

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**RECONFIGURAÇÃO DE ALIMENTADORES EM SISTEMAS
DE DISTRIBUIÇÃO USANDO A METAHEURÍSTICA GRASP**

MARLON BORGES CORREIA DE OLIVEIRA

Dissertação

Maio de 2011, Ilha Solteira - SP

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**RECONFIGURAÇÃO DE ALIMENTADORES EM SISTEMAS
DE DISTRIBUIÇÃO USANDO A METAHEURÍSTICA GRASP**

MARLON BORGES CORREIA DE OLIVEIRA

RUBÉN AUGUSTO ROMERO LÁZARO

Orientador

MARINA LAVORATO DE OLIVEIRA

Co-orientadora

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da UNESP, como parte dos requisitos para a obtenção do título de *Mestre em Engenharia Elétrica*.

Área de concentração: Automação.

Maio de 2011, Ilha Solteira – SP

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP - Ilha Solteira.

O48r	Oliveira, Marlon Borges Correia de. Reconfiguração de alimentadores em sistemas de distribuição usando a metaheurística GRASP / Marlon Borges Correia de Oliveira. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2011 86 f.: il. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2011 Orientador: Rubén Augusto Romero Lázaro Co-orientadora: Marina Lavorato de Oliveira Inclui bibliografia 1. Energia elétrica – Distribuição. 2. Reconfiguração de sistemas de distribuição. 3. Metaheurísticas. 4. GRASP (Sistema operacional de computador). 5. Operação de sistemas de distribuição.
------	--



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

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

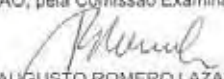
TÍTULO: Reconfiguração de Alimentadores em Sistemas de Distribuição usando a Metaheurística GRASP

AUTOR: MARLON BORGES CORREIA DE OLIVEIRA

ORIENTADOR: Prof. Dr. RUBEN AUGUSTO ROMERO LAZARO

CO-ORIENTADORA: Profa. Dra. MARINA LAVORATO DE OLIVEIRA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica,
Área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. RUBEN AUGUSTO ROMERO LAZARO
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. MARCOS JULIO RIDER FLORES
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. EDUARDO NOBUHIRO ASADA
Departamento de Engenharia Elétrica / Escola de Engenharia de São Carlos-Usp

Data da realização: 20 de maio de 2011.

*A Deus e Meishu-Sama que me deram
saúde e inteligência. E aos meus pais
que me incentivaram a chegar até aqui.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e a Meishu-Sama por dar a oportunidade de trabalhar com ótimas pessoas.

Agradeço à minha família por sempre me dar forças e me incentivar nesta etapa da minha vida.

Agradecimentos especiais ao professor Rubén Augusto Romero Lazaro, por ter aceitado a me orientar e ser dedicado a este trabalho. À doutora Marina Lavorato de Oliveira, pela dedicação e orientação no trabalho desenvolvido.

Agradeço aos colegas do LAPSEE pelo companheirismo. A todos os professores e funcionários do departamento de engenharia elétrica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira.

Agradeço aos meus amigos que me apoiaram em todas as dificuldades que passei durante a construção deste trabalho.

Agradeço a UNESP, ao departamento de Engenharia Elétrica da FEIS, pela estrutura oferecida para o desenvolvimento do trabalho. Ao CNPq pelo apoio financeiro.

*Quando todos os homens abrirem as
portas dos seus corações
desaparecerão as trevas que envolvem
este mundo.*

Meishu-Sama

RESUMO

Neste trabalho a metaheurística GRASP é utilizada para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica modelado como um problema de programação não linear binário misto. O objetivo é minimizar as perdas de potência ativa do sistema sujeito a restrições físicas e operacionais do sistema de distribuição. As variáveis binárias do problema representam a abertura e/ou fechamento de chaves de interconexão existentes nos ramos do sistema e as variáveis contínuas representam as tensões nodais e ângulos das tensões nodais. Na metodologia utilizada todas as chaves de interconexão do sistema de distribuição estão fechadas no início do processo e a cada passo da fase construtiva do GRASP um ramo é desconectado do sistema e um fluxo de carga é resolvido. Na fase de melhoria, tendo em vista que a solução da fase construtiva é um sistema radial, foi utilizado a cada iteração um fluxo de carga especializado para sistemas radiais. Para garantir que o sistema de distribuição opere de forma radial, foi introduzido na metodologia de solução uma rotina na qual é verificada a formação de laços e a conectividade do sistema em cada iteração das fases de construção e de melhoria local. São apresentados testes realizados utilizando os sistemas de 14, 33, 84,119 e 136 barras para avaliar a eficiência e robustez da metodologia proposta. Os resultados obtidos foram comparados aos resultados encontrados na literatura com o objetivo de validar a proposta deste trabalho.

Palavras-chave: Reconfiguração de sistemas de distribuição. Metaheurísticas. GRASP. Operação de sistemas de distribuição.

ABSTRACT

In this work the GRASP is used to solve the problem of reconfiguring systems for electricity distribution modeled as a nonlinear programming problem of binary mixture. The goal is to minimize the power losses of the system subject to physical constraints and operating the distribution system. The problem of binary variables represents the opening and/or closing braces interconnecting branches existing in the system and the continuous variables represent the nodal voltages and angles of nodal voltages. In the methodology used to interconnect all the keys of the distribution system are closed at the beginning of the process and every step of the constructive phase of GRASP a branch is disconnected from the system and a load flow is solved. In the improvement phase, given that the solution of the constructive phase is a radial system was used at each iteration a load flow for radial systems specialist. To ensure that the distribution system operates in a radial manner, was introduced into the solution methodology is a routine in which verified the formation of linkages and connectivity of the system in each iteration of the phases of construction and local improvement. Tests are presented using the systems 14, 33, 84, 119 and 136 bus to evaluate the efficiency and robustness of the proposed methodology. The results were compared to results from the literature in order to validate the proposal of this work.

Keywords: Reconfiguration of distribution systems. Metaheuristic. GRASP. Distribution system operation.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 4.1: PSEUDOCÓDIGO DA VERSÃO BÁSICA DA METAHEURÍSTICA GRASP (FEO; RESENDE, 1995).....	26
FIGURA 4.2: PSEUDOCÓDIGO DA FASE CONSTRUTIVA (FEO; RESENDE, 1995).....	27
FIGURA 4.3: PSEUDOCÓDIGO DE BUSCA LOCAL (FEO; RESENDE, 1995).....	28
FIGURA 4.4: SISTEMA DE 14 BARRAS MALHADO	30
FIGURA 4.5: REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA DE 14 BARRAS APÓS A PRIMEIRA ITERAÇÃO DA FASE CONSTRUTIVA DO GRASP.....	32
FIGURA 4.6: REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA DE 14 BARRAS APÓS A SEGUNDA ITERAÇÃO DA FASE CONSTRUTIVA DO GRASP.....	34
FIGURA 4.7: SISTEMA DE 14 BARRAS COM TOPOLOGIA RADIAL	35
FIGURA 4.8: RESULTADO DA FASE CONSTRUTIVA DO GRASP PARA O SISTEMA DE 14 BARRAS.	36
FIGURA 4.9: PRIMEIRA ITERAÇÃO DA FASE DE MELHORIA LOCAL DO GRASP PARA O SISTEMA DE 14 BARRAS ...	37
FIGURA 4.10: SEGUNDA ITERAÇÃO DA FASE DE MELHORIA LOCAL DO GRASP PARA O SISTEMA DE 14 BARRAS. ..	37
FIGURA 4.11: TERCEIRA ITERAÇÃO DA FASE DE MELHORIA LOCAL DO GRASP PARA O SISTEMA DE 14 BARRAS ...	38
FIGURA 4.12: QUARTA ITERAÇÃO DA FASE DE MELHORIA LOCAL DO GRASP PARA O SISTEMA DE 14 BARRAS	38
FIGURA 4.13: QUINTA ITERAÇÃO DA FASE DE MELHORIA LOCAL DO GRASP PARA O SISTEMA DE 14 BARRAS	39
FIGURA 4.14: SEXTA ITERAÇÃO DA FASE DE MELHORIA LOCAL DO GRASP PARA O SISTEMA DE 14 BARRAS	39
FIGURA 4.15: SÉTIMA ITERAÇÃO DA FASE DE MELHORIA LOCAL DO GRASP PARA O SISTEMA DE 14 BARRAS	40
FIGURA 4.16: OITAVA ITERAÇÃO DA FASE DE MELHORIA LOCAL DO GRASP PARA O SISTEMA DE 14 BARRAS	40
FIGURA 4.17: SISTEMA TESTE NÃO RADIAL.....	42
FIGURA 4.18: FLUXOGRAMA DO ALGORITMO QUE VERIFICA SE UM SISTEMA É RADIAL.....	45
FIGURA 5.1: REPRESENTAÇÃO DE DUAS BARRAS EM UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO.....	52
FIGURA 5.2: SISTEMA DE 14 BARRAS ANTES DA ORDENAÇÃO	54
FIGURA 5.3: SISTEMA DE 14 BARRAS APÓS A ORDENAÇÃO	54
FIGURA 6.1: SISTEMA DE 33 BARRAS.	56
FIGURA 6.2: NÍVEL DE TENSÃO ANTES E APÓS A RECONFIGURAÇÃO DO SISTEMA DE 33 BARRAS.....	57
FIGURA 6.3: SISTEMA DE 84 BARRAS.	58
FIGURA 6.4: NÍVEL DE TENSÃO ANTES E APÓS A RECONFIGURAÇÃO DO SISTEMA DE 84BARRAS	61
FIGURA 6.5: NÍVEL DE TENSÃO ANTES E APÓS A RECONFIGURAÇÃO DO SISTEMA DE 119 BARRAS.....	62
FIGURA 6.6: DESEMPENHO DO MÉTODO PARA O SISTEMA DE 119 BARRAS.....	63
FIGURA 6.7: NÍVEL DE TENSÃO ANTES E APÓS A RECONFIGURAÇÃO DO SISTEMA DE 136 BARRAS.....	65
FIGURA 6.8: DESEMPENHO DO MÉTODO PARA O SISTEMA DE 136 BARRAS.....	66

LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1 - FLUXO DE CARGA NOS RAMOS QUE PODEM SER RETIRADOS DO SISTEMA DE 14 BARRAS.	30
TABELA 4.2 - LISTA DOS RAMOS QUE ESTÃO ENTRE O INTERVALO IMPOSTO.	32
TABELA 4.3 - LISTA DOS RAMOS QUE PODEM SER RETIRADOS DO SISTEMA NA SEGUNDA ITERAÇÃO DA FASE CONSTRUTIVA.....	33
TABELA 4.4 - LISTA DOS RAMOS QUE SERÃO ESCOLHIDOS ALEATORIAMENTE PARA SAIR DO SISTEMA.	33
TABELA 4.5 - LISTA DOS RAMOS QUE PODEM SER RETIRADOS DO SISTEMA NA TERCEIRA ITERAÇÃO DA FASE CONSTRUTIVA.....	34
TABELA 4.6 - LISTA DOS RAMOS QUE ESTÃO DENTRO DO INTERVALO IMPOSTO.....	35
TABELA 5.1 - IDENTIFICAÇÃO DOS TIPOS DE BARRAS.....	47
TABELA 6.1 - RESULTADOS ENCONTRADOS PARA O SISTEMA DE 33 BARRAS.....	57
TABELA 6.2 - RESULTADOS OBTIDOS PARA O SISTEMA DE 84 BARRAS.	59
TABELA 6.3 - MODIFICAÇÃO DO PARÂMETRO ALFA.....	60
TABELA 6.4 - QUANTIDADE DE RAMOS QUE ENTRAM NA LISTA	60
TABELA 6.5 - RESULTADO OBTIDO PARA O SISTEMA DE 119 BARRAS.....	62
TABELA 6.6 - QUANTIDADE DE RAMOS QUE ENTRARÁ NA LISTA.....	64
TABELA 6.7 - RESULTADO OBTIDO PARA O SISTEMA DE 136 BARRAS.....	64
TABELA 6.8 - QUANTIDADE DE RAMOS QUE ENTRAM NA LISTA	67

SUMÁRIO

I-	INTRODUÇÃO	11
1.1	CONTRIBUIÇÕES.....	13
1.2	ORGANIZAÇÃO	13
II-	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	INTRODUÇÃO	14
2.2	METODOLOGIAS	14
2.2.1	<i>Heurísticas</i>	14
2.2.2	<i>Redes Neurais Artificiais</i>	16
2.2.3	<i>Otimização Clássica</i>	17
III-	METAHEURÍSTICAS	19
3.1	INTRODUÇÃO AS METAHEURÍSTICAS.....	19
3.2	ALGORITMO GENÉTICO	19
3.3	SIMULATED ANNEALING	20
3.4	COLÔNIA DE FORMIGAS	21
3.5	BUSCA TABU.....	22
IV-	RESOLUÇÃO DO PROBLEMA DE RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO....	25
4.1	UMA REVISÃO SOBRE A METAHEURÍSTICA GRASP	25
4.2	A METAHEURÍSTICA GRASP APLICADA A RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	28
4.2.1	<i>Fase de pré-processamento da metaheurística GRASP para o problema de reconfiguração</i>	29
4.3	FASE CONSTRUTIVA DO GRASP PARA O PROBLEMA DE RECONFIGURAÇÃO	30
4.4	FASE DE MELHORIA LOCAL DO GRASP PARA O PROBLEMA DE RECONFIGURAÇÃO	35
4.6	ALGORITMO PARA VERIFICAR SE A TOPOLOGIA DE UM SISTEMA É RADIAL.....	41
V-	PROBLEMA DE FLUXO DE CARGA.....	46
5.1	INTRODUÇÃO	46
5.2	FLUXO DE CARGA USANDO O MÉTODO DE NEWTON.....	48
5.3	FLUXO DE CARGA ESPECIALIZADO PARA SISTEMAS RADIAIS.	51
5.3.1	<i>Cálculo das Correntes de Barra</i>	51

5.3.2	<i>Cálculo das Tensões de Barra</i>	52
5.3.3	<i>Cálculo das Perdas de Potências Ativa e Reativa</i>	53
5.3.4	<i>Algoritmo</i>	53
VI-	RESULTADOS	56
6.1	SISTEMAS DE 33 BARRAS	56
6.2	SISTEMAS DE 84 BARRAS.	58
6.3	SISTEMAS DE 119 BARRAS.	61
6.4	SISTEMAS DE 136 BARRAS.	64
VII	CONCLUSÕES	68
7.1	TRABALHOS FUTUROS	68
	REFERÊNCIAS	69
	APÊNDICE A	74
A1	SISTEMA DE 14 BARRAS	74
A2	SISTEMA DE 33 BARRAS	75
A3	SISTEMA DE 84 BARRAS	76
A4	SISTEMA DE 119 BARRAS	79
A4	SISTEMA DE 136 BARRAS	83

I- INTRODUÇÃO

A reconfiguração de um sistema de distribuição de energia elétrica consiste em modificar a topologia do sistema através da abertura ou fechamento das chaves de interconexão em pontos estratégicos. Este procedimento é normalmente utilizado para o isolamento de faltas, balanceamento de cargas entre alimentadores, melhoria dos níveis de tensão ou para minimização das perdas ativas do sistema.

Os sistemas de distribuição de energia elétrica possuem uma configuração malhada, porém operam com topologia radial. Um dos objetivos desta forma de operação é de diminuir o número de dispositivos de segurança para facilitar a operação da proteção do sistema (PEREIRA, 2010).

O problema de reconfiguração de sistema de distribuição de energia elétrica é combinatório e contém variáveis inteiras e contínuas e que pode ser modelado como um problema de programação não-linear inteiro misto, onde se deseja minimizar as perdas de potência ativa no sistema sujeito a restrições como limites de tensão nas barras do sistema, operação radial, balanço de potências ativa e reativa, número de chaves de interconexão por ramo, etc. A dimensão do problema é diretamente associada ao número de chaves de interconexão que existem no sistema, logo, se um sistema possui C chaves, o número de topologias possíveis para este sistema é de 2^C . A maioria dessas topologias não pode ser empregadas, por não satisfazerem as restrições de radialidade ou conter barras desconectadas (SCHMIDT et al., 2005).

Na literatura podem ser encontradas diferentes metodologias utilizadas para resolver o problema de reconfiguração, entre estas estão as heurísticas construtivas (MERLIN; BACK, 1975), metaheurísticas como algoritmos genéticos (NARA et al., 1992), simulated annealing (CHANG; KUO, 1994), busca tabu (GUIMARÃES; LORENZETI; CASTRO, 2004c), colônia de formigas (CHANG, 2008) e também os métodos clássicos como algoritmo *branch-and-bound* (ABUR, 1996a.).

Neste trabalho foi utilizada a metaheurística GRASP apresentada por Feo e Resende (1989) para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica. Não foram encontrados na literatura especializada trabalhos que resolvem o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição utilizando a metaheurística GRASP.

Esta metaheurística provém dos algoritmos heurísticos construtivos do tipo guloso, diferente da maioria das metaheurísticas que foram desenvolvidas a partir de fenômenos

naturais e biológicos, como por exemplo, algoritmos genéticos, colônia de formigas, simulated annealing entre outras.

O algoritmo GRASP possui duas fases de grande importância: a fase construtiva e a fase de melhoria local. A fase construtiva do GRASP proposto utiliza a heurística de Merlin e Back (1975), a qual se inicializa fechando todas as chaves de interconexão do sistema e a cada iteração uma das chaves do sistema é aberta até que uma topologia radial deste sistema seja encontrada. Como apresentado por Merlin e Back (1975) o indicador de sensibilidade utilizado na fase construtiva do GRASP são os fluxos de potência dos ramos do sistema. Para calcular os fluxos de potência nesta fase, onde o sistema ainda não é radial, foi utilizado o método de Newton-Raphson, apresentado por Monticelli (1983). Na fase de melhoria local do GRASP é utilizada a heurística de melhoria local apresentada por Carreno, Moreira e Romero (2007). Nesta fase são encontradas várias soluções para o problema, a melhor configuração encontrada é a que obtiver o menor valor de perda ativa no sistema. Como os sistemas encontrados nesta fase possuem topologia radial, o cálculo da perda ativa é efetuado a partir do ponto de operação calculado utilizando-se o método de fluxo de carga de varredura, proposto por Brandini (2000).

O algoritmo proposto também verifica se uma dada topologia representa um sistema desconexo contendo ilhas ou um sistema radial conexo. Este algoritmo é utilizado nas duas fases da metaheurística GRASP para garantir a radialidade e a conectividade do sistema. Sendo assim, soluções infactíveis nunca serão construídas pela fase construtiva e nunca serão avaliadas pela fase de melhoria local.

O objetivo deste trabalho é projetar e implementar computacionalmente uma metaheurística (algoritmo GRASP) para resolver o problema da reconfiguração de alimentadores em sistemas de distribuição radiais e avaliar o desempenho do algoritmo desenvolvido através de uma comparação com os resultados encontrados utilizando outras metaheurísticas já apresentadas na literatura especializada. O algoritmo GRASP é de fácil implementação e muito aplicado a problemas complexos que possuem varias restrições, pois constrói uma solução passo a passo a partir dos dados iniciais do sistema e das restrições do problema, evitando assim encontrar soluções infactíveis.

1.1 Contribuições

Apresentar uma metodologia eficiente para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica radiais utilizando a metaheurística GRASP na qual foi introduzida uma sub-rotina para avaliar as condições de radialidade do sistema a cada iteração com o objetivo de que sempre sejam encontradas soluções factíveis.

1.2 Organização

No capítulo 2 encontra-se a revisão bibliográfica, que descreve as principais heurísticas e métodos da otimização aplicados ao problema da reconfiguração. No capítulo 3 são descritas algumas metaheurísticas que foram utilizadas na literatura especializada para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica. No capítulo 4 é apresentada a metaheurística GRASP utilizada neste trabalho para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica e um exemplo didático para mostrar o funcionamento da metodologia. Uma breve introdução aos cálculos de fluxo de carga utilizados no algoritmo GRASP está descrita no capítulo 5. No capítulo 6 são apresentados os resultados obtidos pela metodologia proposta utilizando quatro sistemas existentes na literatura e uma análise relevante de cada sistema. No capítulo 7 está a conclusão final e perspectivas de trabalhos futuros. O apêndice A possui os dados dos quatro sistemas testados no capítulo 6 e do sistema utilizado como exemplo no capítulo 4.

II- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

A fim de diminuir as perdas ativas do sistema e melhorar as condições de estabilidade de tensão é resolvido o problema de reconfiguração do sistema de distribuição de energia elétrica. A reconfiguração é uma importante ferramenta para aumentar a confiabilidade do sistema de energia elétrica principalmente em momentos de alta demanda do sistema (PEREIRA, 2010).

A reconfiguração consiste na abertura e fechamento de chaves de interconexão que estão presentes nos ramos do sistema de energia elétrica. Com este método, as distribuidoras de energia elétrica melhoram os níveis de tensão nas linhas em tempo real com um custo mínimo. Há várias técnicas de solução do problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica. Elas diferem em relação ao tipo de estratégia utilizada na solução do problema. O problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica possui uma natureza combinatória, que depende do número de chaves existentes no sistema. Por isso é gasto um alto tempo computacional para encontrar as soluções ótimas ou quase ótimas.

Neste capítulo serão comentadas as principais propostas existentes na literatura, que tratam do problema da reconfiguração em sistemas de distribuição de energia elétrica. Os primeiros métodos utilizados para a reconfiguração dos sistemas de distribuição são as heurísticas, as redes neurais artificiais, métodos de otimização clássica e as metaheurísticas.

2.2 Metodologias

2.2.1 Heurísticas

Uma das primeiras propostas de resolução do problema de reconfiguração que aparece na literatura é do ano de 1975. Na época, utilizou-se uma heurística desenvolvida pelos pesquisadores franceses Merlin e Back. Os autores apresentaram duas metodologias para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição, a primeira metodologia é um algoritmo heurístico construtivo e a segunda metodologia utiliza uma técnica de otimização clássica (MERLIN; BACK, 1975).

O método Heurístico é mais eficiente do ponto de vista computacional e inicia-se fechando todas as chaves de interconexão existentes no sistema radial a fim de torná-lo

malhado. Logo após, resolve-se um problema de fluxo de carga e utilizando-se o ponto de operação encontrado, calcula-se o fluxo de potência aparente nos ramos deste sistema. O ramo que possui o menor fluxo de potência aparente tem sua chave de interconexão aberta finalizando uma iteração do algoritmo heurístico construtivo. Um novo problema de fluxo de carga é resolvido, novos fluxos de potência aparente são calculados, e então outra chave de interconexão do ramo que possui o menor fluxo de potência da configuração corrente é aberta. O algoritmo heurístico construtivo finaliza quando encontra um sistema com topologia radial.

Merlin e Back (1975) analisaram os resultados obtidos pela reconfiguração e observaram os seguintes aspectos positivos (BUENO, 2005):

- A obtenção de uma boa distribuição de potência entre os alimentadores;
- O aumento do período em que a rede atende o limite dos fluxos de potência, por consequência, adiamento da necessidade de investimento em expansão;
- Uma maior robustez em relação a falhas diante de emergências, a restauração do suprimento de energia a áreas escuras pode ser com um número pequeno de chaveamentos.

A partir dos resultados encontrados em 1975, notou-se que a reconfiguração de um sistema de distribuição de energia elétrica possui varias vantagens em termos econômicos e de facilidade operacional. Portanto, os pesquisadores começaram amplas pesquisas no setor de distribuição, desenvolvendo novas metodologias para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica.

Em 1988 foi proposta por Civanlar, Grainger e Lee (1988) outra heurística conhecida como “troca de ramos” (*branch-exchange*). Ao contrário da heurística de Merlin e Back (1975), Civanlar et al. (1988) propôs como solução inicial uma rede radial para o problema de reconfiguração. Neste método, o processo de busca proposto é o fechamento de uma chave de interconexão e a abertura de outra, com o propósito de manter a radialidade do sistema. Os autores sugerem um mecanismo de filtragem para eliminar os chaveamentos que não reduzem as perdas ativas do sistema. Este mecanismo é a dedução de uma expressão matemática, utilizada para encontrar a redução da perda de potência através da transferência de carga. Este mecanismo fornece qual a melhor chave a ser fechada e qual será aberta em um sistema a fim de diminuir as perdas da rede. O método realiza uma busca a procura de um melhor chaveamento sem a necessidade de resolver problemas de fluxo de carga adicionais, utilizando apenas uma equação (ZVIETCOVICH, 2006).

Na apresentação de Shimohammadi e Hong (1989) o algoritmo de Merlin e Back (1975) foi modificado com a inserção do limite de tensão nos barramentos, limite de correntes

nas linhas além de considerar no cálculo do fluxo de cargas as energias reativas. Mesmo com essas modificações o algoritmo calcula o fluxo de potência de uma rede com laços, o que não corresponde à condição normal de operação da rede.

Na apresentação de Goswami e Basu (1992) o algoritmo de Shimohammadi e Hong (1989) foi modificado, transformando-se em um novo método. Neste método em vez de fechar todas as chaves de interconexão do sistema, apenas uma chave é fechada para formar um único laço no sistema. Calcula-se o fluxo de potência do sistema para encontrar qual ramo do laço que possui o menor fluxo de potência e este ramo é retirado do sistema. Isto ocorre até o algoritmo percorrer todos os laços do sistema, desta forma o algoritmo de Goswami e Basu (1992) encontra melhores resultados do que Shimohammadi e Hong (1989) como mostrado por Guimarães (2005b).

Em 1989 os engenheiros Mesut E. Baran e Felix F. Wu propuseram modificações no algoritmo de Civanlar et al. (1988), formando uma nova metodologia (BARAN; WU, 1989). Nesta nova metodologia foi aprimorada a troca de ramos e formulado dois métodos para o cálculo de fluxo de carga específico para redes radiais. Estas modificações aceleraram a busca pela solução ótima com diferente grau de precisão. Após este trabalho, o problema de reconfiguração passou a ser reconhecido como sendo de natureza combinatória (BRAZ, 2010).

O método heurístico para a resolução do problema de reconfiguração consiste em dois algoritmos, o de abertura sequencial de chaves e o de troca de ramos. A partir deles os pesquisadores desenvolveram diferentes métodos, uns com poucas diferenças outros híbridos como Gomes et al. (2005). Este algoritmo híbrido possui duas etapas. Na primeira todas as chaves de interconexão são fechadas. Partindo de um critério de abertura baseado no aumento da perda total do sistema, as chaves são sucessivamente abertas tornando-o radial. A segunda etapa é o refinamento da primeira através do algoritmo de troca de ramos. Este algoritmo híbrido foi comparado com o método de Shimohammadi e Hong (1989) e com o método de Goswami e Basu (1992) obtendo resultados compatíveis ou de melhor qualidade.

2.2.2 Redes Neurais Artificiais

No ano de 1993 pesquisadores coreanos propuseram a resolução do problema de reconfiguração através de Redes Neurais Artificiais do tipo *Perceptron multicamadas*, descrita por Kim, Ko e Jung (1993). Este método tem a capacidade de controle em tempo real do sistema de distribuição, com relação a outros métodos. Esta rapidez é devido ao fato da rede neural ser treinada utilizando um conjunto de boas configurações para diferentes valores

de carregamento. Para diminuir o esforço computacional o sistema de distribuição foi dividido em três tipos, residencial, comercial e industrial, facilitando o treinamento da rede neural. Os autores testaram o método utilizando o sistema de 16 barras de Civanlar et al. (1988) encontrando resultados de boa qualidade.

Em 1996, Hayashi et al. (1996) propôs o uso da rede neural *Holpfield* para a resolução do problema de reconfiguração de sistema de distribuição. Em conjunto com a rede neural foram aplicados conhecimentos técnicos da engenharia. Desta forma o sistema opera dentro dos limites permitidos, mesmo após ocorrência de possíveis falhas. Foram realizados testes em dois sistemas reais de distribuição. Segundo os autores, o método foi capaz de encontrar resultados de boa qualidade e a sua eficácia foi comparada com um algoritmo *branch-and-bound*.

Em 2006 para resolver o problema de reconfiguração, Salazar, Gallego e Romero, (2006) apresentaram uma rede neural artificial do tipo *Perceptron Multicamadas*. Os autores aplicaram técnicas de agrupamento, associado a técnicas de validação para identificar as melhores topologias utilizadas no treinamento da rede neural. Isto possibilitou determinar boas topologias com baixo custo computacional e utilizando apenas uma rede neural durante a resolução do problema. Este método foi testado em dois sistemas o primeiro foi o sistema de 14 barras do Civanlar et al. (1988), o segundo foi um sistema real de 136 barras que representa uma parte do sistema de distribuição da cidade de três lagoas – MS.

2.2.3 Otimização Clássica

Apesar de que o problema de reconfiguração pode ser definido como um problema de Programação Linear Inteiro Misto após usar a técnica de relaxação. Os poucos exemplos disponíveis na literatura que resolvem o problema de reconfiguração utilizando técnicas de programação matemática misturadas com heurísticas está metodologia de resolução requer maior tempo computacional (SARFI; SALAMA; CHIKHANI, 1994).

Merlin e Back (1975) apresentam a resolução do problema de reconfiguração para um sistema de 10 barras, utilizando a técnica de programação inteira de *branch-and-bound*, encontrando uma configuração de boa qualidade com mínimas perdas.

No ano de 1990 o pesquisador Vlastimir Glamocanin resolveu o problema de reconfiguração, como um problema de transporte com custos quadráticos (GLAMOCANIN, 1990). Este método necessita de uma configuração inicial, que é obtida através da linearização das perdas. A partir desta configuração é utilizado o método *Simplex* para problemas quadráticos, a fim de melhorar a solução. Várias modificações foram inseridas no problema

de transporte com custo quadrático como limites de tensão e correntes no sistema. Segundo o autor o método foi capaz de encontrar a solução ótima para o sistema de 10 barras (PEREIRA, 2010).

Abur (1996a, 1996b) apresentam uma formulação para o problema de reconfiguração como se fosse um problema de fluxo de custo mínimo do sistema de distribuição. Ignorando os limites de capacidade dos ramos o autor resolveu o problema utilizando o método de programação linear *Simplex*. Para satisfazer os limites da capacidade dos ramos o algoritmo Simplex foi modificado; segundo o autor, este algoritmo fornece um sistema radial, que não viola os limites de capacidade das linhas e diminui as perdas ativas do sistema. Abur (1996b) realizou testes com o sistema de 16 barras de Civanlar et al. (1988) e Abur (1996a) realizou testes em um sistema de 10 barras. Dois tipos de simulações foram realizados, um considerando os limites de corrente nos ramos do sistema e outro sem limites de correntes.

III- METAHEURÍSTICAS

3.1 Introdução as Metaheurísticas

A metaheurística é um conjunto de conceitos que normalmente utiliza métodos heurísticos aplicáveis a diversos tipos de problemas. A metaheurística teve seu início em 1951, com os trabalhos de Robbins e Monro (1951) que apresentam métodos estocásticos de otimização, mas o termo metaheurística foi apresentado pela primeira vez em 1986 por Glover (1986). A partir de então surgiram várias propostas de bons procedimentos para resolver problemas que ampliam o campo de aplicação dos algoritmos heurísticos. As aplicações e a relevância das metaheurísticas vêm aumentando desde 1986, sendo que se encontram trabalhos usando metaheurísticas realizados na década de setenta.

Dentre as metaheurísticas que vem sendo utilizadas para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição encontram-se os algoritmos genéticos (NARA et al., 1992) e (ZHU, 2002), simulated annealing (CHIANG; JEAN-JUMEAU, 1990a, 1990b), colônia de formigas (CHANG, 2008), e o algoritmo de busca tabu (GUIMARÃES; LORENZETI; CASTRO, 2004c).

3.2 Algoritmo Genético

Em 1975 o pesquisador John H. Holland apresentou uma metaheurística que utiliza mecanismo da evolução e da genética natural publicando o livro (HOLLAND, 1975). Esta metaheurística recebeu o nome de Algoritmo Genético, por projetar sistemas artificiais com propriedades similares aos sistemas naturais.

O algoritmo genético tem o conceito da evolução da espécie, aonde sobrevive o indivíduo geneticamente melhor adaptado para superar os problemas do meio ambiente. Dentro do algoritmo genético existe um número de indivíduos (população), cada um destes é uma solução, que competem entre si para sobreviver. A solução melhor adaptada geneticamente tem uma maior probabilidade de gerar novos indivíduos, contribuindo com o aprimoramento da população. O operador de recombinação ou de cruzamento é responsável pela geração de novos indivíduos. Basicamente realiza-se a troca de fragmentos entre dois indivíduos previamente selecionados, combinando características dos mesmos. E através do operador de mutação são realizadas pequenas alterações em um indivíduo da população, utilizando uma probabilidade.

É associado a cada indivíduo da população um determinado valor numérico para identificar a qualidade deste indivíduo, este valor numérico é chamado de função objetivo. Desta forma os indivíduos com uma boa função objetivo se prevalecem dos demais, permitindo uma melhoria crescente na qualidade da população. Uma das características mais importantes dos algoritmos genéticos é a manipulação de diversas soluções ao mesmo tempo. Com esta característica a metaheurística tem a capacidade de explorar com mais eficiência o espaço de busca, tornando o método mais robusto e encontrando uma solução de boa qualidade (GUIMARÃES, 2009a).

A aplicação do algoritmo genético no problema de reconfiguração pode ser visto nos trabalhos de Nara et al. (1992) e Zhu (2002). Ambos os trabalhos descrevem um indivíduo do algoritmo genético como sendo uma solução para o problema de reconfiguração. A população inicial é escolhida aleatoriamente para ambos os trabalhos. Nara et al. (1992) apresenta a recombinação em duas etapas, enquanto Zhu (2002), em apenas uma etapa, garantindo a agilidade do método. A mutação é adaptativa, segundo Zhu (2002), e isto foi implementado para evitar a convergência prematura, obrigando o método a convergir de maneira suave. No trabalho de Nara et al. (1992) o algoritmo foi testado com um sistema de escala média de 106 chaves e um sistema real de 1.692 chaves. No trabalho de Zhu (2002), o algoritmo foi testado no sistema de 14 e 33 barras bastante conhecido na literatura.

3.3 Simulated Annealing

A metaheurística simulated annealing foi desenvolvida na década de 50 pelo pesquisador Metropolis para o processo de cristalização (GUIMARÃES, 2009a). Mas apenas na década de 80 é que os pesquisadores, Kirkpatrick et al. (1983) e Cerny (1985) independentemente notaram semelhanças entre o processo físico de cristalização e alguns problemas de otimização combinatória.

Annealing é um tratamento térmico, utilizado pelos físicos na construção de cristais perfeitos. Aonde um material é exposto a altas temperaturas até o ponto de liquefação e logo após é lentamente esfriado, mantendo durante o processo o chamado quase equilíbrio termodinâmico. O processo termina quando o material atinge um estado de energia mínimo, no qual se transforma em um cristal perfeito.

O algoritmo simulated annealing simula um processo semelhante ao annealing, para encontrar a configuração ótima de um problema complexo. Os pesquisadores observaram que a mudança do estado físico do material, pode ser comparada ao espaço de solução de um problema de otimização. A energia livre do material é comparada com a função objetivo do

problema e a temperatura do processo físico se torna simplesmente um parâmetro de controle a ser determinado para conseguir os resultados desejados.

Este método apresenta duas características fundamentais que são a escolha do vizinho mais interessante e o controle no processo de transição. O algoritmo escolhe um vizinho mais interessante baseando-se no processo de annealing. Se este vizinho for de melhor qualidade é feita a transição e ele será a nova topologia corrente. Em caso contrário a escolha de um vizinho de pior qualidade é controlada por dois parâmetros que são a temperatura e a variação da função objetivo. Se a variação da função objetivo for pequena e/ou a temperatura for alta, aumenta a probabilidade de escolher uma solução de menor qualidade. Esta probabilidade diminui durante o processo chegando ao final realizando apenas transições para topologias vizinhas de melhor qualidade. Com esta lógica o método percorre uma grande área do conjunto solução e permite que o algoritmo saia dos ótimos locais.

Em 1990, os pesquisadores Hsiao Dong Chiang e René Jean Jumeau publicaram um trabalho dividido em duas partes (CHIANG; JEAN-JUMEAU, 1990a, 1990b), que utiliza a metaheurística simulated annealing para resolver o problema de reconfiguração. Na primeira parte do trabalho os autores tratam da formulação e da metodologia de solução e na segunda parte é tratado o algoritmo e demonstrado uma aplicação em um sistema de 69 barras. Os autores modificaram a metaheurística, inserindo nesta uma função para monitorar as restrições impostas pelo problema de reconfiguração.

Chang e Kuo (1994) utilizam a metaheurística simulated annealing na resolução do problema de reconfiguração. Neste trabalho foi apresentado um cálculo da perda aproximada do sistema em conjunto com uma perturbação eficiente da temperatura. Esses fatores segundo o autor deixam o método com menor tempo computacional. Este método foi testado em três sistemas diferentes de 14, 33 e 70 barras.

3.4 Colônia de Formigas

Em 1992 surgiu uma nova metaheurística chamada colônia de formigas ou ACO do inglês *ant colony optimization*. Como o próprio nome já diz esta metaheurística descreve o comportamento de uma colônia de formigas, utilizando este comportamento para resolver problemas complexos. Observando o comportamento de uma colônia de formigas, nota-se que esta é governada por uma inteligência maior do que a esperada para simples insetos. As formigas são capazes de selecionar o menor caminho para uma determinada fonte de alimento de forma cooperativa, utilizando uma substância chamada feromônio (PEREIRA, 2010). Esta técnica empregada pelas formigas foi que deu a origem a esta metaheurística.

Esta metaheurística surgiu em 1992, no Ph.D. de Marco Dorigo, mais somente no ano de 1996 foi publicado (DORIGO; MANIEZZO; COLORNI, 1996) onde a metaheurística foi apresentada. Nesta metaheurística são espalhadas formigas artificiais (chamadas de agentes) dentro do conjunto de soluções que cooperam entre si para encontrar soluções “ótimas” para problemas de otimização discretos e complexos. No trabalho de Dorigo et al. (1996) para demonstrar a eficiência do método, os autores resolveram um problema clássico de otimização, o problema do caixeiro viajante, onde foi inserido uma população de agentes com orientações diversas, dirigidas por uma força gananciosa (feromônio). Os agentes escolhem o caminho que possui a maior quantidade de feromônio e quando o caminho é escolhido a quantidade de feromônio neste é reforçada. Desta forma os agentes interagem indicando o melhor *tour* possível para o problema. Os autores compararam o método com as metaheurísticas simulated annealing e busca tabu para a resolução de problemas de otimização.

No ano de 2008, o trabalho de Chang (2008) utilizou a metaheurística colônia de formigas para os problemas de alocação de bancos de capacitores e reconfiguração de sistemas de distribuição. Para isso o espaço de busca foi composto por pontos que representam as barras do sistema e os bancos de capacitores relativos a cada barra. O problema foi dividido em duas partes. Na primeira parte é realizada uma busca para a escolha do banco de capacitores que será adicionado a cada barra. Esta busca se baseia na concentração de feromônio de cada banco de capacitores e no custo de instalação deste banco. Na segunda parte é realizada a reconfiguração do sistema que encontra-se com todas as chaves de interconexão fechadas. A busca baseia-se no feromônio de cada chave e no inverso do comprimento da linha onde a chave está alocada. Desta forma as formigas artificiais escolhem quais chaves devem ser abertas para formar uma topologia radial. O método foi aplicado em dois sistemas de distribuição de 16 e 94 barras.

3.5 Busca Tabu

Na década de 80 surgiu o algoritmo busca tabu, uma nova metaheurística proposta pelo pesquisador Fred Glover. Este novo método possui conceitos de inteligência artificial, com conjuntos de funções que de forma integrada, permitem resolver um problema complexo de maneira inteligente. Este método se difere dos outros por não ter uma origem relacionada com processo de otimização biológico ou químico (LUCERO, 2003).

Este método consiste em guiar e modificar outras heurísticas, de modo a produzir soluções além das que seriam geradas normalmente em uma busca local. Inicialmente o

método parte de uma solução inicial e progride iterativamente de uma solução para outra até satisfazer algum critério de parada. Cada solução pertencente ao conjunto solução do problema tem associada uma vizinhança dentro do mesmo conjunto. Nesta vizinhança é realizada uma busca para encontrar uma solução de melhor qualidade, esta operação é chamada de *movimento*.

A solução final obtida utilizando este método é chamada de ótimo local por ser a melhor de todas as soluções dentro da vizinhança. Como consequência, na maioria dos casos não se encontra o ótimo global do conjunto solução. O algoritmo de busca tabu se distingue dos algoritmos de busca local por dois aspectos fundamentais (GUIMARÃES, 2005b). O primeiro aspecto trata-se do processo de *movimento*, basicamente na passagem da solução corrente para a próxima solução. Esta nova solução pode ter a melhor configuração da vizinhança ou a melhor dentre as visitadas, o que indica que o método permite uma degradação de qualidade. Com isto o algoritmo pode sair de ótimos locais e continuar uma procura por um melhor resultado.

O segundo aspecto trata-se do conjunto de vizinhanças, que não são caracterizados de maneira estática. São definidas novas estruturas de vizinhanças, que variam dinamicamente de tamanho durante o processo de otimização. Com esta estratégia quando o algoritmo não encontrar uma boa solução dentro da vizinhança esta pode se expandir, realizando uma busca eficiente e inteligente no conjunto solução do problema.

Neste método é realizada uma lista tabu com os atributos das configurações já visitadas que são considerados proibidos. Esses atributos são considerados proibidos para impedir o retorno a uma configuração já visitada evitando a ciclagem. Esta operação causa um problema, se for encontrada uma solução de boa qualidade e que possui atributos proibidos o algoritmo não poderá utilizar esta solução. Para evitar este problema é utilizada uma função do algoritmo chamada critério de aspiração, aonde se pode eliminar o processo de proibição de uma solução candidata caso esta satisfaça a um determinado critério de aspiração.

Guimarães, Lorenzetti e Castro (2004c) apresentaram a resolução do problema de reconfiguração utilizando a metaheurística busca tabu. O método aplicado tem uma memória de curto prazo e as transições dentro do espaço de busca são determinadas. O algoritmo armazena na memória, apenas os resultados que obtiveram significativos ganhos, desta forma, reduz o esforço computacional. Os atributos são armazenados em uma lista tabu, aonde deve ser definido no algoritmo o número de iterações que o atributo permanece proibido. Este algoritmo utiliza um critério de aspiração que retira os atributos da lista tabu caso esses

atributos forneçam a melhor função objetivo. Este método foi aplicado em dois sistemas de distribuição 14 e 136 barras.

IV- RESOLUÇÃO DO PROBLEMA DE RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

4.1 Uma revisão sobre a metaheurística GRASP

GRASP do inglês, *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*, é uma metaheurística baseada em um algoritmo heurístico construtivo do tipo guloso, porém que utiliza uma componente aleatória e adaptativa. Esta metaheurística é utilizada para resolver problemas complexos e de grande porte. Ela foi apresentada por Thomas A. Feo e Mauricio G. C. Resende (1989).

A metaheurística GRASP é basicamente uma evolução dos algoritmos heurísticos construtivos. Um algoritmo heurístico construtivo tem como finalidade construir uma solução factível passo a passo utilizando um indicador de sensibilidade para indicar qual a melhor componente para ser introduzida na solução. A principal diferença destas duas metodologias é a aleatoriedade que o algoritmo GRASP possui para escolher uma componente que será adicionada à solução. A escolha aleatória dessa componente tem a finalidade de atender o caráter guloso do algoritmo heurístico construtivo e também a aplicação dessa metodologia permite encontrar muitas soluções factíveis e de boa qualidade.

A metaheurística GRASP, conforme Figura 4.1, pode ser dividida em quatro fases:

Procedure GRASP;

1ª Fase: Realizar a leitura dos dados do problema e definir o conjunto de variáveis e a solução incumbente inicial do problema.

1. $f^* \leftarrow \infty; x^* \leftarrow \emptyset;$

2. Ler os dados do problema;

3. **Para** $k= 1, \dots, MaxIter$ **Faça;**

2ª Fase: Realizar a construção de uma solução utilizando componentes aleatórias.

4. Construir uma função aleatória x (fase de construção);

3ª Fase: Realizar uma melhoria da solução encontrada na fase construtiva.

5. Encontrar y aplicando busca local a x (fase de busca local);

6. **Se** $f(y) < f^*$ **Então**

7. $x^* \leftarrow y; f^* \leftarrow f(y);$

8. **Fim_Se**

4ª Fase: Definir um número máximo de iterações realizadas pelo GRASP.

9. **Fim_Para**

10. Retorna x^*

Fim GRASP

Figura 4.1: Pseudocódigo da versão básica da metaheurística GRASP (FEO; RESENDE, 1995)

Após a leitura dos dados do problema o processo de construção de uma solução é iniciado com a escolha de um indicador de sensibilidade que pode ser feita, por exemplo, a partir da solução de um problema de fluxo de carga. Esse indicador permite iniciar a fase construtiva do GRASP, porém a escolha de uma componente a ser introduzida na solução do problema dependerá também de um parâmetro alfa (α) que varia entre zero e um. Se $\alpha = 0$ tem-se um indicador de sensibilidade totalmente guloso e se tomar $\alpha = 1$ tem-se um indicador de sensibilidade totalmente aleatório. O valor de alfa dependerá exclusivamente da complexidade do problema. Assim passo a passo uma solução é construída.

A fase construtiva, conforme pseudocódigo da figura 4.2, pode ser descrita em 5 passos:

- 1º. Passo: Escolher a solução inicial que pode ser vazia ou não. Essa solução se transformará na solução corrente;
- 2º. Passo: Avaliar os elementos candidatos a entrar no conjunto solução do problema;
- 3º. Passo: Elaborar uma lista com as k variáveis mais atraentes, utilizando um indicador de sensibilidade;

- 4º. Passo: Escolher aleatoriamente uma variável da lista construída no passo 3 e atualizar o conjunto solução adicionando a variável escolhida;
- 5º. Passo: Verificar se o conjunto solução está completo; se isso ocorrer, tem-se então uma solução para o problema, terminando assim a fase construtiva. Se o conjunto solução for incompleto, voltar ao passo 2.

Procedure construtivo;

1. $x \leftarrow \emptyset$;
2. **Enquanto** x não for uma solução completa **Faça**
3. Avaliar os custos dos elementos candidatos;
4. Construir a lista restrita de candidatos;
5. Selecionar aleatoriamente um elemento s da lista restrita de candidatos;
6. $x \leftarrow x \cup \{s\}$;
7. **Fim_Enquanto**;
8. Retorna x ;

Fim construtivo

Figura 4.2: Pseudocódigo da fase construtiva (FEO; RESENDE, 1995)

Após a fase construtiva do algoritmo uma fase de busca local é realizada na solução corrente fornecida pela fase construtiva do GRASP. A solução fornecida pela fase construtiva é factível e de boa qualidade, no entanto, procura-se melhorá-la através de um algoritmo de otimização local, o qual consiste em fazer uma busca sistemática com o objetivo de encontrar uma solução factível de melhor qualidade que a solução corrente. Este algoritmo trabalha na vizinhança que circunda a solução fornecida pela fase construtiva de modo iterativo procurando uma melhor solução dentro desta vizinhança. Nesta fase é importante ter uma adequada estrutura de vizinhança, uma solução inicial factível e de boa qualidade e técnicas eficientes de busca. O algoritmo de otimização local, descrito no pseudocódigo (figura 4.3), normalmente contem os seguintes passos:

- 1º. Passo: Ler os dados da solução incumbente que é a solução encontrada na fase construtiva da metaheurística GRASP;
- 2º. Passo: Obter uma solução corrente dentro da vizinhança que circunda a solução incumbente;
- 3º. Passo: Se a solução corrente for melhor que a solução incumbente, a solução incumbente será alterada recebendo a solução corrente;

4º. Passo: Critério de parada. Se não for encontrada soluções vizinhas de melhor qualidade dentro da vizinhança que circunda a solução incumbente a fase de busca é finalizada. Caso contrário, volta-se ao passo 2.

Procedure Busca_Local; 1. Enquanto x não for solução localmente ótima Faça 2. Obter $x' \in N(x)$ tal que $f(x') < f(x)$; 3. $x \leftarrow x'$; 4. Fim_Enquanto; 5. Retornar x; Fim Busca_Local
--

Figura 4.3: Pseudocódigo de busca local (FEO; RESENDE, 1995).

Desta forma, foram mostradas passo a passo as fases que compõem a metaheurística GRASP. Pode-se dizer que esta metaheurística é de fácil aplicação, porém pode se tornar mais complexa ou não dependendo do problema a ser resolvido e das dimensões deste problema.

4.2 A Metaheurística GRASP Aplicada a Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica

Como dito anteriormente o GRASP é uma metaheurística construtiva, portanto a resolução de um problema deve ser iniciada partindo de um conjunto solução vazio ou incompleto. Quando a heurística é aplicada com uma visão de construção, esta tem como objetivo construir um sistema passo a passo escolhendo a cada iteração da fase de construtiva, de acordo com um indicador de sensibilidade, qual o ramo que seria conectado ao sistema, até que se encontre um sistema radial e conexo. Outra forma de aplicar uma heurística para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição, é iniciar a solução do problema partindo de um sistema totalmente malhado e a cada iteração da fase de construção desconectar um ramo do sistema de acordo com um indicador de sensibilidade, como apresentado por Merlin e Back (1975). Para isso, o sistema de distribuição que é radial é transformado em um sistema malhado no qual todas as chaves de interconexão existentes neste sistema são fechadas. Assim a metaheurística GRASP terá uma abordagem destrutiva,

pois ao invés de inserir em cada passo um ramo no conjunto solução, a cada passo um ramo será retirado até que o sistema malhado se transforme em um sistema radial e conexo.

Neste trabalho utilizou-se a abordagem destrutiva para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição. O índice de sensibilidade utilizado é o valor do menor fluxo de potência aparente existente nos ramos do sistema. Este índice de sensibilidade foi escolhido com o objetivo de não provocar grandes perturbações experimentais na distribuição de fluxos já que existem evidências de que as melhores soluções são aquelas que apresentam a menor distribuição dos fluxos de potência.

4.2.1 Fase de pré-processamento da metaheurística GRASP para o problema de reconfiguração

Nesta fase é realizada a leitura dos dados do sistema teste e onde são definidos o conjunto solução e a solução incumbente do problema que serão utilizados para iniciar a resolução deste problema. Para iniciar a resolução do problema de reconfiguração é necessário calcular os fluxos de potência aparente nos ramos do sistema. Para calcular os fluxos de potência aparente em cada ramo do sistema foi utilizado o método de Newton-Raphson. Este método será apresentado no capítulo 5. Estes fluxos de potência aparente nos ramos do sistema são os indicadores de sensibilidade que deve identificar o ramo que será desconectado do sistema.

A Figura 4.4 apresenta um sistema teste de 14 barras, o qual será utilizado para exemplificar a resolução de um problema de reconfiguração de sistemas de distribuição utilizando a metodologia proposta neste trabalho. A Tabela 4.1 apresenta os valores dos fluxos de potência aparente calculado a partir dos resultados obtidos através da solução de um problema de fluxo de carga utilizando o método de Newton-Raphson. Os valores dos fluxos são apresentados em ordem crescente. O ramo 7-10 não pode ser retirado do sistema, pois causaria problemas de ilhamento deixando a carga da barra 10 sem alimentação.

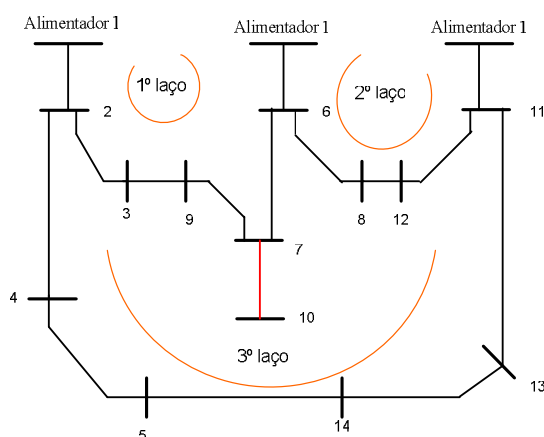


Figura 4.4: Sistema de 14 barras malhado

Tabela 4.1 - Fluxo de carga nos ramos que podem ser retirados do sistema de 14 barras.

Número de ramos	Barra de saída	Barra de chegada	Fluxo de Potência (KVA)
1	6	8	498,77
2	4	5	723,25
3	5	14	777,31
4	8	12	1.499,16
5	7	9	2.242,90
6	11	12	2.506,81
7	2	4	2.730,49
8	3	9	2.852,01
9	13	14	2.881,47
10	11	13	3.893,71
11	2	3	5.880,31
12	6	7	7.320,39
13	1	11	7.464,03
14	1	2	10.702,45
15	1	6	10.959,00

4.3 Fase construtiva do GRASP para o problema de reconfiguração

Na fase construtiva do algoritmo GRASP foi utilizado o algoritmo heurístico apresentado por Merlin e Back (1975). Como dito anteriormente a heurística é iniciada com todas as chaves seccionadoras do sistema de distribuição fechadas, transformando-o em um sistema com topologia malhada. De acordo com a topologia corrente do sistema são verificados quais os ramos que não podem ser retirados do sistema, pois causariam ilhamento no sistema elétrico. Em seguida, é calculado o fluxo de potência de cada ramo.

A escolha do ramo que será retirado do sistema na heurística de Merlin e Back (1975) sempre será o que possuir o menor valor de fluxo de potência aparente. Quando a heurística de Merlin e Back (1975) é aplicada na metaheurística GRASP, essa sofre uma pequena modificação no que diz respeito à escolha dos ramos que serão desconectados do sistema, pois na metaheurística uma lista de candidatos é criada com ramos que não possuem nenhum impedimento de serem retirados, e um destes é escolhido aleatoriamente. Esta lista é criada com os fluxos de potência aparente dos ramos que podem ser retirados e que possuem valores dentro do seguinte intervalo:

$$f^{min} \leq f_{ij} \leq f^{min} + \alpha(f^{max} - f^{min}) \quad (4.1)$$

onde:

- f^{min} é o menor fluxo de potência aparente da lista dos ramos que podem ser retirados;
- f^{max} é o maior fluxo de potência aparente da lista dos ramos que podem ser retirados;
- f_{ij} é o fluxo de potência aparente que sai do ramo ij que fará parte da lista de fluxos candidatos a serem retirados do sistema;
- α é um parâmetro que tem valores definidos no intervalo $[0;1]$.

O valor do parâmetro alfa é determinado de forma experimental a partir de simulações realizadas para diferentes valores α , se α for igual a 0 torna a fase construtiva do GRASP em uma heurística totalmente gulosa, isto é escolher somente o ramo que contém o menor fluxo de potência aparente dos ramos que podem ser retirados do sistema. Quanto o valor de α for igual a 1 a lista dos ramos que está dentro do intervalo e que podem ser retirados ira conter todos os ramos do sistema que podem ser retirados. Para o sistema de 14 barras foi utilizado um $\alpha = 0,1$.

Aplicando a equação (4.1) nos valores apresentados na tabela 4.1 tem-se a lista dos ramos que podem ser retirados do sistema e que estão dentro do intervalo imposto pela equação (4.1). A Tabela 4.2 apresenta a lista de ramos candidatos a ser desconectado do sistema e que estão dentro do intervalo imposto pela equação (4.1) e seus respectivos valores de fluxo de potência aparente.

Tabela 4.2 - Lista dos ramos que estão entre o intervalo imposto.

Número de ramos	Barra de saída	Barra de chegada	Fluxo de Potência (kVA)
1	6	8	498,77
2	4	5	723,25
3	5	14	777,31
4	8	12	1.499,16

Após a listagem dos elementos que podem ser retirados do sistema e que estão dentro do intervalo imposto, será escolhido aleatoriamente um elemento desta lista. Neste caso o elemento escolhido aleatoriamente foi o primeiro ramo da lista. Portanto, o sistema de 14 barras que possuía 3 laços agora possui apenas 2, porque o ramo 6 – 8 teve sua chave de interconexão aberta formando uma nova configuração para o sistema de 14 barras. Assim termina a primeira iteração da fase construtiva.

2ª Iteração da Fase Construtiva

A figura 4.5 apresenta a nova configuração do sistema de 14 barras na qual os ramos 7 – 10, 8 – 12 e 11 – 12 não podem ser desconectados e o ramo 6 – 8, que foi desconectado do sistema, é representado pela linha tracejada.

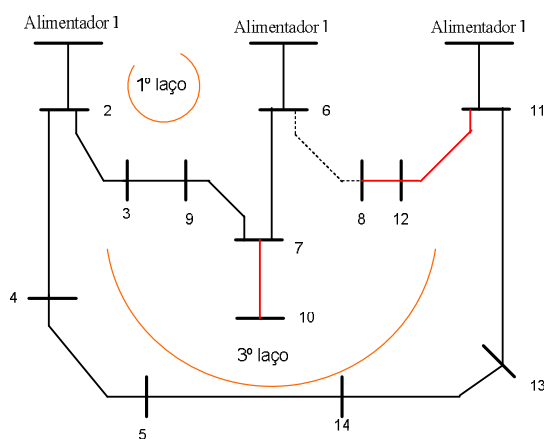


Figura 4.5: Representação do sistema de 14 barras após a primeira iteração da fase construtiva do GRASP

A partir da configuração apresentada na Figura 4.5 um problema de fluxo de carga é resolvido. Utilizando o resultado deste fluxo de carga, são calculados os fluxos de potência aparente nos ramos do sistema que são mostrados, em ordem crescente, na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Lista dos ramos que podem ser retirados do sistema na segunda iteração da fase construtiva.

Números de ramos	Barra de saída	Barra de chegada	Fluxo de carga (KVA)
1	4	5	627,01
2	5	14	873,44
3	7	9	2.356,03
4	2	4	2.633,71
5	3	9	2.966,24
6	13	14	2.977,96
7	11	13	3.990,49
8	2	3	5.995,64
9	1	11	7.050,82
10	6	7	7.206,24
11	1	2	10.721,41
12	1	6	11.354,47

Com os dados da Tabela 4.3 e utilizando a inequação (4.1) pode-se calcular o intervalo em que deverão estar contidos os valores dos fluxos de potência dos ramos candidatos a serem desligados do sistema. Assim tem-se que:

$$627,01 \leq f_{ij} \leq 627,01 + 0,1(11.354,47 - 627,01)$$

$$627,01 \leq f_{ij} \leq 1.699,75.$$

Dessa forma, obtém-se a tabela 4.4 onde são apresentados os ramos candidatos a sair do sistema.

Tabela 4.4 - Lista dos ramos que serão escolhidos aleatoriamente para sair do sistema.

Números de ramos	Barra de saída	Barra de chegada	Fluxo de carga (KVA)
1	4	5	627,01
2	5	14	873,44

Nessa simulação, o ramo 2 foi escolhido aleatoriamente para ser retirado do sistema, desfazendo assim mais um laço. A Figura 4.6 apresenta a nova configuração do sistema de 14 barras.

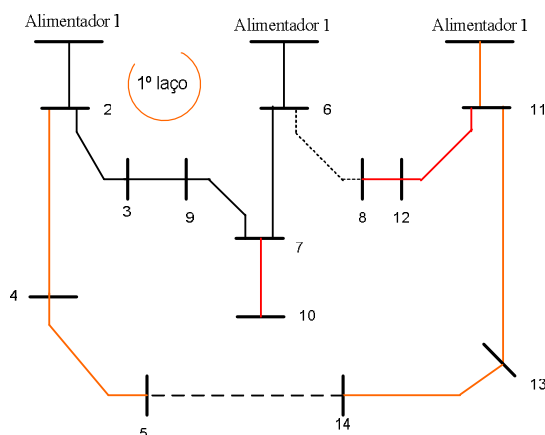


Figura 4.6: Representação do sistema de 14 barras após a segunda iteração da fase construtiva do GRASP

3ª Iteração da Fase Construtiva

Na topologia atual são identificados 8 ramos que não podem ser desconectados do sistema, que são os ramos 1 – 11, 2 – 4, 5 – 14, 7 – 10, 8 – 12, 11 – 12, 11 – 13 e 13 – 14. Novamente são calculados os fluxos de potência aparente de cada ramo que pode ser retirado do sistema. A Tabela 4.5 apresenta os valores dos fluxos de potência aparente dos ramos candidatos a sair do sistema da Figura 4.6.

Tabela 4.5 - Lista dos ramos que podem ser retirados do sistema na terceira iteração da fase construtiva.

Números de ramos	Barra de saída	Barra de chegada	Fluxo de Potência (KVA)
1	7	9	2.210,06
2	3	9	2.819,12
3	2	3	5.847,19
4	6	7	7.354,13
5	1	2	11.464,28
6	1	6	11.506,88

Utilizando a inequação (4.1), é calculado o intervalo em que deverão estar contidos os valores dos fluxos de potência dos ramos candidatos a serem desligados do sistema. Assim tem-se que:

$$2.210,06 \leq f_{ij} \leq 2.210,06 + 0,1(11.506,88 - 2.210,06)$$

$$627,01 \leq f_{ij} \leq 3.139,74.$$

Desta forma, monta-se a tabela 4.6 com os ramos que podem ser escolhidos de forma aleatória para sair do sistema. Nessa iteração o ramo escolhido aleatoriamente para ser

- **2º passo:** Retirar um ramo que está diretamente conectado ao ramo que foi introduzido no sistema;
- **3º passo:** Calcular as perdas da nova configuração e comparar com o valor da incumbente, caso o novo valor seja menor, atualizar a incumbente e a configuração do sistema e ir ao **passo 4**, caso contrário ir ao **passo 2**;
- **Passo 4** Introduzir o último ramo que foi retirado e retirar o próximo ramo que está diretamente conectado ao ramo introduzido e voltar ao passo 3. Se todos os ramos do laço já foram retirados ir para o **passo 1**.

Repetir os passos até que todos os laços do sistema tenham sido analisados.

Para calcular as perdas ativas do sistema foi utilizado um fluxo de carga de varredura (SHIRMOHAMMADI, 1988) que será mostrado no capítulo 5. As figuras 4.8, 4.9 e 4.10 ilustram os passos da heurística apresentada por Carreño, Moreira e Romero (2007) para o sistema de 14 barras descrito na fase construtiva do GRASP.

Para melhor compreensão, será apresentada a fase de busca local para o sistema teste de 14 barras apresentado por Carreño, Moreira e Romero (2007). A configuração mostrada na figura 4.11 é o resultado da fase construtiva do GRASP e possui perdas ativas de 483,86 KW.

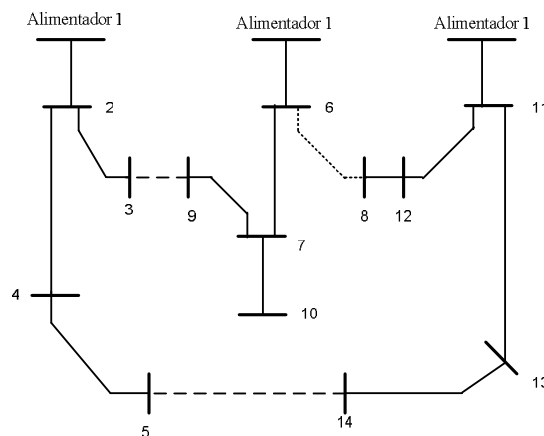


Figura 4.8: Resultado da fase construtiva do GRASP para o sistema de 14 barras.

O primeiro ramo a ser inserido para fechar o laço será o ramo (3 – 9), o ramo (2 – 3) será retirado, conforme figura 4.12.

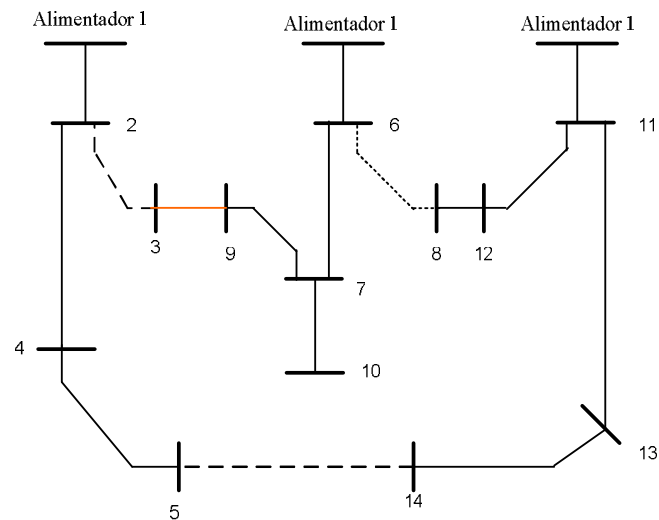


Figura 4.9: Primeira iteração da fase de melhoria local do GRASP para o sistema de 14 barras

Esta nova configuração tem-se um total de 639,54 KW de perdas ativas, logo, a busca será realizada do outro lado do ramo que formou esse laço. O ramo (2 – 3) volta a fazer parte do sistema e o ramo (9 – 7) é desconectado, como mostrado na figura 4.13.

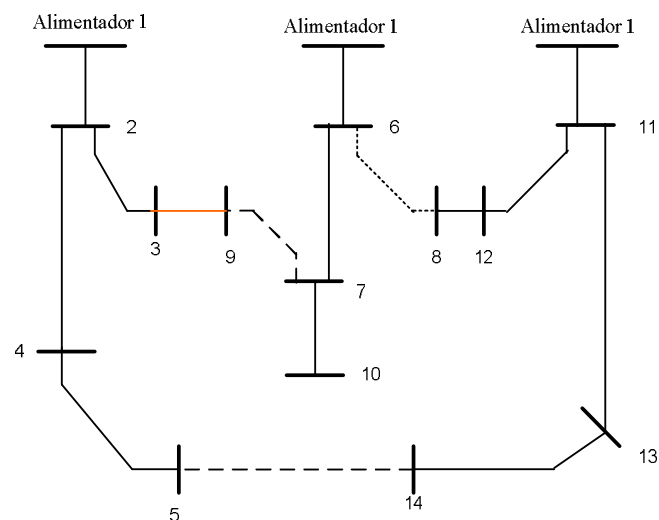


Figura 4.10: Segunda iteração da fase de melhoria local do GRASP para o sistema de 14 barras.

Com esta configuração obteve-se uma melhoria no valor das perdas ativas, que agora é de 466,10 KW. Logo, a solução incumbente é atualizada com a nova solução e a busca local nesse laço continua com a conexão do ramo 9 – 7 e a retirada do ramo 6 – 7, conforme apresentado na figura 4.14.

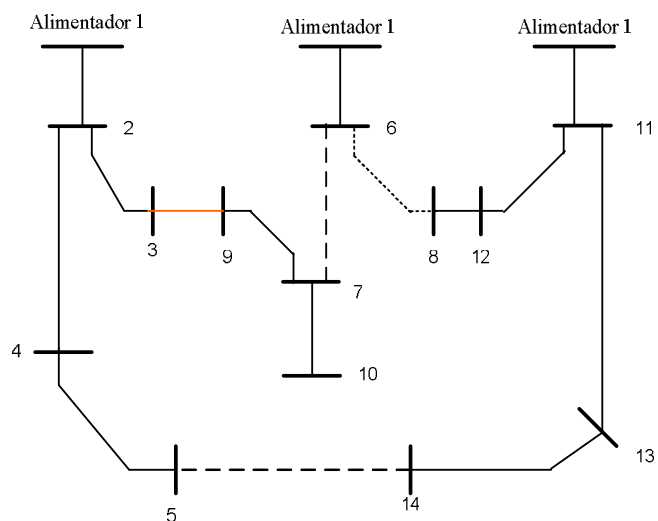


Figura 4.11: Terceira iteração da fase de melhoria local do GRASP para o sistema de 14 barras

Com essa configuração, o valor das perdas ativas é de 705,01 KW que é maior que o valor da incumbente. Neste caso a busca nesse laço é finalizada.

Novamente é inserido um ramo no sistema que foi retirado na fase construtiva formando assim um novo laço, como mostrado na figura 4.15.

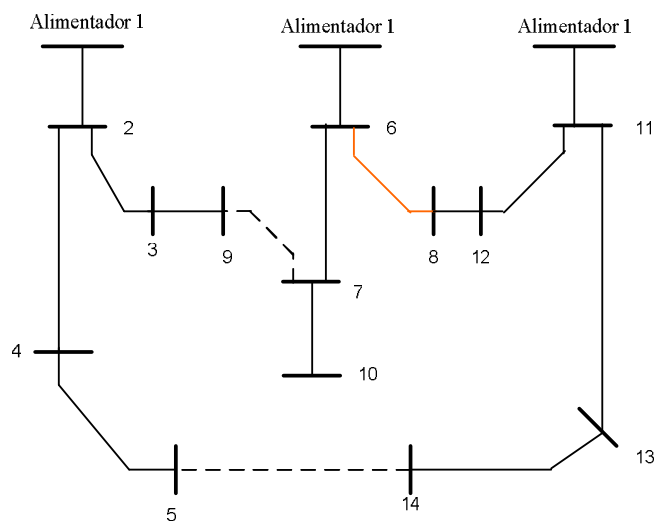


Figura 4.12: Quarta iteração da fase de melhoria local do GRASP para o sistema de 14 barras

A figura 4.16 mostra que o ramo 1 – 6 é desconectado do sistema, e o total de perdas ativas desta configuração é igual a 1.334,30 KW.

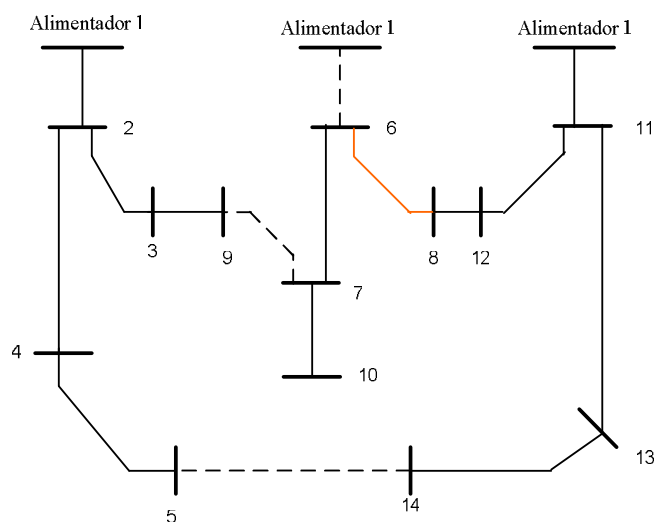


Figura 4.13: Quinta iteração da fase de melhoria local do GRASP para o sistema de 14 barras

Como o valor das perdas ativas para a configuração mostrada na figura 4.16 é maior que da solução incumbente, esta configuração é descartada. Assim, a busca será recomeçada a partir do ramo 8 – 12 como mostra a figura 4.17.

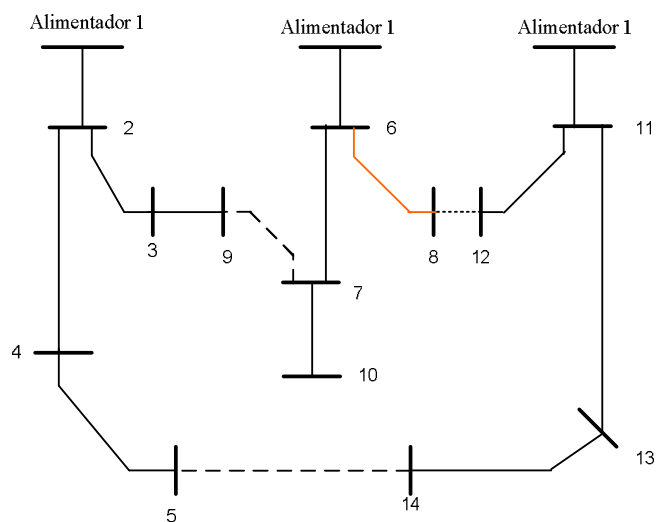


Figura 4.14: Sexta iteração da fase de melhoria local do GRASP para o sistema de 14 barras

As perdas ativas do sistema com a topologia da figura 4.17 é de 493,15 KW, portanto, como este valor é maior que o valor das perdas da solução incumbente, o restante do laço não necessita ser analisado. Neste caso, resta o terceiro laço para ser avaliado, onde o ramo 5 – 14 é então inserido no sistema e o ramo 4 – 5 é retirado. Esta nova configuração do sistema é apresentada na figura 4.18.

O total de perdas ativas encontrado para o sistema da figura 4.19 é igual a 492,80 KW, como este valor é maior que o da incumbente, esta configuração é descartada e a busca local é encerrada, pois todos os laços já foram analisados.

O melhor resultado encontrado para o sistema de 14 barras possui um total de perdas ativas igual a 466,10 KW e sua configuração é mostrada pela figura 4.13. Este resultado é apresentado na literatura como sendo a solução ótima para o sistema de 14 barras, (CARREÑO, MOREIRA e ROMERO, 2007).

4.6 Algoritmo para verificar se a topologia de um sistema é radial

Quando se resolve problemas relacionados aos sistemas de distribuição de energia elétrica duas restrições de operação deste tipo de sistema devem necessariamente ser satisfeitas: a) uma carga não pode ser alimentada por mais de uma subestação ou alimentador; b) o sistema tem que operar com configuração radial, (OLIVEIRA, 2010).

Desta forma foi introduzido no algoritmo GRASP uma sub-rotina que tem como objetivo detectar formação de laços no sistema de distribuição. Esta sub-rotina é utilizada na fase construtiva e na fase de melhoria local do GRASP.

Na fase construtiva, quando um ramo é retirado do sistema é necessário verificar a conectividade deste sistema, para isto é utilizada a sub-rotina de detecção de laços. Caso a retirada de um ramo resulte em uma barra desconectada do sistema, então este ramo retorna à configuração anterior e outro ramo é escolhido, de acordo com os critérios de sensibilidade, para ser retirado do sistema. Este procedimento é repetido para cada ramo escolhido na fase construtiva do GRASP.

Na fase de melhoria local, a mesma sub-rotina é utilizada para identificar os laços formados pelos ramos que foram desconectados na fase de construção e que são re-conectados na fase de busca local.

O algoritmo implementado detecta os conjuntos de barras formados quando o sistema possui um laço. Assim um conjunto A de barras é formado pelas barras de um sistema que estão interligadas, como mostra a figura 4.20 na qual existem dois conjuntos de barras. O conjunto A é formado pelas barras {1, 3 e 4} e o conjunto B é formado pelas barras {2, 5, 6 e 7}.

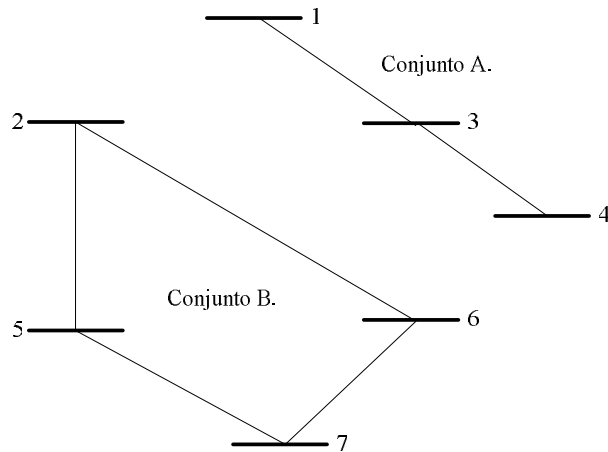


Figura 4.17: Sistema teste não radial

Para garantir a radialidade de um sistema de distribuição é necessário satisfazer duas condições: a) O número de ramos do sistema deve ser igual ao número de nós menos um; equação (4.2); e b) O sistema tem que ser conexo.

$$\text{NRS} = n_b - 1 \quad (4.2)$$

onde NRS é número de ramos do sistema, n_b é o número de barras do sistema.

Como pode ser observado na figura 4.20, a configuração apresentada satisfaz a condição “a” necessária para garantir a radialidade de um sistema, porém não suficiente. Porém a configuração apresentada na figura 4.20 não satisfaz a condição b também necessária para garantir a radialidade do sistema. Pode-se observar na figura 4.20 que as barras 1, 3 e 4 estão desconectadas do sistema, o que torna a operação do sistema ineficaz.

O objetivo do algoritmo apresentado nesta subseção é identificar como conjuntos, as parcelas ilhadas e os laços formados no sistema. Nota-se na figura 4.20 que o sistema está separado em dois conjuntos de barras: o conjunto A e o conjunto B.

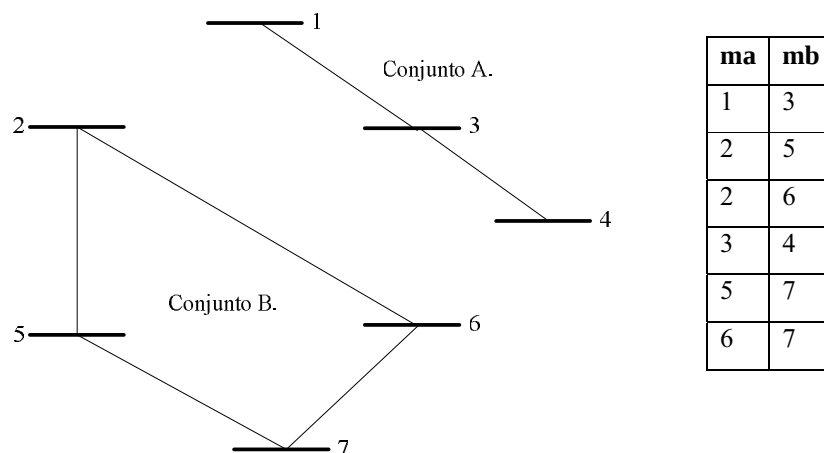
O algoritmo apresentado nesta subseção possui 3 passos principais:

- 1º. Passo: É realizada a leitura dos dados de ramos do sistema e que são armazenados nos vetores **ma** e **mb**, onde **ma** é o vetor que contém as barras de saída dos fluxos de potência e **mb** as barras de entrada dos fluxos de potência;
- 2º. Passo: É realizada a identificação dos conjuntos de barras do sistema que são armazenados no vetor **mr** cuja dimensão corresponde ao número de barras do sistema. Em outras palavras é identificado a qual conjunto cada barra pertence;

3º. Passo: São contabilizadas pelo contador **mar** quantas barras pertencem a um mesmo conjunto. O valor de **mar** é comunicado à fase de construtiva do GRASP onde é avaliado se **mar** = NRS, neste caso o sistema é radial, caso contrário existe laços no sistema. Por sua vez, ao final do processo iterativo o vetor **mr** fornece as barras que fazem parte dos conjuntos detectados.

Um exemplo numérico do algoritmo de verificação da radialidade de um sistema é apresentado para ilustrar melhor o funcionamento deste algoritmo.

1º Passo: São armazenados no vetor **ma** as barras de saída dos fluxos nos ramos do sistema e no vetor **mb** as barras de chegada dos fluxos nos ramos e vetor **mr** que armazena as identificação dos conjuntos de barras do sistema inicialmente **mr** recebe valor igual a zero.



Barras do sistema 1 2 3 4 5 6 7

mr	0	0	0	0	0	0	0
-----------	---	---	---	---	---	---	---

2º Passo: De modo iterativo é realizada a identificação dos conjuntos de barras do sistema que são armazenados no vetor **mr** cuja dimensão corresponde ao número de barras do sistema. Em outras palavras, é identificado a qual conjunto cada barra pertence;

Como as barras 1 e 3 estão interligados o valor de **mr**(1) e **mr**(3) recebem o valor 1 formando assim o primeiro conjunto.

Barras do sistema 1 2 3 4 5 6 7

mr	1	0	1	0	0	0	0
-----------	---	---	---	---	---	---	---

O próximo ramo liga as barras 2 e 5 ambas têm valor de **mr** igual a zero, portanto eles receberam o valor 2 formando o segundo conjunto do sistema.

Barras do sistema	1	2	3	4	5	6	7
mr	1	2	1	0	2	0	0

Em seguida temos as barras 2 e 6 o valor de **mr**(2) é igual a 2 e o valor de **mr**(6) é igual a zero logo **mr**(6) recebe o mesmo valor de **mr**(2).

Barras do sistema	1	2	3	4	5	6	7
mr	1	2	1	0	2	2	0

Temos em seguida as barras 3 e 4 que estão interligadas tendo que **mr**(3) é igual a 1 e o valor de **mr**(4) é igual a zero portanto o **mr**(4) recebe o valor de **mr**(3).

Barras do sistema	1	2	3	4	5	6	7
mr	1	2	1	1	2	2	0

Em seguida tem o ramo que liga a barra 5 a barra 7 tendo **mr**(5) igual a 2 e **mr**(7) igual a 0 logo **mr**(7) recebe o mesmo valor de **mr**(5).

Barras do sistema	1	2	3	4	5	6	7
mr	1	2	1	1	2	2	2

Em seguida temos o último ramo que liga a barra 6 a barra 7 sendo que **mr**(6) igual ao **mr**(7) logo neste caso mantém o mesmos valores.

Barras do sistema	1	2	3	4	5	6	7
mr	1	2	1	1	2	2	2

3º Passo: São contabilizadas pelo contador **mar** quantas barras pertencem a um mesmo conjunto neste caso o valor de **mar** é menor que o número de barras do sistema, neste caso o sistema possui ilhamento. Se o numero de barras do sistema for igual a **mar** o sistema contém todas as barras conectadas.

O fluxograma deste procedimento é apresentado em detalhes na figura 4.21.

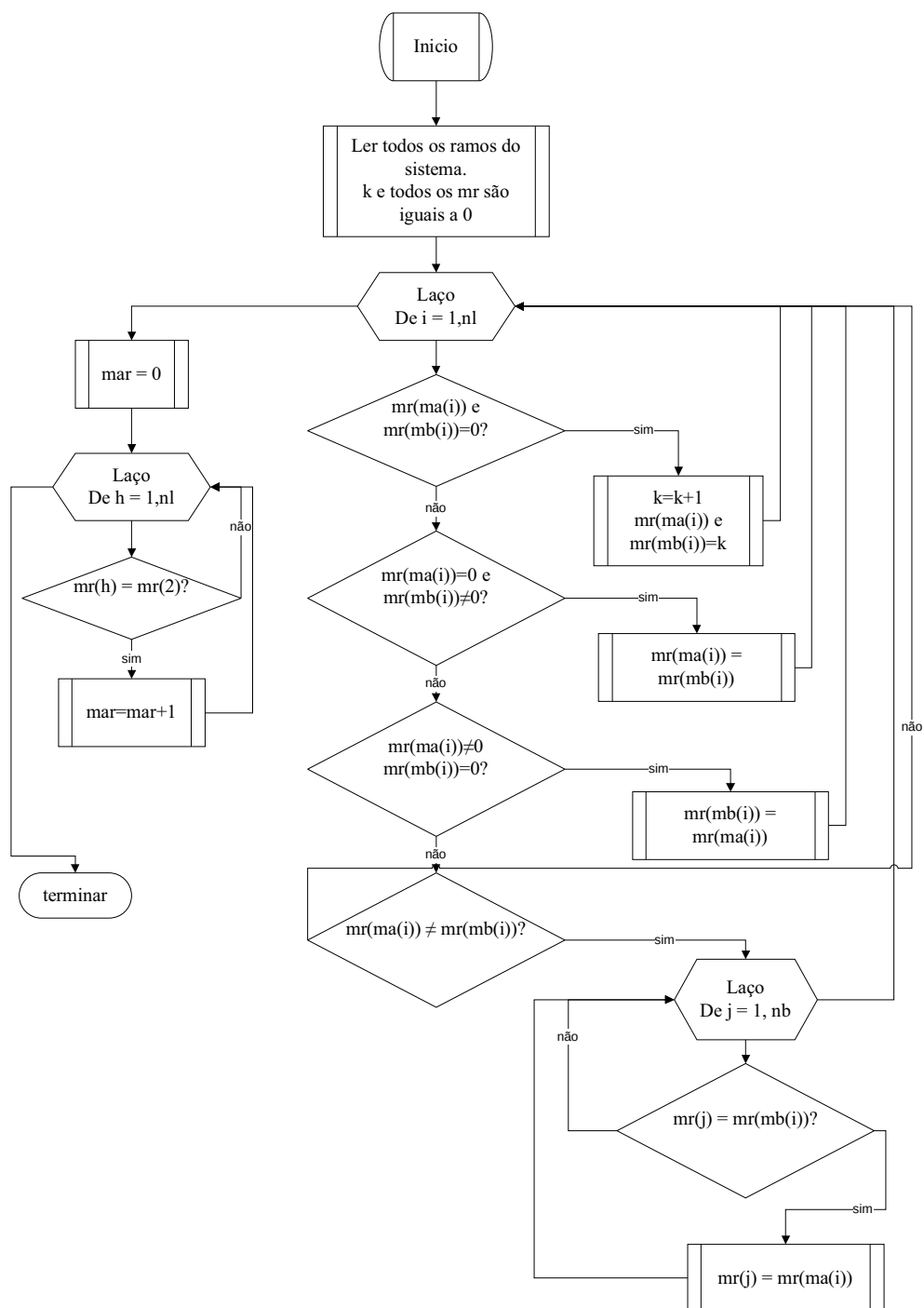


Figura 4.18: Fluxograma do algoritmo que verifica se um sistema é radial

V- Problema de Fluxo de Carga

5.1 Introdução

O cálculo do fluxo de carga fornece uma solução para a rede elétrica, em regime permanente para uma dada condição de operação. Para se resolver o problema de fluxo de carga de um sistema são necessários dados do sistema como: a potência fornecida ao sistema, as impedâncias dos ramos e as cargas nas barras. Com esses dados calculam-se as tensões nas barras e os ângulos de tensões nas barras, e utilizando este resultado é possível calcular os fluxos de potência ativa e reativa nos elementos da rede (HAFFNER, 2005).

O primeiro método computacional utilizado para a solução de fluxo de carga foi apresentado em 1956, por Ward e Hale, a partir deste foram desenvolvidos outros métodos que vêm sendo utilizados até os dias atuais. Neste trabalho serão utilizados dois métodos para calcular o fluxo de carga, sendo um para rede malhada e outro para rede radial. Sendo que para a rede malhada é utilizado o método de Newton e para diminuir o tempo computacional foi utilizado o método de varredura quando o sistema não possui malhas.

Neste cálculo modela-se o sistema em regime permanente, esta representação é utilizada quando a variação com o tempo for suficientemente lenta, para ignorar o efeito transitório do sistema. Na realização destes cálculos são utilizados métodos computacionais desenvolvidos para a resolução de sistemas de equações e inequações algébricas que constituem o modelo estático do sistema (MONTICELLI, 1983).

Os sistemas elétricos de potência podem ser divididos em sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica. Os componentes destes sistemas são utilizados no cálculo do fluxo de carga na seguinte proporção:

- Sistemas de Transmissão: geradores, cargas, compensadores síncronos, compensadores *shunt*, linhas de transmissão, transformadores em fase e defasadores;
- Sistemas de Distribuição primário: subestações, cargas, bancos de capacitores, alimentadores e circuitos, reguladores de tensão.

Tanto um sistema de transmissão quanto um sistema de distribuição possuem ramos (linhas e circuitos) que são representados matematicamente por uma impedância. As barras do sistema são a interconexão de dois ou mais ramos e onde podem ou não estarem localizadas as cargas deste sistema. As equações básicas para realizar o cálculo do fluxo de carga são obtidas impondo a conservação das potências ativas e reativas em cada barra do sistema.

Portanto, a potência líquida injetada deve ser igual à soma das potências dos componentes internos desta barra como um de seus terminais (primeira lei de Kirchhoff). A segunda lei de Kirchhoff é utilizada na expressão dos fluxos de potência em função das tensões de suas barras terminais. Na formulação básica do fluxo de carga de sistemas de energia elétrica são associadas quatro variáveis que por sua vez estão diretamente relacionadas ao tipo da barra. Assim os parâmetros associados ao problema de fluxo de carga são dados por:

V_k – magnitude da tensão nodal da barra k .

θ_k – ângulo da tensão nodal da barra k .

P_k – geração líquida (geração menos carga) de potência ativa da barra k .

Q_k – injeção líquida de potência reativa na barra k .

I_{km} – Fluxo de corrente que sai da barra k em direção a barra m ;

P_{km} – Fluxo de potência ativa que sai da barra k em direção a barra m ;

Q_{km} – Fluxo de potência reativa que sai da barra k em direção a barra m ;

As barras do sistema podem ser divididas em três tipos, os quais irão definir as variáveis e as constantes do problema em questão. A tabela 5.1 apresenta os tipos de barras e suas respectivas características.

Tabela 5.1 - Identificação dos tipos de barras

Tipo	Variáveis	Constantes
PQ	V_k e θ_k	P_k e Q_k
PV	Q_k e θ_k	P_k e V_k
Vθ	P_k e Q_k	V_k e θ_k

As barras do tipo **PQ** são majoritárias no sistema elétrico. Elas representam as barras nas quais estão conectadas as cargas. Em segundo lugar encontram-se as barras **PV**, que possuem uma tensão controlada ou que realizam um controle da tensão terminal. Essas barras normalmente não estão presentes nos sistemas de distribuição. Neste trabalho a barra de referência é única e necessária para a formulação do problema, pois necessita fixar um valor para o ângulo de referência, permitindo fechar o balanço de potência da rede, pois *a priori*, as perdas ativas não são conhecidas. O conjunto de equações do cálculo do fluxo de carga é formulado a partir de duas equações ((5.1) e (5.2)) para cada barra e cada uma dessas equações precisa satisfazer a Primeira Lei de Kirchhoff, (MONTICELLI, 1983).

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad (5.1)$$

$$Q_k + Q_k^{sh}(V_k) = \sum_{m \in \Omega_k} Q_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad (5.2)$$

Em que:

$k = 1, \dots, \text{NB}$, sendo NB o número de barras da rede.

Ω_k – Conjunto de barras vizinhas da barra k .

Q_k^{sh} – Componente de injeção de potência reativa devido ao elemento *shunt* da barra k .

As expressões gerais dos fluxos de potência ativa e reativa nos ramos do sistema são dadas pelas equações (5.3) e (5.4):

$$P_{km} = (V_k)^2 g_{km} - V_k V_m g_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) - V_k V_m b_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) \quad (5.3)$$

$$Q_{km} = -(V_k)^2 (b_{km} + b_{km}^{sh}) - V_k V_m b_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) - V_k V_m g_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) \quad (5.4)$$

onde

g_{km} - Condutância entre as barras k e m ;

b_{km} - Susceptância entre as barras k e m ;

b_{km}^{sh} - Susceptância shunt entre as barras k e m ;

Desta forma, foram apresentadas a introdução e a forma geral para o cálculo de fluxo de carga.

5.2 Fluxo de Carga Usando o Método de Newton.

Nesta seção é apresentado o método de Newton-Raphson para a solução do problema de fluxo de carga. Este método resulta de um processo iterativo baseando-se nas seguintes idéias: considerando-se uma equação algébrica não linear ($\underline{g}(\underline{x}) = \underline{0}$) pretende-se determinar uma solução; considerando um ponto conhecido próximo a solução da equação dada, pode-se estimar a distância entre a solução do problema e o ponto conhecido. Para isto é utilizado a expansão da equação em série de Taylor, desprezando os termos de ordem igual e superior a 2 (CASTRO, 2006). Para uma melhor compreensão, serão mostradas as equações e a resolução do subsistema ($\underline{g}(\underline{x}, \underline{y}) = \underline{0}$), de dimensão ($2NPQ + NPV$), descrita por Monticelli (1983). O processo consiste em determinar o vetor de correção $\Delta \underline{x}$, e para isto é necessário resolver o sistema linear:

$$\underline{g}(\underline{x}^v) = -J(\underline{x}^v) \Delta \underline{x}^v \quad (5.5)$$

Sendo assim, tem-se que:

$$\underline{g}(\underline{x}^v) = \begin{bmatrix} \Delta \underline{P}^v \\ \Delta \underline{Q}^v \end{bmatrix} \leftarrow \begin{matrix} NPQ + NPV \\ NPQ \end{matrix} \quad (5.6)$$

$$\Delta \underline{x}^v = \begin{bmatrix} \Delta \underline{\theta}^v \\ \Delta \underline{V}^v \end{bmatrix} \leftarrow \begin{matrix} \text{NPQ} + \text{NPV} \\ \text{NPQ} \end{matrix} \quad (5.7)$$

$$J(\underline{x}^v) = \begin{bmatrix} \frac{\partial(\Delta \underline{P})}{\partial \underline{\theta}} & \frac{\partial(\Delta \underline{P})}{\partial \underline{V}} \\ \frac{\partial(\Delta \underline{Q})}{\partial \underline{\theta}} & \frac{\partial(\Delta \underline{Q})}{\partial \underline{V}} \end{bmatrix} \leftarrow \begin{matrix} \text{NPQ} + \text{NPV} \\ \text{NPQ} \end{matrix} \quad (5.8)$$

Os vetores $\Delta \underline{P}$ e $\Delta \underline{Q}$ são dados por:

$$\Delta \underline{P} = \underline{P}^{esp} - \underline{P}(\underline{V}, \underline{\theta}) \quad (5.9)$$

e

$$\Delta \underline{Q} = \underline{Q}^{esp} - \underline{Q}(\underline{V}, \underline{\theta}) \quad (5.10)$$

em que, $\underline{P}^{esp}$ e $\underline{Q}^{esp}$ são valores constantes que representam as potências ativa e reativa específicas do sistema. Sendo assim a matriz Jacobiana pode ser reescrita da seguinte forma:

$$J(\underline{x}^v) = - \begin{pmatrix} \frac{\partial \underline{P}}{\partial \underline{\theta}} & \frac{\partial \underline{P}}{\partial \underline{V}} \\ \frac{\partial \underline{Q}}{\partial \underline{\theta}} & \frac{\partial \underline{Q}}{\partial \underline{V}} \end{pmatrix}^{(v)} \quad (5.11)$$

Esta matriz é dividida em submatrizes que são representadas por:

$$\underline{H} = \frac{\partial(\underline{P})}{\partial \underline{\theta}}, \quad \underline{N} = \frac{\partial(\underline{P})}{\partial \underline{V}} \quad (5.12)$$

$$\underline{M} = \frac{\partial(\underline{Q})}{\partial \underline{\theta}} \quad \text{e} \quad \underline{L} = \frac{\partial(\underline{Q})}{\partial \underline{V}} \quad (5.13)$$

A composição das submatrizes Jacobianas $\underline{H}$, $\underline{N}$, $\underline{M}$ e $\underline{L}$ é dada a seguir:

$$\underline{H}_{km} = \frac{\partial \underline{P}_k}{\partial \underline{\theta}_m} = V_k V_m (G_{km} \text{sen} \theta_{km} - B_{km} \text{cos} \theta_{km}) \quad (5.14)$$

$$\underline{H}_{kk} = \frac{\partial \underline{P}_k}{\partial \underline{\theta}_k} = -V_k^2 B_{kk} - V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \text{sen} \theta_{km} - B_{km} \text{cos} \theta_{km}) \quad (5.15)$$

$$\underline{N}_{km} = \frac{\partial \underline{P}_k}{\partial V_m} = V_k (G_{km} \text{cos} \theta_{km} + B_{km} \text{sen} \theta_{km}) \quad (5.16)$$

$$\underline{N}_{kk} = \frac{\partial \underline{P}_k}{\partial V_k} = V_k G_{kk} + \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \text{cos} \theta_{km} + B_{km} \text{sen} \theta_{km}) \quad (5.17)$$

$$\underline{M}_{km} = \frac{\partial \underline{Q}_k}{\partial \underline{\theta}_m} = -V_k V_m (G_{km} \text{cos} \theta_{km} + B_{km} \text{sen} \theta_{km}) \quad (5.18)$$

$$M_{kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} = -V_k^2 G_{kk} - V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (5.19)$$

$$L_{km} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} = V_k (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (5.20)$$

$$L_{kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} = -V_k B_{kk} + \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (5.21)$$

Utilizando-se as expressões descritas acima, podemos reescrever o sistema da equação (5.5) da seguinte forma:

$$\begin{pmatrix} \Delta \underline{P}^v \\ \Delta \underline{Q}^v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{H} & \underline{N} \\ \underline{M} & \underline{L} \end{pmatrix}^{(v)} \cdot \begin{pmatrix} \Delta \underline{\theta}^v \\ \Delta \underline{V}^v \end{pmatrix} \quad (5.22)$$

Os passos para a resolução de um sistema genérico utilizando-se o método de Newton são apresentados a seguir:

1º Passo: Fazer $\underline{v} = \mathbf{0}$ e escolher os valores iniciais dos ângulos das tensões das barras e das magnitudes das tensões das barras.

2º Passo: Calcular $\underline{P}_k(\underline{V}^v, \underline{\theta}^v)$ e $\underline{Q}_k(\underline{V}^v, \underline{\theta}^v)$ para as barras $\underline{PQ}$ e determinar os resíduos $\Delta \underline{P}_k^v$ e $\Delta \underline{Q}_k^v$.

3º Passo: Testar a convergência: se $\text{Max}\{|\Delta \underline{P}_k^v|\} \leq \varepsilon_p$ e $\text{Max}\{|\Delta \underline{Q}_k^v|\} \leq \varepsilon_q$, o processo iterativo convergiu para a solução $(\underline{V}^v, \underline{\theta}^v)$; caso contrário passar para o próximo passo.

4º Passo: Calcular a matriz Jacobiana:

$$J(\underline{V}^v, \underline{\theta}^v) = \begin{pmatrix} \underline{H}(\underline{V}^v, \underline{\theta}^v) & \underline{N}(\underline{V}^v, \underline{\theta}^v) \\ \underline{M}(\underline{V}^v, \underline{\theta}^v) & \underline{L}(\underline{V}^v, \underline{\theta}^v) \end{pmatrix} \quad (5.23)$$

5º Passo: Resolver o sistema de equações lineares (5.22) para calcular $\Delta \underline{\theta}^v$ e $\Delta \underline{V}^v$.

6º Passo: Determinar a nova solução $(\underline{V}^{v+1}, \underline{\theta}^{v+1})$:

$$\underline{\theta}^{v+1} = \underline{\theta}^v + \Delta \underline{\theta}^v \quad (5.24)$$

$$\underline{V}^{v+1} = \underline{V}^v + \Delta \underline{V}^v \quad (5.25)$$

7º passo: Fazer $\underline{v} + \mathbf{1} \rightarrow \underline{v}$ e voltar ao 2º passo.

Tendo que as submatrizes da jacobiana variam a cada iteração, com isso o método requer grande esforço computacional. Para resolver este problema são aplicadas técnicas de ordenação e esparsidade.

5.3 Fluxo de Carga Especializado para Sistemas Radiais.

Serão apresentados os aspectos teóricos e práticos do fluxo de carga em sistemas radiais utilizando um método de varredura (SHIRMOHAMMADI, 1988). Este algoritmo é muito utilizado por pesquisadores que trabalham com sistemas de distribuição por ser conceitualmente mais adequado para este tipo de sistema. O método é conhecido como varredura por ter um processo iterativo que faz um percurso das barras terminais em direção à barra de referência, e vice-versa.

O processo de resolução deste algoritmo inicia-se escolhendo um valor para os módulos das tensões nas barras que normalmente são iguais a tensão da barra de referência. Com isto todas as barras assumem a tensão $V_{ref} = V_{real} + jV_{imag} \rightarrow V_{ref} = V_{real} + j0$, onde V_{ref} é o módulo da tensão da barra de referência. Como foram escolhidas as tensões para todas as barras, encontram-se as correntes das cargas em todas as barras do sistema radial. Para encontrar as correntes das barras é realizada uma varredura das barras terminais até a barra de referência. Este processo é chamado de “*backward*”. De posse das correntes de todas as barras é possível calcular as perdas ativas e reativas do sistema.

Com todas as correntes de barras calculadas no processo de “*backward*”, pode-se estimar a corrente que está saindo da barra de referência. Usando esta corrente da barra de referência e as correntes das demais barras será realizado um cálculo das novas tensões de todas as barras do sistema. Inicializa-se este processo a partir da barra de referência e caminha até os ramos terminais. Este procedimento é conhecido como “*forward*”. Como foram obtidos novos valores de tensão de todas as barras, então novamente são calculados os valores de correntes das barras, e com esses novos valores de corrente calculam-se as perdas ativas e reativas do sistema. Neste algoritmo, o critério de parada é a variação das perdas ativas entre duas iterações consecutivas. Esta variação das perdas ativas em duas iterações, que é expressa por ΔP_{ativa} , tem que ser menor ou igual a uma tolerância especificada, isto é, $\Delta P_{ativa} \leq \varepsilon$ (BRANDINI, 2000).

5.3.1 Cálculo das Correntes de Barra

A figura 5.1 representa duas barras de um sistema de distribuição radial.

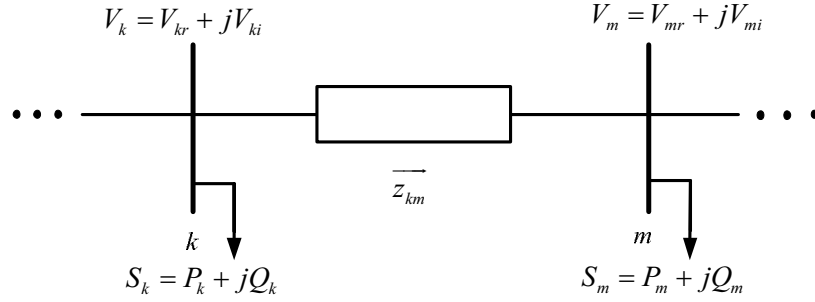


Figura 5.1: Representação de duas barras em um sistema de distribuição

A potência e a tensão complexas da barra k é definida da seguinte forma:

$$S_k = P_k + jQ_k \quad (5.26)$$

$$V_k = V_{kr} + jV_{ki} \quad (5.27)$$

Em que P_k e Q_k são as potência ativa e reativa demandadas pela barra k , respectivamente, V_{kr} e V_{ki} são as componentes real e imaginária da tensão da barra k , respectivamente.

A corrente injetada no sistema pela barra k é dada por:

$$I_k = \left(\frac{S_k}{V_k} \right)^* \rightarrow I_k^* = \frac{P_k + jQ_k}{V_{kr} + jV_{ki}} = \frac{P_k + jQ_k}{(V_{kr} + jV_{ki})} \cdot \frac{(V_{kr} - jV_{ki})}{(V_{kr} - jV_{ki})} \quad (5.28)$$

$$I_k = \frac{(P_k + jQ_k)(V_{kr} - jV_{ki})}{(V_{kr}^2 + V_{ki}^2)} = \frac{(P_k V_{kr} + Q_k V_{ki}) + j(P_k V_{ki} - Q_k V_{kr})}{(V_{kr}^2 + V_{ki}^2)} \quad (5.29)$$

Separando a equação (5.29) em parte real e imaginária, tem-se, respectivamente, que:

$$I_{kr} = \frac{(P_k V_{kr} + Q_k V_{ki})}{(V_{kr}^2 + V_{ki}^2)} \quad (5.30)$$

$$I_{ki} = \frac{(P_k V_{ki} - Q_k V_{kr})}{(V_{kr}^2 + V_{ki}^2)} \quad (5.31)$$

5.3.2 Cálculo das Tensões de Barra

O seguinte passo para resolução do método de varredura é calcular as tensões das barras do sistema de distribuição. Para calcular as tensões nas barras é necessário que se conheça o fluxo de corrente nos ramos do sistema. A corrente complexa em um determinado ramo km pode ser escrita da seguinte forma, $I_{km} = I_{kmr} + jI_{kmi}$. Em que I_{kmr} e I_{kmi} são as componentes real e imaginária da corrente no ramo km respectivamente. Esta corrente é calculada a partir das correntes injetadas nas barras do sistema. Por definição tem-se que:

$$V_k = V_{kr} + jV_{ki} = V_m + (r_{km} + jx_{km})(I_{kmr} + jI_{kmi}) \quad (5.32)$$

$$V_{kr} + jV_{ki} = V_{mr} + jV_{mi} + (r_{km}I_{kmr} - x_{km}I_{kmi}) + j(x_{km}I_{kmr} + r_{km}I_{kmi}) \quad (5.33)$$

Assim, separando as componentes real e imaginária das tensões, tem-se:

$$V_{mr} = V_{kr} - r_{km}I_{kmr} + x_{km}I_{kmi} \quad (5.34)$$

$$V_{mi} = V_{ki} - r_{km}I_{kmi} - x_{km}I_{kmr} \quad (5.35)$$

5.3.3 Cálculo das Perdas de Potências Ativa e Reativa

Calculadas as tensões e as correntes do sistema é possível então calcular as perdas ativas e reativas deste sistema. Assim as perdas em cada ramo do sistema podem ser calculadas como se segue:

$$\begin{aligned} S_{km} &= P_{kmp} + jQ_{kmp} = \Delta V_{km} I_{km}^* = (r_{km} + jx_{km}) I_{km} I_{km}^* \\ &= (r_{km} + jx_{km}) I_{km}^2. \end{aligned} \quad (5.36)$$

Desta forma podemos encontrar as perdas ativa e reativa do ramo que liga a barra k à barra m :

$$P_{kmp} = r_{km} I_{km}^2 \quad (5.37)$$

$$Q_{kmp} = x_{km} I_{km}^2 \quad (5.38)$$

Com as expressões descritas acima, pode-se calcular as perdas ativas e reativas totais do sistema elétrico conforme equações (5.39) e (5.40).

$$P_{total} = \sum_{(k,m) \in \Omega} r_{km} I_{km}^2 \quad (5.39)$$

$$Q_{total} = \sum_{(k,m) \in \Omega} x_{km} I_{km}^2 \quad (5.40)$$

5.3.4 Algoritmo

O algoritmo do fluxo de carga para sistemas radiais utilizado neste trabalho é descrito a seguir:

1º Passo: Ler os dados do sistema. Definir a tolerância da variação das perdas.

2º Passo: Após a leitura dos dados de entrada é feita uma ordenação dos ramos do sistema a fim de identificar o sentido dos fluxos de potência no sistema. Esta ordenação é feita através da renumeração das barras por camada como apresentado na figura 5.2:

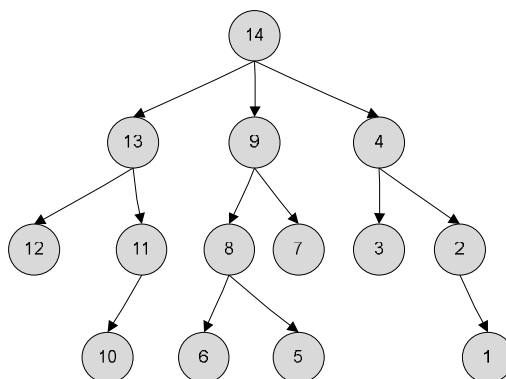


Figura 5.2: Sistema de 14 barras antes da ordenação

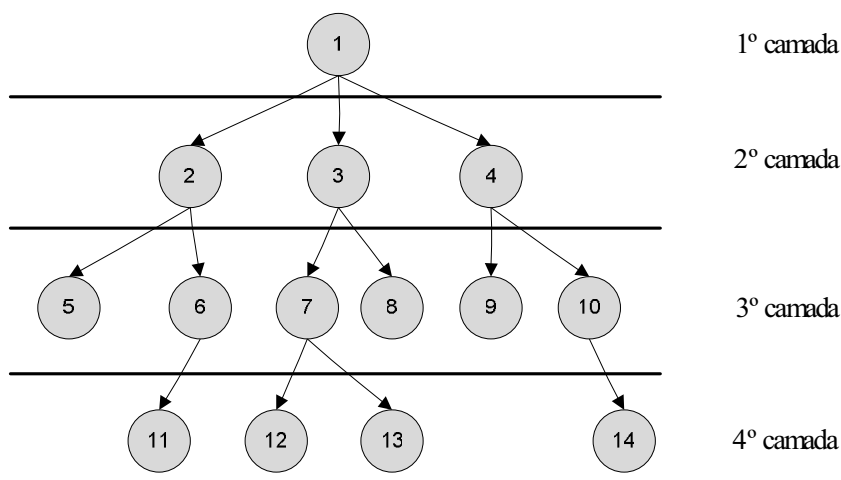


Figura 5.3: Sistema de 14 barras após a ordenação

3º Passo: Após essa ordenação das barras é aplicada as equações que foram descritas na seção 5.3 deste trabalho para resolver o fluxo de carga radial.

Primeiramente, neste trabalho não existem barras do tipo **PV**, existem somente barras do tipo **PQ** e apenas uma do tipo **Vθ**. Assim, a solução do problema é iniciada aplicando em todas as barras **PQ** a tensão da barra de referência; em seguida, com os dados de tensão das barras, são calculadas as correntes de cada ramo utilizando o processo “*backward*”. Conhecendo as correntes de todas as barras, calculam-se as novas tensões das barras utilizando o processo “*forward*”. Após esse processo são calculadas as perdas ativas e reativas utilizando as equações (5.37) e (5.38), em seguida é verificado o parâmetro de parada do sistema.

O algoritmo irá parar quando a variação das perdas ativas entre duas iterações consecutivas for menor do que a tolerância estipulada. Se o critério de parada não for satisfeito, o algoritmo executa mais iterações até que a variação das perdas ativas entre duas

iterrações consecutivas seja menor do que a tolerância estipulada, ou que o algoritmo ultrapasse o número limite de iterrações.

VI- RESULTADOS

Neste Capítulo serão apresentados os resultados obtidos através das simulações realizadas utilizando a metodologia proposta neste trabalho que tem como objetivo resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição. A metodologia proposta foi escrita na linguagem de programação FORTRAN 90 e todas as simulações foram feitas utilizando um processador Intel® Core 2 Duo de 1,86 GHz e 2 GB de memória. Os testes computacionais foram realizados utilizando-se quatro sistemas de distribuição disponíveis na literatura. Os quatro sistemas utilizados aqui são identificados nesta seção como: sistema de 33 barras apresentado em (BARAN e WU, 1989), sistema de 84 barras apresentado por Chiou, Chang e Su (2005), estes sistemas foram utilizados principalmente para testar o algoritmo desenvolvido. Para comprovar a qualidade e a robustez do método proposto, foram utilizados os sistemas de 119 e 136 barras, apresentado respectivamente por Zhang, Fu e Zhang (2007) e por Carreño, Romero e Feltrin, 2008). Os dados dos sistemas testados estão descritos no Apêndice A e a potência base utilizada em todos os sistemas foi de 100 MVA e a tensão base é a tensão da subestação do respectivo sistema.

6.1 Sistemas de 33 Barras

O sistema de 33 barras é um sistema teste que possui 32 barras de carga, 1 subestação e 37 ramos, tem como tensão base 12,66 KV, as condições de carga total são iguais a 3.715 KW e 2.315 KVAR. Este sistema possui cinco ramos de interligação e inicialmente as chaves abertas são 33, 34, 35, 36 e 37 que estão representadas por linhas tracejadas na Figura 6.1, que por sua vez representa o sistema de 33 barras.

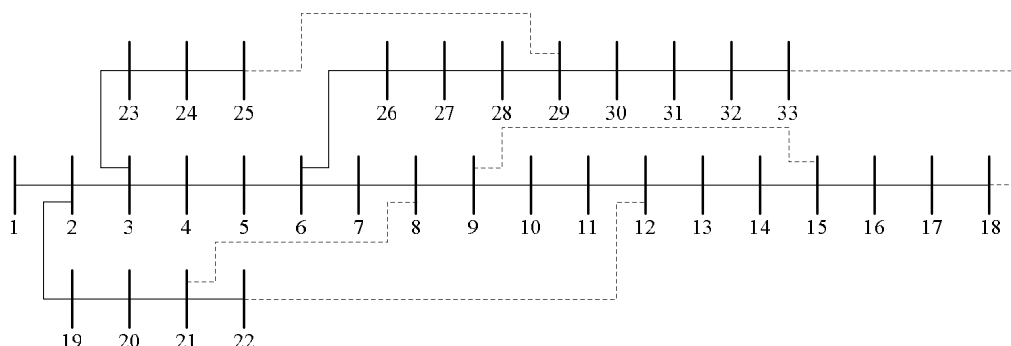


Figura 6.1: Sistema de 33 barras.

Os resultados obtidos com a metodologia proposta para o sistema de 33 barras, utilizando um $\alpha = 0,1$ é apresentado na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Resultados encontrados para o sistema de 33 barras.

Configurações	Chaves Abertas	Perdas Ativas (KW)
Inicial	33, 34, 35, 36 e 37	202,52
Final	7, 9, 14, 32 e 37	139,55
(MONTOVANI, CASARI e ROMERO, 2000)	7, 9, 14, 32 e 37	139,55
(CARREÑO, ROMERO e FELTRIN, 2008)	7, 9, 14, 32 e 37	139,55

As chaves de interconexão abertas na configuração final e as perdas ativas desta configuração são compatíveis com as encontradas na literatura para o sistema de 33 barras, (CARREÑO; ROMERO; FELTRIN, 2008; MONTOVANI; CASARI; ROMERO, 2000). O tempo computacional gasto pelo método proposto para este sistema foi de 10,3 segundos. Neste teste foram realizados 606 cálculos de fluxo de carga com o método de Newton na fase construtiva e 1.392 cálculos de fluxo de carga com o método de varredura na fase de busca local. Está quantidade de vezes que a fase de melhoria local realiza o cálculo de fluxo de carga dependerá das configurações encontradas na fase construtiva do algoritmo.

Na Figura 6.2 são apresentadas as tensões da configuração inicial e final do sistema de 33 barras.



Figura 6.2: Nível de tensão antes e após a reconfiguração do sistema de 33 barras

Pode-se observar através da figura 6.2 que a nova configuração encontrada possui um nível de tensão mais elevado que a configuração inicial. Na configuração inicial a menor tensão do sistema se encontra na barra 17 com valor de 0,91309 pu, com uma queda de tensão maior que a permitida pelas normas da ANEEL (2010), após a reconfiguração a menor tensão é encontrada na barra 31 com um valor de 0,93779 p.u., cuja queda de tensão não viola o limite mínimo exigido por norma que é de 7%.

6.2 Sistemas de 84 Barras.

Este sistema possui 84 barras e 96 ramos, tendo como tensão base 11,4 KV, as condições de carga total ativa e reativa são 28.350 KW e 20.700 KVar. Este sistema possui 83 chaves de interconexão normalmente fechadas e 13 chaves abertas que são 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95 e 96 os circuitos que possuem chaves abertas estão representadas por linhas tracejadas na figura 6.3.

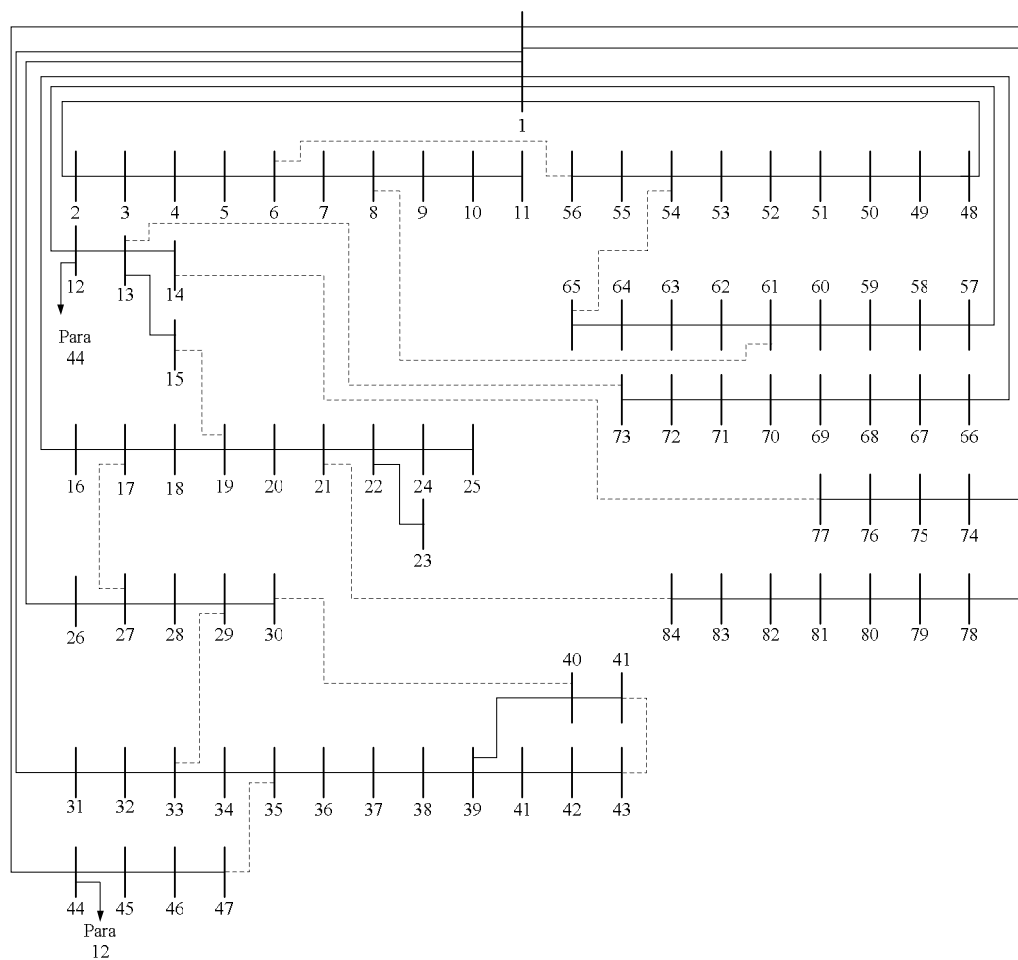


Figura 6.3: Sistema de 84 barras.

Os resultados obtidos, com a metodologia proposta, para o sistema de 84 barras, utilizando $\alpha = 0,1$ na metaheurística GRASP, podem ser considerados de excelente qualidade já que corroboram com os resultados encontrados na literatura. A Tabela 6.2 apresenta os resultados encontrados neste trabalho para a topologia inicial do sistema de 84 barras e para a topologia obtida após a reconfiguração do mesmo sistema, é apresentado também um dos resultados encontrados na literatura especializada.

Tabela 6.2 - Resultados obtidos para o sistema de 84 barras.

Configurações	Chaves Abertas	Perdas Ativas (KW)
inicial	84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95 e 96	531,81
final	7, 13, 34, 39, 42, 55, 62, 72, 83, 86, 89, 90 e 92	469,88
(Chun Wang, 2008)	7, 13, 34, 39, 42, 55, 62, 72, 83, 86, 89, 90 e 92	469,88

A topologia encontrada para o sistema de 84 barras, utilizando o método proposto é compatível com a topologia encontrada na literatura como pode ser comprovada nos trabalhos de Chang e Kuo (1994) e de Wang e Cheng (2008). O tempo computacional gasto pelo método proposto para este sistema foi de 23,56 segundos, utilizando 100 iterações do algoritmo GRASP. O valor das perdas ativas da topologia encontrada também é compatível com os disponíveis na literatura comprovando a eficiência do método proposto. Cabe ressaltar aqui que este sistema contém 17 barras de passagem e a metodologia proposta neste trabalho não desconecta nenhuma das barras de passagem, por possuir um algoritmo que evita que qualquer barra do sistema seja desconectada.

Neste teste foram realizados 1.414 cálculos de fluxo de carga com o método de Newton na fase construtiva e 3.364 cálculos de fluxo de carga com o método de varredura na fase de busca local. Está quantidade de vezes que a fase de melhoria local realiza o cálculo de fluxo de carga dependerá das configurações encontradas na fase construtiva do algoritmo.

Uma análise do parâmetro alfa utilizada na fase construtiva do algoritmo GRASP foi realizada no sistema de 84 barras para, definir qual o melhor alfa a ser utilizado. Os resultados encontrados são os mesmos para os diferentes valores de alfa, mas esta mudança altera o número de iterações e com consequência o tempo computacional também. O melhor resultado encontrado na literatura para o sistema de 84 barras é uma perda ativa de 469,80 KW.

Tabela 6.3 - Modificação do parâmetro alfa

Valor do alfa	Tempo computacional (segundos)	Quantidade de iterações
0,5	167,12	550
0,4	56,03	200
0,3	22,50	80
0,2	6,7	20
0,1	4,51	15
0,029	2,92	10
0,025	2,90	10

Para um melhor entendimento do parâmetro alfa será mostrado quantos elementos entra na lista na primeira iteração da fase construtiva do algoritmo GRASP, modificando-se o valor de alfa para o sistema de 84 barras. A lista mencionada é uma lista formada pelos ramos que podem ser desconectados do sistema e que estiverem dentro do intervalo imposto pela inequação (4.1). Independente do valor de alfa a quantidade de ramos que podem ser retirados na primeira iteração da fase construtiva do algoritmo GRASP para o sistema de 84 barras é de 89 ramos.

Tabela 6.4 - Quantidade de ramos que entram na lista

Valor do alfa	Números de Ramos na lista
0,5	60
0,4	52
0,3	41
0,2	35
0,1	26
0,05	17
0,025	7

Neste sistema foi utilizado um alfa de 0,1, pois se utilizar um valor de alfa menor pode ocorrer que nas demais iterações da fase construtiva do GRASP a metaheurística se transformem em uma heurística totalmente gulosa. Onde irá selecionar apenas o ramo que possuir o menor fluxo de potência aparente de todos os demais ramos que podem ser retirados do sistema.

Na figura 6.4 são apresentadas as tensões para a topologia ótima encontrada.

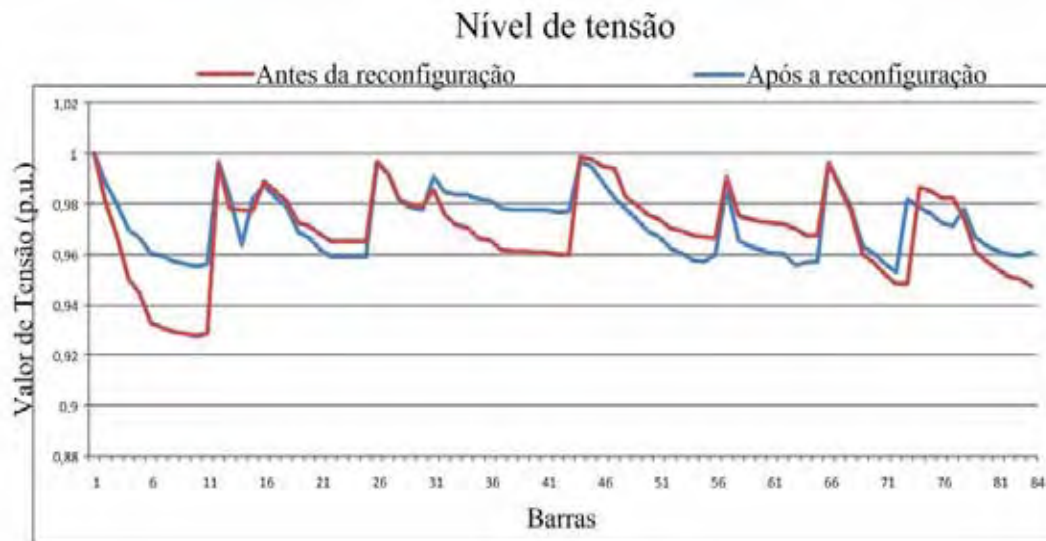


Figura 6.4: Nível de tensão antes e após a reconfiguração do sistema de 84 barras

Através da figura 6.4 pode-se observar que a configuração encontrada melhora o perfil de tensão do sistema, após a reconfiguração o menor valor de tensão encontrado no sistema foi de 0,95542 p.u. na barra 10. Nota-se que na configuração final as tensões variam dentro dos limites permitidos por norma, já a configuração inicial que varia entre 0,92771 p.u. a 1,00 p.u., possui queda de tensão maior que 7%, o que está fora dos limites permitidos pela ANEEL (2010).

6.3 Sistemas de 119 Barras.

O sistema de 119 barras possui 118 barras de carga, 1 subestação e 133 ramos, tendo como tensão base 11,0 KV, as condições de carga total ativa e reativa são 22.709,72 KW e 17.041,07 KVar. Este sistema possui 15 chaves de interconexão abertas, inicialmente as chaves que estão abertas são 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132 e 133. O resultado obtido para o sistema de 119 barras através da metodologia proposta é apresentado na tabela 6.5, utilizando um $\alpha = 0,03$ na metaheurística GRASP. A Tabela apresenta também as perdas existentes na configuração inicial do sistema, além do melhor resultado encontrado na literatura especializada.

Tabela 6.5 - Resultado obtido para o sistema de 119 barras.

Configurações	Chaves Abertas	Perdas Ativas (KW)
inicial	119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132 e 133.	1.294,63
final	24, 26, 35, 40, 43, 51, 59, 72, 75, 96, 98, 110, 122, 130 e 131.	853,65
(OLIVEIRA, 2010)	24, 26, 35, 40, 43, 51, 59, 72, 75, 96, 98, 110, 122, 130 e 131	853,65
(ZHANG, FU e ZHANG, 2007)	24, 27, 35, 40, 43, 53, 59, 72, 75, 96, 98, 110, 123, 130 e 131	865,86

O resultado encontrado para o sistema de 119 barras, utilizando o método proposto neste trabalho é de melhor qualidade encontrado nos trabalhos de Zhang, Fu e Zhang (2007) e comparado com o melhor resultado encontrado na literatura (OLIVEIRA, 2010). Neste teste foram realizados 3.216 cálculos de fluxo de carga com o método de Newton na fase construtiva e 7.388 cálculos de fluxo de carga com o método de varredura na fase de busca local. Está quantidade de vezes que a fase de melhoria local realiza o cálculo de fluxo de carga dependerá das configurações encontradas na fase construtiva do algoritmo. Os níveis de tensão antes e depois da reconfiguração no sistema de 119 barras estão ilustrados na figura 6.5.



Figura 6.5: Nível de tensão antes e após a reconfiguração do sistema de 119 barras

Após a reconfiguração a menor tensão encontrada no sistema foi na barra 114. Na configuração final as tensões variam no intervalo de 0,9338 p.u. a 1,00 p.u., tendo uma menor variação em relação a configuração inicial que varia dentro do intervalo de 0,8688 p.u. a 1,00 p.u., que possui variação maior que a permitida pela ANEEL (2010). O tempo computacional gasto pelo método proposto para este sistema foi de 82,92 segundos. A Figura 6.3 ilustra a evolução da incumbente na metodologia proposta em relação a cada iteração.

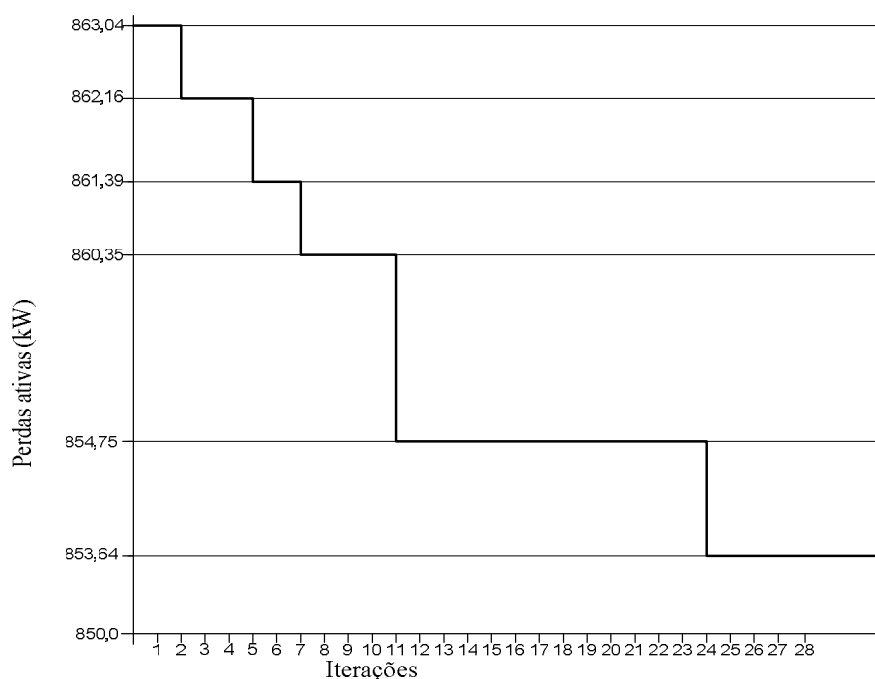


Figura 6.6: Desempenho do método para o sistema de 119 barras

No algoritmo GRASP foram realizadas um total de 200 iterações, nota-se que na vigésima quarta iteração o algoritmo encontra a melhor solução para o sistema de 119 barras. Como o algoritmo GRASP utiliza uma escolha aleatória na sua fase construtiva, logo não se pode indicar em qual iteração o algoritmo encontrará a melhor solução.

O valor de alfa foi modificado para o sistema de 119 barras, para verificar quantos elementos entram na lista. Esta lista é formada pelos ramos que podem ser desconectados do sistema e que estiverem dentro do intervalo imposto pela inequação (4.1). Independente do valor de alfa a quantidade de ramos que podem ser retirados na primeira iteração da fase construtiva do algoritmo GRASP para o sistema de 119 barras será de 121 ramos. A quantidade de ramos que irá compor a lista é definida através do parâmetro alfa como pode ser verificado na tabela 6.6.

Tabela 6.6 - Quantidade de ramos que entrará na lista.

Valor do alfa	Números de Ramos na lista
0,3	113
0,2	104
0,1	77
0,07	62
0,05	42
0,035	30
0,030	28
0,010	8

6.4 Sistemas de 136 Barras.

Este sistema possui 136 barras e 156 ramos e é um sistema de distribuição real localizado em uma cidade de porte médio no Brasil, tendo como tensão base 13,8 KV, as condições de carga total ativa e reativa são 18.313,809 KW e 9.384,827 KVAR, respectivamente. Este sistema possui 21 circuitos com chaves de interconexão abertas, inicialmente as chaves abertas são 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155 e 156. Os resultados obtidos para o sistema de 136 barras encontrado na literatura e utilizando a metodologia proposta neste trabalho são dados pela tabela 6.7. Utilizou-se um $\alpha = 0,109$ na metaheurística GRASP.

Tabela 6.7 - Resultado obtido para o sistema de 136 barras.

Configurações	Chaves Abertas	Perdas Ativas (KW)
Inicial	136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155 e 156	320,24
Final	7, 35, 51, 90, 96, 106, 118, 126, 135, 137, 138, 141, 142, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151 e 155	280,16
(CARREÑO, ROMERO e FELTRIN, 2008)	7, 35, 51, 90, 96, 106, 118, 126, 135, 137, 138, 141, 142, 144, 145, 146, 147, 148, 150, 151 e 155	280,16

O resultado encontrado para o sistema de 136 barras, utilizando o método proposto é compatível com o melhor resultado encontrado na literatura como pode ser comprovada no trabalhos de Carreño, Romero e Feltrin, 2008). Neste teste foram realizados 4.422 cálculos de

fluxo de carga com o método de Newton na fase construtiva e 9.371 cálculos de fluxo de carga com o método de varredura na fase de busca local. Está quantidade de vezes que a fase de melhoria local realiza o cálculo de fluxo de carga dependerá das configurações encontradas na fase construtiva do algoritmo. Os níveis de tensão antes e depois da reconfiguração no sistema de 136 barras estão ilustrados na figura 6.7.

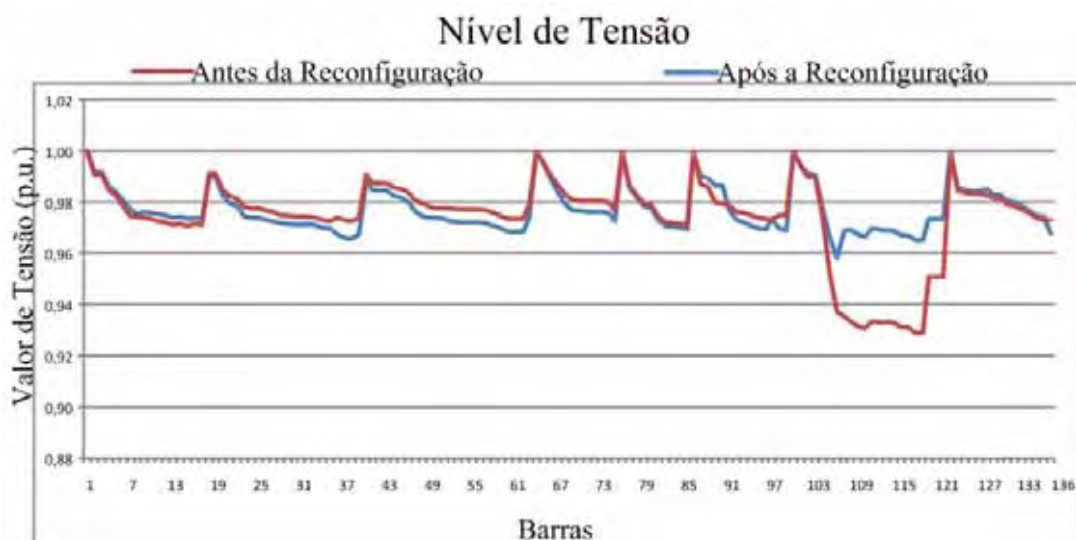


Figura 6.7: Nível de tensão antes e após a reconfiguração do sistema de 136 barras

Após a reconfiguração a menor tensão encontrada no sistema foi de 0,9589 p.u. na barra 106, acima da queda de tensão mínima permitida. Em relação à configuração inicial a menor tensão encontrada foi de 0,9326 p.u., pode-se considerar assim que reconfiguração do sistema melhorou o perfil de tensão existente no mesmo. O tempo computacional gasto pelo método proposto para este sistema foi de 138,5 segundos. Desta forma foi comprovada a qualidade e robustez do método proposto. A Figura 6.4 ilustra a evolução da incumbente na metodologia proposta em relação a cada iteração.

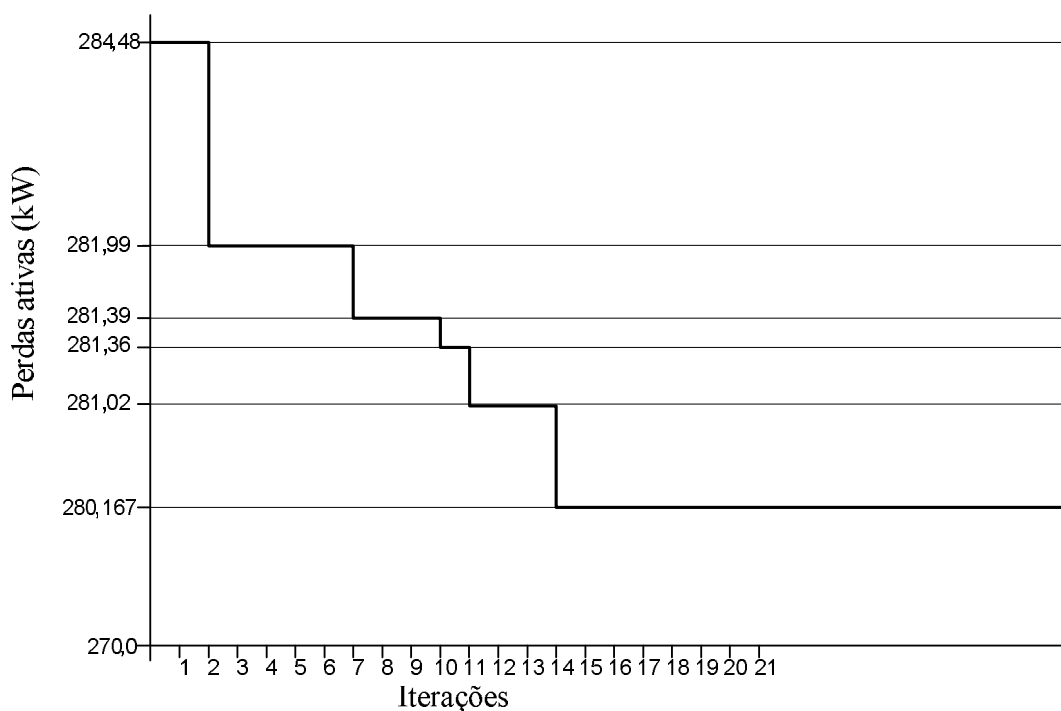


Figura 6.8: Desempenho do método para o sistema de 136 barras

O critério de parada do algoritmo GRASP foi de 200 iterações, nota-se que na décima quarta iteração o algoritmo encontra a mesma solução apresentada na literatura e este valor não é alterado até o total de 200 iterações. Como o algoritmo GRASP utiliza uma escolha aleatória na sua fase construtiva, não se pode indicar em qual iteração o algoritmo encontrará a melhor solução, mas provavelmente, isto ocorrerá dentre as 200 iterações.

O valor de alfa foi modificado para o sistema de 136 barras, para verificar quantos elementos entra na lista. Esta lista é formada pelos ramos que podem ser desconectados do sistema e que estiverem dentro do intervalo imposto pela inequação (4.1). Independente do valor de alfa a quantidade de ramos que podem ser retirados na primeira iteração da fase construtiva do algoritmo GRASP para o sistema de 136 barras será de 118 ramos. A quantidade de ramos que irá compor a lista é definida através do parâmetro alfa como pode ser verificado na tabela 6.8.

Tabela 6.8 - Quantidade de ramos que entram na lista

Valor do alfa	Números de Ramos na lista
0,5	81
0,4	70
0,3	63
0,2	52
0,15	45
0,109	35
0,100	32
0,050	19

VII CONCLUSÕES

Neste trabalho o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica foi resolvido utilizando a metaheurística GRASP, tendo como objetivo a diminuição das perdas ativas do sistema. A metodologia utilizada neste trabalho foi testada utilizando quatro sistemas encontrados na literatura especializada, 33, 84, 119 e 136 barras.

Foi considerado, na metodologia proposta, que todos os ramos do sistema possuem uma chave de interconexão que pode ser aberta ou fechada a qualquer momento, isso fez com que as possibilidades de melhorar a qualidade da função objetivo aumentassem. Para garantir a radialidade dos sistemas de distribuição foi desenvolvido um método que verifica a cada iteração da fase construtiva e de busca local a existência de laços na configuração corrente.

Os resultados encontrados através da metodologia proposta neste trabalho para os sistemas de 33, 84, 119 e 136 barras são iguais aos encontrados na literatura. Assim pode-se afirmar que a metodologia utilizada obteve bons resultados com eficiência e robustez para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica.

7.1 Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros são sugeridos os seguintes tópicos:

- Desenvolver uma heurística que forneça o valor da constante alfa (α), com o objetivo de evitar a execução de simulações sucessivas para encontrar este valor.
- Introduzir o algoritmo de *Path Relinking* com o objetivo de tentar melhorar a solução encontrada e realizar testes com sistemas de maior tamanho.
- Implementar um novo modelo para a reconfiguração do sistema de distribuição que possua geração distribuída, smart grid e alocação de capacitores.

REFERÊNCIAS

- ABUR, A. Determining the optimal radial network topology within the line flow constraints. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CIRCUITS AND SYSTEMS - ISCAS '96, 1996, Atlanta. **Anais...** New York: IEEE, 1996a. p. 673-676.
- ABUR, A. A modified linear programming method for distribution system reconfiguration. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Oxford, v. 18, n. 7, p. 469-474, 1996b.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. Resolução normativa nº 395, de 15 de dezembro de 2009. Aprova a revisão 1 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, Seção 1, v. 146, n. 246, p. 120, 24 dez. 2009.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST)**: módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. Brasília, DF, 2010. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo8_Revisao_1.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2010.
- BARAN, M. E.; WU, F. F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 4, n. 2, p. 1401-1407, 1989.
- BRANDINI, A. C. **Análise crítica de algoritmos de fluxo de carga usados em sistemas de distribuição radial**. 2000. 71 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia de Ilha Soteira, Universidade Estadual Paulista, 2000.
- BRAZ, H. D. M. **Configuração de sistemas de distribuição usando um algoritmo genético sequencial**. 2010. 258 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.
- BUENO, E. A. **Redução de perdas técnicas através de reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica sob demandas variáveis**. 2005. 148 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.
- CARREÑO, E. M.; MOREIRA, N.; ROMERO, R. Distribution network reconfiguration using an efficient evolutionary algorithm. In: IEEE PES GENERAL MEETING, 2007, Tampa-FL. **Proceedings...** New York: IEEE, 2007. p.1-6.
- CARREÑO, E.; ROMERO, R.; FELTRIN, A. P. An efficient codification to solve distribution network reconfiguration for loss reduction problem. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 23, n. 4, p. 1542–1551, 2008.
- CASTRO, C. A. Apostila de cálculo de fluxo de carga. Campinas: Unicamp, 2010. Disponível em: <<http://www.dsee.fee.unicamp.br/~ccastro/cursos/it601/cap3.pdf>>. Acesso em: 16 fev. 2011.

- CERNY, V. Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: an efficient simulation algorithm. **Jornal of Optimization Theory and Application**, New York, v. 45, n. 1, p. 41-51, 1985.
- CHANG, C. F. Reconfiguration and capacitor placement for loss reduction of distribution systems by ant colony search algorithm. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 23, n. 1, p. 1747-1755, 2008.
- CHANG, H. C.; KUO, C. C. Network reconfiguration in distribution systems using simulated annealing. **Electric Power Systems Research**, Lausanne, v. 29, n. 3, p. 227-238, 1994.
- CHIANG, H. D.; JEAN-JUMEAU, R. Optimal Network reconfigurations in distribution systems: part 2: solution algorithms and numerical results. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 5, n. 3, p. 1568-1574, 1990.
- CHIANG, H. D.; JEAN-JUMEAU, R. Optimal network reconfigurations in distribution systems: Parte 1: A New Formulation and A Solution Methodology. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 5, n. 4, p. 1902-1909, 1990.
- CHIOU, J. P.; CHANG, C. F.; SU, C. T. Variable scaling hybrid differential evolution for solving network reconfiguration of distribution systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 20, n. 2, p. 668-674, 2005.
- CIVANLAR, S.; GRAINGER, J. J.; LEE, S. S. H. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 3, n. 3, p. 1217-1223, 1988.
- DORIGO, M.; MANIEZZO, V.; COLORNI, A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. **IEEE Transactions on Systems, Part B: Cybernetics**, New York, v. 26, n. 1, p. 29-41, 1996.
- FEO, T. A.; RESENDE, M. G. C. A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem. **Operations Research Letters**, Amsterdam, v. 8, n. 2, p. 67-71, 1989.
- FEO, T. A.; RESENDE, M. G. C. Greedy randomized adaptive search procedures. **Journal of Global Optimization**, New York, v. 6, n. 2, p. 109-133, 1995.
- GLAMOCANIN, V. Optimal loss reduction of distribution networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 72, n. 3, p. 774-782, 1990.
- GLOVER, F. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. **Computers and Operations Research**, New York, v. 13, n. 5, p. 533-349, 1986.
- GOMES, F. V. et al. A new heuristic reconfiguration algorithm for large distribution system. **IEEE Transactions on Power System**, New York, v. 20, n. 3, p. 1373-1378, 2005.
- GOSWAMI, S. K.; BASU, S. K. A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 7, n. 3, p. 1484-1490, 1992.

GUIMARÃES, M. A. N. **Plataforma integrada para o planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando metaheurísticas**. 2009. 166 f. Tese (Dorutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009a.

GUIMARÃES, M. A. N. **Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando algoritmos de Busca Tabu**. 2005. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

GUIMARÃES, M. A. N.; LORENZETI, J. F. C.; CASTRO C. A. Reconfiguration of distribution system for voltage stability margin enhancement using Tabu Search. In: CONFERENCE ON POWER SYSTEM TECHNOLOGY - POWERCON, 2004, Singapore. **Proceedings...** New york: IEEE, 2004c. p. 1556-1561.

HAFFNER, S. Análise de sistemas de potência. Rio de Janeiro: UFRJ-EE, 2005. Disponível em:
<http://www.dee.ufrj.br/lasp/disciplinas/Apostila_Completa_ANALISE_DE_SISTEMAS_DE_POTENCIA.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2011.

HAYASHI, Y. et al. Efficient determination of optimal radial power system structure using hopfield neural network with constrained noise. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 11, n. 3, p. 1529-1535, 1996.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in natural and artificial systems**. Michigan: Ann Arbor, 1975. 211 p.

KIM, H.; KO, Y.; JUNG, K. H. Artificial neural-network based feeder reconfiguration for loss reduction in distribution systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 8, n. 3, p. 1356-1366, 1993.

LORENZETI, C. J. F. **Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica para a melhoria das condições de operação com relação à estabilidade de tensão**. 2004. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

LUCERO, F. A. B. **Planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando algoritmo Busca Tabu**. 2003. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual de São Paulo, Ilha Solteira, 2003.

MERLIN, A.; BACK, H. Search for a minimal-loss operating spnning tree configuration in an urban power distribution system. In: POWER SYSTEM COMPUTATION CONFERENCE, 5., 1975, Cambridge. **Proceedings...** Zurich: PSCC, 1975. p. 1-18.

MONTICELLI, A. J. **Fluxo de carga em redes de energia elétrica**. São Paulo: Edgard Blucher, 1983. 164 p.

MANTOVANI, J. R. S.; CASARI, F.; ROMERO R. Reconfiguração de sistema de distribuição radiais utilizando o critério de queda de tensão. **SBA Controle e Automação**, Porto Alegre, v. 11, n. 2, p. 150-159, 2000.

NARA, K. et al. Implementation of genetic algorithm for distribution systems loss minimum reconfiguration. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 7, n. 3, p. 1044 - 1051, 1992.

OLIVEIRA, M. L. **Planejamento integrado da expansão de sistemas de distribuição de energia elétrica**. 2010. 216 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Sistemas de Energia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

PEREIRA, F. S. **Reconfiguração ótima de sistemas de distribuição de energia elétrica baseado no comportamento de colônias de formigas**. 2010. 104 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

ROBBINS, H.; MONRO, S. A stochastic approximation method. **Annals of Mathematical Statistics**, Ann Arbor, v. 22, n. 3, p. 400-407, 1951.

SALAZAR, H.; GALLEGO, R.; ROMERO, R. Artificial neural networks and clustering techniques applied in the reconfiguration of distribution systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 21, n. 3, p. 1735-1742, 2006.

SARFI, R. J.; SALAMA M. M. A.; CHIKHANI, A. Y. A survey of the state of the art in distribution system reconfiguration for system loss reduction. **Electric Power Systems Research**, Lausanne, v. 31, n. 1, p. 61-70, 1994.

SCHMIDT, H. P. et al. Fast reconfiguration of distribution systems considering loss minimization. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 20, n. 3, p. 1311-1319, 2005.

SHIMOHAMMADI, D.; HONG, H. W. Reconfiguration of electric distribution for resistive line loss reduction. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 4, n. 2, p. 1492-1498, 1989.

SHIRMOHAMMADI, D. et al. A compensation based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 3, n. 2, p. 753-762, 1988.

WANG, C.; CHENG, H. Z. Optimization of network configuration in large distribution systems using plant growth simulation algorithm. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 23, n. 1, p. 119-126, 2008.

WARD, J. B.; HALE, H. W. Digital computer solution of power-flow problems. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, New York, v. 75, n. 3, p. 398-404, 1956.

ZHANG, D.; FU, Z.; ZHANG, L. An improved TS algorithm for loss-minimum reconfiguration in large-scale distribution systems. **Electric Power Systems Research**, Lausanne, v. 77, n. 5-6, p. 685-694, 2007.

ZHU, J. Z. Optimal reconfiguration of electrical distribution network using the refined genetic algorithm. **Electric Power Systems Research**, Lausanne, v. 62, n. 1, p. 37-42, 2002.

ZOLLENKOPF, K. Bi-factorization basic computational algorithm and programming techniques. In: OXFORD CONFERENCE ON THE INSTITUTE OF MATHEMATICS AND ITS APPLICATIONS, 1971, Oxford. **Proceedings...** Oxford: Academic Press, 1971. p. 75-96.

ZVIETCOVICH, W. G. **Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando a metaheurística busca em vizinhança variável**. 2006. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual de Paulista, 2006.

Apêndice A

A1 Sistema de 14 Barras

<i>Ramo</i>	<i>De</i>	<i>Para</i>	<i>Resistência do ramo</i>	<i>Reatância do ramo</i>	<i>Potência Ativa Demandada</i>	<i>Potência Reativa Demandada</i>
			<i>(Ω)</i>	<i>(Ω)</i>	<i>(KW)</i>	<i>(KVar)</i>
1	1	2	0.075	0.1	0.0	0.0
2	2	3	0.08	0.11	2000.0	1600.0
3	2	4	0.09	0.18	3000.0	400.0
4	4	5	0.04	0.04	2000.0	-400.0
5	1	6	0.11	0.11	1500.0	1200.0
6	6	7	0.08	0.11	4000.0	2700.0
7	6	8	0.11	0.11	5000.0	1800.0
8	7	9	0.11	0.11	1000.0	900.0
9	7	10	0.08	0.11	600.0	-500.0
10	1	11	0.11	0.11	4500.0	-1700.0
11	11	12	0.09	0.12	1000.0	900.0
12	11	13	0.08	0.11	1000.2	-1100.0
13	13	14	0.04	0.04	1000.0	900.0
14	3	9	0.04	0.04	2100.0	-800.0
15	8	12	0.04	0.04		
16	5	14	0.09	0.12		

A2 Sistema de 33 Barras

<i>Ramo</i>	<i>De</i>	<i>Para</i>	<i>Resistência do ramo</i> <i>(Ω)</i>	<i>Reatância do ramo</i> <i>(Ω)</i>	<i>Potência Ativa Demandada</i> <i>(KW)</i>	<i>Potência Reativa Demandada</i> <i>(KVar)</i>
1	33	1	0.0922	0.0470	0.0	0.0
2	1	2	0.493	0.2511	100.0	60.0
3	2	3	0.366	0.1864	90.0	40.0
4	3	4	0.3811	0.1941	120.0	80.0
5	4	5	0.819	0.707	60.0	30.0
6	5	6	0.1872	0.6188	60.0	20.0
7	6	7	0.7114	0.2351	200.0	100.0
8	7	8	1.03	0.74	200.0	100.0
9	8	9	1.044	0.74	60.0	20.0
10	9	10	0.1966	0.065	60.0	20.0
11	10	11	0.3744	0.1238	45.0	30.0
12	11	12	1.468	1.155	60.0	35.0
13	12	13	0.5416	0.7129	60.0	35.0
14	13	14	0.591	0.526	120.0	80.0
15	14	15	0.7463	0.545	60.0	10.0
16	15	16	1.289	1.721	60.0	20.0
17	16	17	0.732	0.574	60.0	20.0
18	1	18	0.164	0.1565	90.0	40.0
19	18	19	15.042	13.554	90.0	40.0
20	19	20	0.4095	0.4784	90.0	40.0
21	20	21	0.7089	0.9373	90.0	40.0
22	2	22	0.4512	0.3083	90.0	40.0
23	22	23	0.898	0.7091	90.0	50.0
24	23	24	0.896	0.7011	420.0	200.0
25	5	25	0.203	0.1034	420.0	200.0
26	25	26	0.2842	0.1447	60.0	25.0
27	26	27	1.059	0.9337	60.0	25.0
28	27	28	0.8042	0.7006	60.0	20.0
29	28	29	0.5075	0.2585	120.0	70.0
30	29	30	0.9744	0.963	200.0	600.0
31	30	31	0.3105	0.3619	150.0	70.0
32	31	32	0.341	0.5302	210.0	100.0
33	7	20	2	2	60.0	40.0
34	8	14	2	2		
35	11	21	2	2		
36	17	32	0.5	0.5		
37	24	28	0.5	0.5		

A3 Sistema de 84 Barras

<i>Ramo</i>	<i>De</i>	<i>Para</i>	<i>Resistência do ramo (Ω)</i>	<i>Reatância do ramo (Ω)</i>	<i>Potência Ativa Demandada (KW)</i>	<i>Potência Reativa Demandada (KVar)</i>
1	0	1	0.1944	0.6624	0	0
2	1	2	0.2096	0.4304	0	0
3	2	3	0.2358	0.4842	100	50
4	3	4	0.0917	0.1883	300	200
5	4	5	0.2096	0.4304	350	250
6	5	6	0.0393	0.0807	220	100
7	6	7	0.0405	0.138	1100	800
8	7	8	0.1048	0.2152	400	320
9	7	9	0.2358	0.4842	300	200
10	7	10	0.1048	0.2152	300	230
11	0	11	0.0786	0.1614	300	260
12	11	12	0.3406	0.6944	0	0
13	12	13	0.0262	0.0538	1200	800
14	12	14	0.0786	0.1614	800	600
15	0	15	0.1134	0.3864	700	500
16	15	16	0.0524	0.1076	0	0
17	16	17	0.0524	0.1076	300	150
18	17	18	0.1572	0.3228	500	350
19	18	19	0.0393	0.0807	700	400
20	19	20	0.1703	0.3497	1200	1000
21	20	21	0.2358	0.4842	300	300
22	21	22	0.1572	0.3228	400	350
23	21	23	0.1965	0.4035	50	20
24	23	24	0.131	0.269	50	20
25	0	25	0.0567	0.1932	50	10
26	25	26	0.1048	0.2152	50	30
27	26	27	0.2489	0.5111	100	60
28	27	28	0.0486	0.1656	100	70
29	28	29	0.131	0.269	1800	1300
30	0	30	0.1965	0.396	200	120
31	30	31	0.131	0.269	0	0
32	31	32	0.131	0.269	1800	1600
33	32	33	0.0262	0.0538	200	150
34	33	34	0.1703	0.3497	200	100
35	34	35	0.0524	0.1076	800	600
36	35	36	0.4978	10.222	100	60
37	36	37	0.0393	0.0807	100	60
38	37	38	0.0393	0.0807	20	10
39	38	39	0.0786	0.1614	20	10

segue ...

<i>Ramo</i>	<i>De</i>	<i>Para</i>	<i>Resistência do ramo (Ω)</i>	<i>Reatância do ramo (Ω)</i>	<i>Potência Ativa Demandada (KW)</i>	<i>Potência Reativa Demandada (KVar)</i>
82	81	82	0.0917	0.1883	500	360
83	82	83	0.3144	0.6456	100	30
84	5	55	0.131	0.269	400	360
85	7	60	0.131	0.269		
86	11	43	0.131	0.269		
87	12	72	0.3406	0.6994		
88	13	76	0.4585	0.9415		
89	14	18	0.5371	10.824		
90	16	26	0.0917	0.1883		
91	20	83	0.0786	0.1614		
92	28	32	0.0524	0.1076		
93	29	39	0.0786	0.1614		
94	34	46	0.0262	0.0538		
95	40	42	0.1965	0.4035		
96	53	64	0.0393	0.0807		

<i>Ramo</i>	<i>De</i>	<i>Para</i>	<i>Resistência do ramo</i>	<i>Reatância do ramo</i>	<i>Potência Ativa Demandada</i>	<i>Potência Reativa Demandada</i>
			<i>(Ω)</i>	<i>(Ω)</i>	<i>(KW)</i>	<i>(KVar)</i>
40	40	41	0.13	0.194	53.963	38.998
41	41	42	0.28	0.15	393.05	342.6
42	42	43	1.18	0.85	326.74	278.56
43	43	44	0.42	0.2436	536.26	240.24
44	44	45	0.27	0.0972	76.247	66.562
45	45	46	0.339	0.1221	53.52	39.76
46	46	47	0.27	0.1779	40.328	31.964
47	36	48	0.21	0.1383	39.653	20.758
48	48	49	0.12	0.0789	66.195	42.361
49	49	50	0.15	0.0987	73.904	51.653
50	50	51	0.15	0.0987	114.77	57.965
51	51	52	0.24	0.1581	918.37	1205.1
52	52	53	0.12	0.0789	210.3	146.66
53	53	54	0.405	0.1458	66.68	56.608
54	53	55	0.405	0.1458	42.207	40.184
55	30	56	0.391	0.141	433.74	283.41
56	56	57	0.406	0.1461	62.1	26.86
57	57	58	0.406	0.1461	92.46	88.38
58	58	59	0.706	0.5461	85.188	55.436
59	59	60	0.338	0.1218	345.3	332.4
60	60	61	0.338	0.1218	22.5	16.83
61	61	62	0.207	0.0747	80.551	49.156
62	62	63	0.247	0.8922	95.86	90.758
63	2	64	0.028	0.0418	62.92	47.7
64	64	65	0.117	0.2016	478.8	463.74
65	65	66	0.255	0.0918	120.94	52.006
66	66	67	0.21	0.0759	139.11	100.34
67	67	68	0.383	0.138	391.78	193.5
68	68	69	0.504	0.3303	27.741	26.713
69	69	70	0.406	0.1461	52.814	25.257
70	70	71	0.962	0.761	66.89	38.713
71	71	72	0.165	0.06	467.5	395.14
72	72	73	0.303	0.1092	594.85	239.74
73	73	74	0.303	0.1092	132.5	84.363
74	74	75	0.206	0.144	52.699	22.482
75	75	76	0.233	0.084	869.79	614.775
76	76	77	0.591	0.1773	31.349	29.817
77	77	78	0.126	0.0453	192.39	122.43
78	65	79	0.559	0.3687	65.75	45.37
79	79	80	0.186	0.1227	238.15	223.22

<i>Ramo</i>	<i>De</i>	<i>Para</i>	<i>Resistência do ramo</i>	<i>Reatância do ramo</i>	<i>Potência Ativa Demandada</i>	<i>Potência Reativa Demandada</i>
			<i>(Ω)</i>	<i>(Ω)</i>	<i>(KW)</i>	<i>(KVar)</i>
80	80	81	0.186	0.1227	294.55	162.47
81	81	82	0.26	0.139	485.57	437.92
82	82	83	0.154	0.148	243.53	183.03
83	83	84	0.23	0.128	243.53	183.03
84	84	85	0.252	0.106	134.25	119.29
85	85	86	0.18	0.148	22.71	27.96
86	80	87	0.16	0.182	49.513	26.515
87	87	88	0.2	0.23	383.78	257.16
88	88	89	0.16	0.393	49.64	20.6
89	66	90	0.669	0.2412	22.473	11.806
90	90	91	0.266	0.1227	62.93	42.96
91	91	92	0.266	0.1227	30.67	34.93
92	92	93	0.266	0.1227	62.53	66.79
93	93	94	0.266	0.1227	114.57	81.748
94	94	95	0.233	0.115	81.292	66.526
95	95	96	0.496	0.138	31.733	15.96
96	92	97	0.196	0.18	33.32	60.48
97	97	98	0.196	0.18	531.28	224.85
98	98	99	0.1866	0.122	507.03	367.42
99	99	100	0.0746	0.318	26.39	11.7
100	2	101	0.0625	0.0265	45.99	30.392
101	101	102	0.1501	0.234	100.66	47.572
102	102	103	0.1347	0.0888	456.48	350.3
103	103	104	0.2307	0.1203	522.56	449.29
104	104	105	0.447	0.1608	408.43	168.46
105	105	106	0.1632	0.0588	141.48	134.25
106	106	107	0.33	0.099	104.43	66.024
107	107	108	0.156	0.0561	96.793	83.647
108	108	109	0.3819	0.1374	493.92	419.34
109	109	110	0.1626	0.0585	225.38	135.88
110	110	111	0.3819	0.1374	509.21	387.21
111	111	112	0.2445	0.0879	188.5	173.46
112	111	113	0.2088	0.0753	918.03	898.55
113	113	114	0.2301	0.0828	305.08	215.37
114	101	115	0.6102	0.2196	54.38	40.97
115	115	116	0.1866	0.127	211.14	192.9
116	116	117	0.3732	0.246	67.009	53.336
117	117	118	0.405	0.367	162.07	90.321
118	118	119	0.489	0.438	48.785	29.156
119	47	28	0.5258	0.2925	33.9	18.98

<i>Ramo</i>	<i>De</i>	<i>Para</i>	<i>Resistência do ramo (Ω)</i>	<i>Reatância do ramo (Ω)</i>
120	18	28	0.5258	0.2916
121	9	25	0.4272	0.1539
122	55	44	0.48	0.1728
123	63	55	0.36	0.1296
124	38	63	0.57	0.572
125	10	41	0.53	0.3348
126	59	97	0.3957	0.1425
127	74	92	0.68	0.648
128	89	76	0.4062	0.1464
129	100	78	0.4626	0.1674
130	109	84	0.651	0.234
131	106	87	0.8125	0.2925
132	111	119	0.7089	0.2553
133	26	36	0.5	0.5

A4 Sistema de 136 Barras

<i>Ramo</i>	<i>De</i>	<i>Para</i>	<i>Resistência do ramo</i>	<i>Reatância do ramo</i>	<i>Potência Ativa Demandada</i>	<i>Potência Reativa Demandada</i>
			<i>(Ω)</i>	<i>(Ω)</i>	<i>(KW)</i>	<i>(KVAr)</i>
1	0	1	0.33205	0.76653	0.0	0.0
2	1	2	0.00188	0.00433	0.0	0.0
3	2	3	0.22324	0.51535	47.780	19.009
4	3	4	0.09943	0.22953	42.551	16.929
5	4	5	0.15571	0.35945	87.022	34.622
6	5	6	0.16321	0.37677	311.310	123.855
7	6	7	0.11444	0.26417	148.869	59.228
8	6	8	0.05675	0.05666	238.672	94.956
9	8	9	0.52124	0.27418	62.299	24.786
10	8	10	0.10877	0.10860	124.598	49.571
11	10	11	0.39803	0.20937	140.175	55.768
12	10	12	0.91744	0.31469	116.813	46.474
13	10	13	0.11823	0.11805	249.203	99.145
14	13	14	0.50228	0.26421	291.447	115.952
15	13	15	0.05675	0.05666	303.720	120.835
16	15	16	0.29379	0.15454	215.396	85.695
17	0	17	0.33205	0.76653	198.586	79.007
18	17	18	0.00188	0.00433	0.0	0.0
19	18	19	0.22324	0.51535	0.0	0.0
20	19	20	0.10881	0.25118	0.0	0.0
21	20	21	0.71078	0.37388	30.127	14.729
22	20	22	0.18197	0.42008	230.972	112.920
23	22	23	0.30326	0.15952	60.256	29.458
24	22	24	0.02439	0.05630	230.972	112.920
25	24	25	0.04502	0.10394	120.507	58.915
26	25	26	0.01876	0.04331	0.0	0.0
27	26	27	0.11823	0.11805	56.981	27.857
28	27	28	0.02365	0.02361	364.665	178.281
29	28	29	0.18954	0.09970	0.0	0.0
30	29	30	0.39803	0.20937	124.647	60.939
31	28	31	0.05675	0.05666	56.981	27.857
32	31	32	0.09477	0.04985	0.0	0.0
33	32	33	0.41699	0.21934	85.473	41.787
34	33	34	0.11372	0.05982	0.0	0.0
35	31	35	0.07566	0.07555	396.735	193.960
36	35	36	0.36960	0.19442	0.0	0.0
37	36	37	0.26536	0.13958	181.152	88.563
38	35	38	0.05675	0.05666	242.172	118.395
39	0	39	0.33205	0.76653	75.316	36.821

segue ...

<i>Ramo</i>	<i>De</i>	<i>Para</i>	<i>Resistência do ramo (Ω)</i>	<i>Reatância do ramo (Ω)</i>	<i>Potência Ativa Demandada (KW)</i>	<i>Potência Reativa Demandada (KVar)</i>
120	119	120	0.12382	0.28583	32.072	13.596
121	0	121	0.01126	0.02598	61.084	25.894
122	121	122	0.64910	149.842	0.0	0.0
123	122	123	0.04502	0.10394	94.622	46.260
124	123	124	0.52640	0.18056	49.858	24.375
125	123	125	0.02064	0.04764	123.164	60.214
126	125	126	0.53071	0.27917	78.350	38.304
127	125	127	0.09755	0.22520	145.475	71.121
128	127	128	0.11819	0.27283	21.369	10.447
129	127	129	0.13882	0.32047	74.789	36.564
130	129	130	0.04315	0.09961	227.926	111.431
131	130	131	0.09192	0.21220	35.614	17.411
132	131	132	0.16134	0.37244	249.295	121.877
133	132	133	0.37832	0.37775	316.722	154.842
134	133	134	0.39724	0.39664	333.817	163.199
135	134	135	0.29320	0.29276	249.295	121.877
136	7	73	0.13132	0.30315	0.0	0.0
137	9	24	0.26536	0.13958		
138	15	83	0.14187	0.14166		
139	38	135	0.08512	0.08499		
140	25	51	0.04502	0.10394		
141	50	96	0.14187	0.14166		
142	55	98	0.14187	0.14166		
143	62	120	0.03940	0.09094		
144	66	79	0.12944	0.29882		
145	79	131	0.01688	0.03898		
146	84	135	0.33170	0.17448		
147	91	104	0.14187	0.14166		
148	90	129	0.07692	0.17756		
149	90	103	0.07692	0.17756		
150	92	104	0.07692	0.17756		
151	92	132	0.07692	0.17756		
152	96	120	0.26482	0.26443		
153	110	47	0.49696	0.64567		
154	126	76	0.17059	0.08973		
155	128	77	0.05253	0.12126		
156	135	98	0.29320	0.29276		