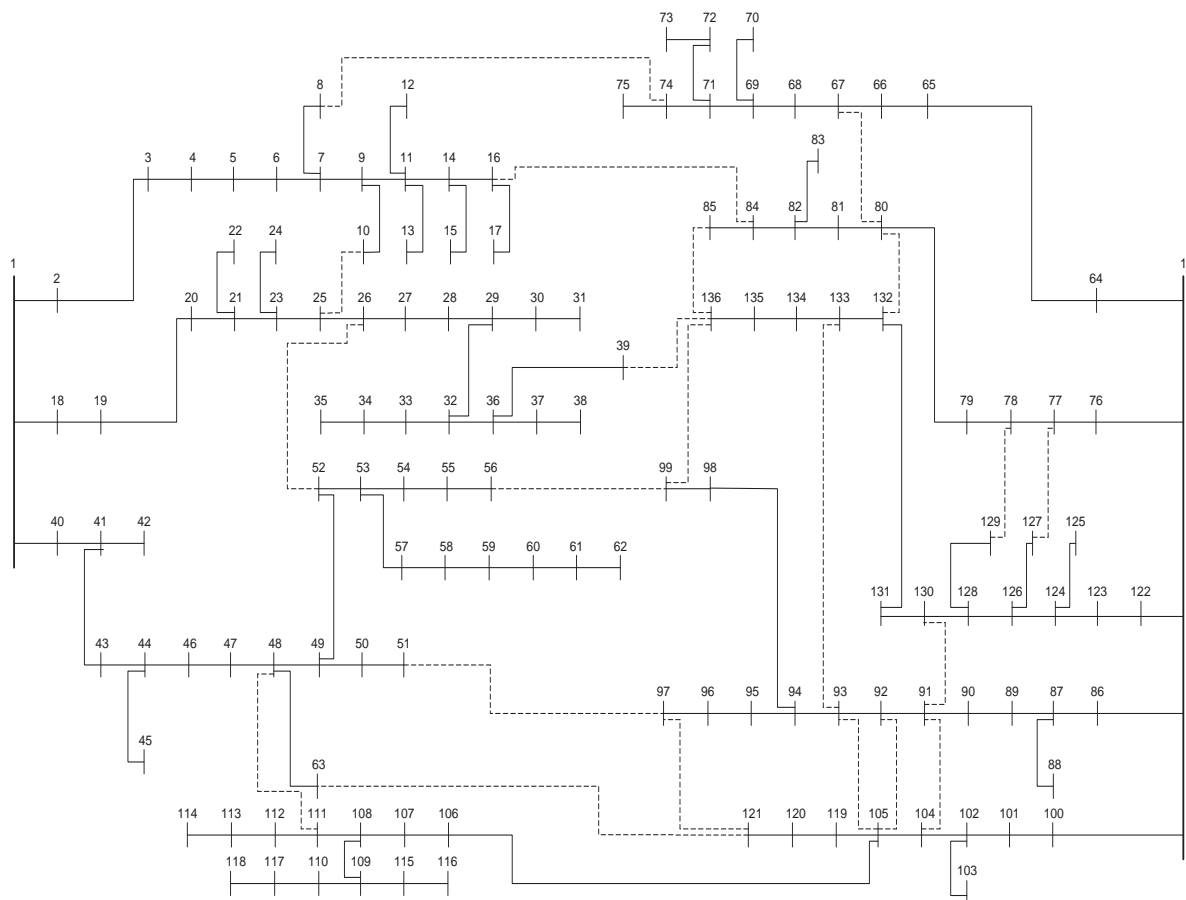


Figura 29: Sistema de 135 barras.

Tabela 12: Resultados obtidos sistema de 202 barras - com limitação de chaveamento

<i>Configuração</i>	<i>Chaves abertas</i>	<i>Perda(kW)</i>	<i>Red.(%)</i>
1-Inicial	202 203 204 205 206 207 208 209 210 211 212 213 214 215 216	545,4278	-
2	154 177 183 199 202 203 204 205 206 207 211 212 213 215 216	539,0425	1,1707
3	177 183 199 202 203 204 205 206 207 208 211 212 213 215 216	539,0425	1,1707
4	154 177 184 199 202 203 205 206 207 210 211 212 213 215 216	540,9536	0,8203
5	177 199 202 203 204 205 206 207 208 210 211 212 213 215 216	540,9536	0,8203
6	177 183 202 203 204 205 206 207 208 211 212 213 214 215 216	541,3696	0,7440
7	154 177 183 202 203 204 205 206 207 211 212 213 214 215 216	541,3696	0,7440
8	199 202 203 204 205 206 207 208 209 210 211 212 213 215 216	543,1007	0,4267
9	177 183 184 202 203 204 205 206 207 211 212 213 214 215 216	541,3696	0,7440

4.5.2 Sem limitação de chaveamento

Para efeitos de comparação foram considerados todos os ramos com chaves, não tendo sido alteradas as chaves de interconexão. Na Tabela 13 mostram-se os resultados obtidos para este sistema.

Tabela 13: Resultados obtidos sistema de 202 barras - sem limitação de chaveamento.

<i>Configuração</i>	<i>Chaves abertas</i>	<i>Perda(kW)</i>	<i>Red.(%)</i>
1-Inicial	202 203 204 205 206 207 208 209 210 211 212 213 214 215 216	545,4278	-
2	12 29 66 74 83 111 118 125 131 135 136 199 202 208 211	508,4749	6,7750
3	29 66 74 83 111 118 125 131 135 136 140 177 199 202 208	508,4831	6,7735
4	28 66 74 83 111 118 125 131 135 136 140 177 199 202 208	508,6349	6,7457
5	12 29 66 74 83 111 118 125 131 135 137 184 199 202 211	508,6414	6,7445
6	29 66 74 83 111 118 125 131 135 137 140 177 199 202 208	508,6450	6,7439

4.6 Conclusões

Para os sistemas testados de 14, 32, 69, o algoritmo encontrou configurações com qualidades das soluções iguais aos encontrados na literatura especializada. Para os sistemas reais de 135 e 202 barras este algoritmo demonstrou ser muito eficiente porque encontrou configurações com qualidade de soluções iguais e melhores que apresentados na literatura, tanto para os sistemas com limitação de chaveamento como sem limitação de chaveamento.

As Tabelas 14 e 15 ilustram o número de transições, que permite analisar o desempenho dos algoritmos VNS e VND respectivamente. Para os sistemas de 135 e 202 barras, o algoritmo transitou respectivamente por 1532 e 495 configurações. É necessário indicar que para chegar até a configuração que gerou a segunda maior redução de perdas que a configuração ótima global para o sistema de 135 barras, visitou-se 607 configurações, aumentando o número de transições para encontrar a configuração que apresenta melhor resultado.

Com relação aos níveis de tensão depois da reconfiguração, encontrou-se para os sistemas de 135 e 202 barras sem limitação de chaveamento valores com magnitudes mínimas de tensão igual a 0.9582 e 0.96227 p.u. respectivamente.

Tabela 14: Parâmetros do algoritmo VNS.

<i>Sistema</i>	<i>Num. Transições</i>	<i>Num. de fluxos de carga aproxim. calculados</i>	<i>Esforço computacional (seg)</i>
14 barras	4	4	1,00
32 barras	32	32	5,00
69 barras	82	82	10,00
135 barras	1532	1532	692,00
202 barras	495	495	409,00

Tabela 15: Parâmetros do algoritmo VND.

<i>Sistema</i>	<i>Num. Transições</i>	<i>Num. de fluxos de carga aproxim. calculados</i>	<i>Esforço computacional (seg)</i>
14 barras	4	4	1,00
32 barras	32	32	5,00
69 barras	82	82	10,00
135 barras	2933	2833	1711,00
202 barras	1074	1074	1195,00

5 *Conclusões*

As metaheurísticas proporcionam mecanismos adequados para sair dos ótimos locais, dado que os ótimos locais diferem muito dos ótimos globais, e dessa forma o impacto prático das melhorias dos resultados obtidos com as metaheurísticas em relação às heurísticas tradicionais, pode ser observado através dos testes apresentados neste trabalho.

A análise foi baseada num processo de busca do primeiro melhor para o VNS e da combinação do primeiro melhor - melhor para o VND. As estratégias empregadas podem variar de acordo com o ponto de vista do investigador, porque como na implementação de qualquer metaheurística aplica-se a intuição mais que a dedução.

A busca em Vizinhança Variável proposta por (MLADENOVIC, 1995) cumpre com as propriedades básicas que deve ter toda metaheurística que são: simplicidade, coerência, eficiência, e robustez.

O métodos desenvolvidos pelas VNS e VND, com a implementação da heurística proposta por (GOSWAMI; BASU, 1992) para avaliar as chaves que serão trocadas, no processo de busca local nas estruturas de vizinhança, demonstrou ser muito eficiente, porque encontrou-se uma melhor configuração para o sistema testado de 135 barras (sistema real).

O método proposto para a reconfiguração de redes elétricas demonstrou ser muito eficiente, conseguindo encontrar um grande número de configurações de ótima qualidade. Para os sistemas de 14, 32, 69 barras foram encontradas configurações compatíveis com a literatura, embora para o sistema de 135 barras (sistema real) foram encontrados resultados iguais que o encontrado no algoritmo de Busca Tabu (DUARTE, 1999), e melhores que os encontrados pelos algoritmos de Tabu Search e Genetico Modificados propostos respectivamente, por (GUIMARÃES, 2005; ROMERO, 2001). Para o sistema de 202 barras com e sem limitação de chaves foram encontradas também configurações de melhor qualidade que o algoritmo Busca Tabu (GUIMARÃES, 2005).

Na alocação de chaves existentes na rede de 202 barras não se considera a possibilidade de obter melhorias do nível de perdas, porque a redução de perdas é mínima em relação às perdas obtidas quando se considera que todos os ramos têm chave. O que indica que

a simples instalação de algumas chaves em pontos estratégicos da rede pode melhorar o desempenho geral desse sistema, para planejamento da operação. Desta forma, sugere-se para o problema específico de redução de perdas a realocação das chaves existentes.

Sugere-se para futuros trabalhos de pesquisa estabelecer criterios e técnicas mais eficientes, com a finalidade de reduzir o tamanho do número de vizinhos visitados nas estruturas de vizinhança. Em outras palavras, a quantidade de vizinhos deve ser reduzido e, portanto, essa estratégia permite resolver um número menor de problemas de fluxo de carga.

Referências

- AARTS, E. H. L.; LENSTRA, J. K. *Local Search in Combinatorial Optimization*. 1st. ed. New York: Chichester [England], 1997.
- BARAN, M. E.; WU, F. F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 4, n. 2, p. 1401–1407, 1989.
- BARAN, M. E.; WU, F. F. Optimal sizing of capacitors placed on a radial distribution system. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 4, n. 1, p. 735–743, 1989.
- BOUCHARD, D. et al. Applications of hopfield neural-networks to distribution feeder reconfiguration. *IEEE*, , n. , p. 311–316, 1993.
- BRANDINI, A. C. *Análise Crítica de Algoritmos de Fluxo de Carga Usados em Sistemas de Distribuição Radial*. Dissertação (mestrado) — UNESP, Dezembro 2000.
- CHIANG, H. D.; JEAN-JUMEAU, R. Optimal network reconfigurations in distribution systems: Part 2: Solution algorithms and numerical results. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 5, n. 3, p. 1568–1574, 1990.
- CINVANLAR, S.; GRAINGER, J.; LEE, S. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction. *IEEE Transaction on Power Delivery*, v. 3, n. 3, p. 1217–1223, 1988.
- CÉSPEDES, R. New method for the analysis of distribution networks. *IEEE transactions on Power Delivery*, v. 5, n. 1, p. 39–396, 1990.
- DUARTE, M. A. Q. *Algoritmo de Busca Tabu Usado no Problema da Reconfiguração de Sistemas de Distribuição Radial*. Dissertação (mestrado) — UNESP, Brasil, Outubro 1999.
- ELGERD, O. *Introdução à Teoria de Sistemas de Energia Elétrica*. 2nd. ed. São Paulo: McGraw Hill do Brasil, 1978.
- GOSWAMI, S. K.; BASU, S. K. A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 7, n. 3, p. 1484–1491, 1992.
- GUIMARÃES, M. N. *Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando Algoritmos de Busca Tabu*. Dissertação (mestrado) — UNICAMP, Brasil, Abril 2005. .
- HANSEN, P.; MLADENOVIC, N. Variable neighborhood search for the p-median. *Location Science*, v. 5, p. 207–226, 1997.

- KASHEM, M. A.; GANAPATHY, V.; JASMON, G. B. Network reconfiguration for enhancement of voltage stability in distribution networks. *IEE Proc. - Gener. Transm. Distrib.*, v. 147, n. 3, p. 171–175, 2000.
- KIM, H.; KO, Y.; JUNG, K. H. Artificial neural-network based feeder reconfiguration for loss reduction in distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 8, n. 3, p. 1356–1366, 1993.
- LIN, H. C. C. W. M. A new approach for distribution feeder reconfiguration for loss reduction and service restoration. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 13, n. 3, p. 870–875, 1998.
- LIN, W. M.; CHENG, F. S.; TSAY, M. Distribution feeder reconfiguration with refined genetic algorithm. *IEE Proc. - Gener. Transm. Distrib.*, v. 147, n. 6, p. 349–354, 2000.
- LIU, C.; LEE, S.; VENKATA, S. An expert system operational aid for restoration and loss reduction of distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 3, n. 2, p. 619–626, 1988.
- MELIAN, B.; MORENO, J. A.; MORENO, J. M. Metaheuristics: A global view. *Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*, v. 1, n. 19, p. 7–28, 2003.
- MERLIN; BACK, G. Search for a minimal - loss operating spanning tree configuration in an urban power distribution system. In: *Of the Fifth Power System Conference*. Cambridge: [s.n.], 1975. p. 1–18.
- MLADENOVIC, N. Variable neighborhood algorithm: A new metaheuristic for combinatorial optimization. *Abstracts of papers presented at Optimization Days*, , n. 112, p. , 1995.
- MLADENOVIC., N.; HANSEN, P. Variable neighborhood search. *Computers and Operations Research*, 24, n. , p. 1097–1100, 1997.
- MONTICELLI, A. *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*. 2nd. ed. São Paulo: Edgar Blucher, 1983.
- NARA, K.; KITAGAWA, M. Distribution systems loss minimum re-configuration by simulated annealing method. In: *Advances in Power System Control, Operation and Management, International Conferencel*. Hong Kong: [s.n.], 1991. p. 461–466 vol.2.
- ROMERO, R. Reconfiguração de alimentadores em sistemas de distribuição de energia elétrica usando um algoritmo genético modificado. In: *Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*. Campos do Jordão: [s.n.], 2001. p. 551–560.
- SHIRMOHAMMADI, D. A. Compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 3, n. 2, p. , 1988.
- SHIRMOHAMMADI, D. A.; HONG, H. W. Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 4, n. 2, p. 1492–1498, 1989.

VENKATESH, B.; RANJAN, R.; GOOI, H. B. Optimal reconfiguration of radial distribution systems to maximize loadability. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 19, n. 1, p. 260–266, 2004.

YAGIURA, M.; IBARAKI, T. Local search en p. m. p. and m. g. c. In: *Handbook of Applied Optimization*. Oxford University: [s.n.], 2002.

APÊNDICE A – Dados dos Sistemas Testados

A.1 Sistema de 14 barras

Tabela 16: Dados sistema de 14 barras.

<i>Ramo</i>	<i>De</i>	<i>Para</i>	<i>Resistência do ramo (pu)</i>	<i>Reatância do ramo (pu)</i>	<i>Carga barra final (MW)</i>	<i>Carga barra final (MVAr)</i>	<i>Capacitor barra final (MVAr)</i>
1	1	2	0,08	0,10	2,0	1,6	0,0
2	2	3	0,08	0,11	3,0	1,5	1,1
3	2	4	0,09	0,18	2,0	0,8	1,2
4	4	5	0,04	0,04	1,5	1,2	0,0
5	1	6	0,11	0,11	4,0	2,7	0,0
6	6	7	0,08	0,11	5,0	3,0	1,2
7	6	8	0,11	0,11	1,0	0,9	0,0
8	7	9	0,11	0,11	0,6	0,1	0,6
9	7	10	0,08	0,11	4,5	2,0	3,7
10	1	11	0,11	0,11	1,0	0,9	0,0
11	11	12	0,09	0,12	1,0	0,7	1,8
12	11	13	0,08	0,11	1,0	0,9	0,0
13	13	14	0,04	0,04	2,1	1,0	1,8
14	3	9	0,04	0,04			
15	8	12	0,04	0,04			
16	5	14	0,09	0,12			

A.2 Sistema de 32 barras

Tabela 17: Dados sistema de 32 barras.

<i>Ramo</i>	<i>De</i>	<i>Para</i>	<i>Resistência do ramo (Ω)</i>	<i>Reatância do ramo (Ω)</i>	<i>Carga barra final (MW)</i>	<i>Carga barra final (MVar)</i>
1	1	2	0,0922	0,0470	100,0	60,0
2	2	3	0,4939	0,2511	90,0	40,0
3	3	4	0,3660	0,1864	120,0	80,0
4	4	5	0,3811	0,1941	60,0	30,0
5	5	6	0,8190	0,7070	60,0	20,0
6	6	7	0,1872	0,6188	200,0	100,0
7	7	8	0,7114	0,2351	200,0	100,0
8	8	9	1,0300	0,7400	60,0	20,0
9	9	10	1,0440	0,7400	60,0	20,0
10	10	11	0,1966	0,0650	45,0	30,0
11	11	12	0,3744	0,1238	60,0	35,0
12	12	13	1,4680	1,1550	60,0	35,0
13	13	14	0,5416	0,7129	120,0	80,0
14	14	15	0,5910	0,5260	60,0	10,0
15	15	16	0,7463	0,5450	60,0	20,0
16	16	17	1,2890	1,7210	60,0	20,0
17	17	18	0,7320	0,5450	90,0	40,0
18	2	19	0,1640	0,1565	90,0	40,0
19	19	20	1,5042	1,3554	90,0	40,0
20	20	21	0,4095	0,4784	90,0	40,0
21	21	22	0,7089	0,9373	90,0	40,0
22	3	23	0,4512	0,3083	90,0	50,0
23	23	24	0,8980	0,7091	420,0	200,0
24	24	25	0,8960	0,7011	420,0	200,0
25	6	26	0,2030	0,1034	60,0	25,0
26	26	27	0,2842	0,1447	60,0	25,0
27	27	28	1,0590	0,9337	60,0	20,0
28	28	29	0,8042	0,7006	120,0	70,0
29	29	30	0,5075	0,2585	200,0	600,0
30	30	31	0,9744	0,9630	150,0	70,0
31	31	32	0,3105	0,3619	210,0	100,0
32	32	33	0,3410	0,5301	60,0	40,0
33	8	21	2	2		
34	9	15	2	2		
35	12	22	2	2		
36	18	33	0,5	0,5		
37	25	29	0,5	0,5		

<i>Ramo</i>	<i>De</i>	<i>Para</i>	<i>Resistência do ramo (Ω)</i>	<i>Reatância do ramo (Ω)</i>	<i>Carga barra final (MW)</i>	<i>Carga barra final (MVAr)</i>
29	29	30	0,18954	0,09970	124,647	60,939
30	30	31	0,39803	0,20937	56,981	27,857
31	29	32	0,05675	0,05666	0,000	0,000
32	32	33	0,09477	0,04985	85,473	41,787
33	33	34	0,41699	0,21934	0,000	0,000
34	34	35	0,11372	0,05982	396,735	193,960
35	32	36	0,07566	0,07555	0,000	0,000
36	36	37	0,36960	0,19442	181,152	88,563
37	37	38	0,26536	0,13958	242,172	118,395
38	36	39	0,05675	0,05660	75,316	36,821
39	01	40	0,33205	0,76653	0,000	0,000
40	40	41	0,11819	0,27283	1,254	0,531
41	41	42	2,96288	1,01628	6,274	2,660
42	41	43	0,00188	0,00433	0,0000	0,0000
43	43	44	0,06941	0,16024	117,880	49,971
44	44	45	0,81502	0,42872	62,668	25,556
45	44	46	0,06378	0,14724	172,285	73,034
46	46	47	0,13132	0,30315	458,556	194,388
47	47	48	0,06191	0,14291	262,962	111,473
48	48	49	0,11444	0,26417	235,761	99,942
49	49	50	0,28374	0,28331	0,000	0,000
50	50	51	0,28374	0,28321	109,215	46,298
51	49	52	0,04502	0,10394	0,0000	0,0000
52	52	53	0,02626	0,06063	72,809	30,865
53	53	54	0,06003	0,13858	258,473	109,570
54	54	55	0,03002	0,06929	69,169	29,322
55	55	56	0,02064	0,04764	21,843	9,260
56	53	57	0,10881	0,25118	0,000	0,000
57	57	58	0,25588	0,13460	20,527	8,702
58	58	59	0,41699	0,21934	150,548	63,819
59	59	60	0,50228	0,26421	220,687	93,552

Segue ...

<i>Ramo</i>	<i>De</i>	<i>Para</i>	<i>Resistência do ramo (Ω)</i>	<i>Reatância do ramo (Ω)</i>	<i>Carga barra final (MW)</i>	<i>Carga barra final (MVAr)</i>
60	60	61	0,33170	0,17448	92,384	39,163
61	61	62	0,20849	0,10967	0,000	0,000
62	48	63	0,13882	0,32047	226,693	96,098
63	01	64	0,00750	0,01732	0,0000	0,0000
64	64	65	0,27014	0,62362	294,016	116,974
65	65	66	0,38270	0,88346	83,015	33,028
66	66	67	0,33018	0,76220	83,015	33,028
67	67	68	0,32830	0,75787	103,770	41,285
68	68	69	0,17072	0,39409	176,408	70,184
69	69	70	0,55914	0,29412	83,015	33,028
70	69	71	0,05816	0,13425	217,917	86,698
71	71	72	0,70130	0,36890	23,294	9,267
72	72	73	1,02352	0,53839	5,075	2,019
73	71	74	0,06754	0,15591	72,638	28,899
74	74	75	1,32352	0,45397	405,990	161,523
75	01	76	0,01126	0,02598	0,000	0,000
76	76	77	0,72976	1,68464	100,182	42,468
77	77	78	0,22512	0,51968	142,523	60,417
78	78	79	0,20824	0,48071	96,042	40,713
79	79	80	0,04690	0,10827	300,454	127,366
80	80	81	0,61950	0,61857	141,238	59,873
81	81	82	0,34049	0,33998	279,847	118,631
82	82	83	0,56962	0,29911	87,312	37,013
82	82	84	0,10877	0,10860	243,849	103,371
84	84	85	0,56862	0,29911	247,750	105,025
85	01	86	0,01126	0,02598	0,000	0,000
86	86	87	0,41835	0,96575	89,878	38,101
87	87	88	0,10499	0,13641	1137,280	482,108
88	87	89	0,43898	1,01338	458,339	194,296
89	89	90	0,07520	0,02579	385,197	163,290
90	90	91	0,07692	0,17756	0,000	0,000

Segue ...

<i>Ramo</i>	<i>De</i>	<i>Para</i>	<i>Resistência do ramo (Ω)</i>	<i>Reatância do ramo (Ω)</i>	<i>Carga barra final (MW)</i>	<i>Carga barra final (MVAr)</i>
91	91	92	0,33205	0,76653	79,608	33,747
92	92	93	0,08442	0,19488	87,312	37,013
93	93	94	0,13320	0,30748	0,000	0,000
94	94	95	0,29320	0,29276	74,001	31,370
95	95	96	0,21753	0,21721	232,050	98,369
96	96	97	0,26482	0,26443	141,819	60,119
97	94	98	0,10318	0,23819	0,000	0,000
98	98	99	0,13507	0,31181	76,449	32,408
99	01	100	0,00938	0,02165	0,000	0,000
100	100	101	0,16884	0,38976	51,322	21,756
101	101	102	0,11819	0,27283	59,874	25,381
102	102	103	2,28608	0,78414	9,065	3,843
103	102	104	0,45587	1,05236	2,092	0,887
104	104	105	0,69600	1,60669	16,254	0,531
105	105	106	0,45774	1,05669	1506,522	638,634
106	106	107	0,20298	0,26373	313,023	132,694
107	107	108	0,21348	0,27737	79,831	33,842
108	108	109	0,54967	0,28914	51,322	21,756
109	109	110	0,54019	0,28415	0,000	0,000
110	108	111	0,04550	0,05911	202,435	85,815
111	111	112	0,47385	0,24926	60,823	25,874
112	112	113	0,86241	0,45364	45,618	19,338
113	113	114	0,56862	0,29911	0,000	0,000
114	109	115	0,77711	0,40878	157,070	66,584
115	115	116	1,08038	0,56830	0,000	0,000
116	110	117	1,06633	0,57827	250,148	106,041
117	117	118	0,47385	0,24926	0,000	0,000
118	105	119	0,32267	0,74488	68,809	28,593
119	119	120	0,14633	0,33779	32,072	13,596
120	120	121	0,12382	0,28583	61,084	25,894
121	01	122	0,01126	0,02598	0,000	0,000

Segue ...

<i>Ramo</i>	<i>De</i>	<i>Para</i>	<i>Resistência do ramo (Ω)</i>	<i>Reatância do ramo (Ω)</i>	<i>Carga barra final (MW)</i>	<i>Carga barra final (MVAr)</i>
122	122	123	0,64910	1,49842	94,622	46,26
123	123	124	0,04502	0,10394	49,858	24,375
124	124	125	0,52640	0,18056	123,164	60,214
125	124	126	0,02064	0,04764	78,350	38,304
126	126	127	0,53071	0,27917	145,475	71,121
127	126	128	0,09755	0,22520	21,369	10,447
128	128	129	0,11819	0,27283	74,789	36,564
129	128	130	0,13882	0,32047	227,926	111,431
130	130	131	0,04315	0,09961	35,614	17,411
131	131	132	0,09192	0,21220	249,295	121,877
132	132	133	0,16134	0,37244	316,722	154,842
133	133	134	0,37832	0,37775	333,817	163,199
134	134	135	0,39724	0,39664	249,295	121,877
135	135	136	0,29276	0,29276	0,000	0,000
136	08	74	0,13132	0,30315		
137	10	25	0,26536	0,13958		
138	16	84	0,14187	0,14166		
139	39	136	0,08512	0,08499		
140	26	52	0,045502	0,10394		
141	51	97	0,14187	0,14166		
142	56	99	0,14187	0,14166		
143	63	121	0,03940	0,09094		
144	67	80	0,12944	0,29882		
145	80	132	0,01688	0,03898		
146	85	136	0,33170	0,17448		
147	92	105	0,14187	0,17166		
148	91	130	0,07692	0,17756		
149	91	104	0,07692	0,17756		
150	93	105	0,07692	0,17756		
151	93	133	0,07692	0,17756		
152	97	121	0,26482	0,26443		

Segue ...

<i>Ramo</i>	<i>De</i>	<i>Para</i>	<i>Resistência do ramo (Ω)</i>	<i>Reatância do ramo (Ω)</i>	<i>Status ramo</i>	<i>Barra</i>	<i>Carga barra final (kW)</i>	<i>Carga barra final (kVAr)</i>
29	54	55	0,011298	0,025392	2	29	51,00	31,60
30	5	8	0,018830	0,042320	2	30	95,63	59,25
31	9	6	0,018830	0,042320	2	31	95,63	59,25
32	10	13	0,018830	0,042320	2	32	0,00	0,00
33	14	21	0,037660	0,084640	2	33	350,63	217,26
34	27	26	0,024479	0,055016	2	34	350,63	217,26
35	15	12	0,059350	0,046540	2	35	0,00	0,00
36	11	17	0,093410	0,048900	2	36	95,63	59,25
37	16	11	0,046705	0,024450	2	37	63,75	39,50
38	28	29	0,065387	0,034230	2	38	0,00	0,00
39	36	38	0,037364	0,019560	2	39	0,00	0,00
40	39	37	0,037364	0,019560	2	40	0,00	0,00
41	48	46	0,037135	0,012663	2	41	255,00	158,01
42	49	47	0,037135	0,012663	2	42	0,00	0,00
43	58	55	0,074270	0,025325	2	43	191,25	118,51
44	56	57	0,103978	0,035455	2	44	95,63	59,25
45	59	60	0,015970	0,040950	2	45	0,00	0,00
46	62	63	0,041522	0,106470	2	46	605,63	375,27
47	63	65	0,019164	0,049140	2	47	63,75	39,50
48	70	71	0,111405	0,037988	2	48	0,00	0,00
49	72	73	0,081697	0,027858	2	49	0,00	0,00
50	70	75	0,020713	0,046552	2	50	573,75	355,52
51	75	77	0,011298	0,025392	2	51	191,25	118,52
52	77	79	0,007532	0,016928	2	52	255,00	158,01
53	93	94	0,056046	0,027924	2	53	765,00	474,03
54	94	95	0,028023	0,013962	2	54	255,00	158,01
55	95	96	0,028023	0,013962	2	55	0,00	0,00
56	96	97	0,028023	0,013962	2	56	318,75	197,51
57	97	98	0,051375	0,025597	2	57	318,75	197,51
58	79	81	0,009415	0,021160	2	58	0,00	0,00
59	84	85	0,013181	0,029624	2	59	0,00	0,00

Segue ...

<i>Ramo</i>	<i>De</i>	<i>Para</i>	<i>Resistência do ramo (Ω)</i>	<i>Reatância do ramo (Ω)</i>	<i>Status ramo</i>	<i>Barra</i>	<i>Carga barra final (kW)</i>	<i>Carga barra final (kVAr)</i>
122	176	178	0,003766	0,008464	2	122	0,00	0,00
123	178	179	0,003766	0,008464	2	123	76,50	47,40
124	179	180	0,005649	0,012696	2	124	255,00	158,01
125	182	183	0,046705	0,024450	2	125	191,25	118,51
126	182	185	0,005649	0,012696	2	126	255,00	158,01
127	185	186	0,005649	0,012696	2	127	233,75	144,84
128	186	187	0,005649	0,012696	2	128	573,75	355,52
129	187	190	0,005649	0,012696	2	129	276,25	171,18
130	190	193	0,022596	0,050784	2	130	255,00	158,01
131	193	194	0,065387	0,034230	2	131	393,13	243,60
132	193	195	0,046705	0,024450	2	132	510,00	316,02
133	195	196	0,046705	0,024450	2	133	0,00	0,00
134	196	197	0,046705	0,024450	2	134	0,00	0,00
135	197	200	0,046705	0,024450	2	135	0,00	0,00
136	200	201	0,112092	0,058680	2	136	0,00	0,00
137	200	202	0,093410	0,048900	2	137	0,00	0,00
138	193	198	0,009415	0,021160	2	138	0,00	0,00
139	198	199	0,009415	0,021160	2	139	63,75	39,50
140	137	138	0,009415	0,021160	2	140	0,00	0,00
141	133	134	0,069671	0,156584	2	141	63,75	39,50
142	161	164	0,011298	0,025392	2	142	38,25	23,70
143	147	148	0,074728	0,039120	2	143	38,25	23,70
144	148	145	0,056046	0,029340	2	144	0,00	0,00
145	151	150	0,046705	0,024450	2	145	0,00	0,00
146	144	141	0,028023	0,014670	2	146	0,00	0,00
147	157	153	0,037364	0,019560	2	147	0,00	0,00
148	166	170	0,065387	0,034230	2	148	63,75	39,50
149	175	177	0,074728	0,039120	2	149	95,63	59,25
150	181	184	0,060717	0,031785	2	150	63,75	39,50
151	189	192	0,050448	0,039559	2	151	0,00	0,00
152	188	191	0,038578	0,030251	2	152	0,00	0,00

Segue ...

<i>Ramo</i>	<i>De</i>	<i>Para</i>	<i>Resistência do ramo (Ω)</i>	<i>Reatância do ramo (Ω)</i>	<i>Status ramo</i>	<i>Barra</i>	<i>Carga barra final (kW)</i>	<i>Carga barra final (kVAr)</i>
153	146	149	0,037364	0,019560	2	153	63,75	39,50
154	1	2	0,000000	0,000000	1	154	63,75	39,50
155	1	133	0,000000	0,000000	1	155	212,50	131,68
156	134	135	0,000000	0,000000	1	156	63,75	39,50
157	138	147	0,000000	0,000000	1	157	0,00	0,00
158	146	145	0,000000	0,000000	1	158	0,00	0,00
159	148	151	0,000000	0,000000	1	159	63,75	39,50
160	138	139	0,000000	0,000000	1	160	38,25	23,70
161	140	144	0,000000	0,000000	1	161	63,75	39,50
162	152	157	0,000000	0,000000	1	162	0,00	0,00
163	164	162	0,000000	0,000000	1	163	95,63	59,25
164	162	163	0,000000	0,000000	1	164	0,00	0,00
165	165	170	0,000000	0,000000	1	165	0,00	0,00
166	169	171	0,000000	0,000000	1	166	605,63	375,27
167	176	175	0,000000	0,000000	1	167	446,25	276,52
168	180	182	0,000000	0,000000	1	168	191,25	118,51
169	182	181	0,000000	0,000000	1	169	255,00	158,01
170	190	188	0,000000	0,000000	1	170	0,00	0,00
171	190	189	0,000000	0,000000	1	171	63,75	39,50
172	8	9	0,000000	0,000000	1	172	127,50	79,01
173	10	16	0,000000	0,000000	1	173	63,75	39,50
174	10	15	0,000000	0,000000	1	174	191,68	118,77
175	13	14	0,000000	0,000000	1	175	0,00	0,00
176	22	23	0,000000	0,000000	1	176	0,00	0,00
177	25	28	0,000000	0,000000	1	177	208,25	129,04
178	35	38	0,000000	0,000000	1	178	191,68	118,77
179	35	39	0,000000	0,000000	1	179	127,50	79,01
180	25	27	0,000000	0,000000	1	180	127,50	79,01
181	45	48	0,000000	0,000000	1	181	0,00	0,00
182	45	49	0,000000	0,000000	1	182	0,00	0,00
183	58	56	0,000000	0,000000	1	183	255,00	158,01

Segue ...

<i>Ramo</i>	<i>De</i>	<i>Para</i>	<i>Resistência do ramo (Ω)</i>	<i>Reatância do ramo (Ω)</i>	<i>Status ramo</i>	<i>Barra</i>	<i>Carga barra final (kW)</i>	<i>Carga barra final (kVAr)</i>
184	1	59	0,000000	0,000000	1	184	127,50	79,01
185	61	62	0,000000	0,000000	1	185	850,00	526,70
186	65	66	0,000000	0,000000	1	186	127,50	79,01
187	67	68	0,000000	0,000000	1	187	510,00	316,02
188	63	64	0,000000	0,000000	1	188	0,00	0,00
189	70	74	0,000000	0,000000	1	189	0,00	0,00
190	75	78	0,000000	0,000000	1	190	0,00	0,00
191	79	83	0,000000	0,000000	1	191	127,50	79,01
192	79	90	0,000000	0,000000	1	192	448,38	277,83
193	91	89	0,000000	0,000000	1	193	255,00	158,01
194	91	93	0,000000	0,000000	1	194	510,00	316,02
195	99	100	0,000000	0,000000	1	195	382,50	237,02
196	102	104	0,000000	0,000000	1	196	255,00	158,01
197	109	110	0,000000	0,000000	1	197	191,25	118,51
198	114	113	0,000000	0,000000	1	198	446,25	276,52
199	122	123	0,000000	0,000000	1	199	133,88	82,96
200	122	124	0,000000	0,000000	1	200	95,63	59,25
201	84	82	0,000000	0,000000	1	201	382,50	237,02
202	4	136	0,000000	0,000000	0	202	1030,20	638,36
203	10	160	0,000000	0,000000	0			
204	17	172	0,000000	0,000000	0			
205	21	183	0,000000	0,000000	0			
206	25	194	0,000000	0,000000	0			
207	55	201	0,000000	0,000000	0			
208	2	59	0,000000	0,000000	0			
209	34	22	0,000000	0,000000	0			
210	57	41	0,000000	0,000000	0			
211	62	137	0,000000	0,000000	0			
212	108	162	0,000000	0,000000	0			
213	117	162	0,000000	0,000000	0			
214	126	165	0,000000	0,000000	0			

Segue ...

<i>Ramo</i>	<i>De</i>	<i>Para</i>	<i>Resistência do ramo (Ω)</i>	<i>Reatância do ramo (Ω)</i>	<i>Status ramo</i>	<i>Barra</i>	<i>Carga barra final (kW)</i>	<i>Carga barra final (kVAr)</i>
215	128	171	0,000000	0,000000	0			
216	132	202	0,000000	0,000000	0			
Fim da Tabela								

Status do ramo

1 - Indica a presença de chave seccionadora fechada

2 - Indica um ramo sem a presença de chave

0 - Indica a presença de uma chave de interconexão aberta

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)