

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

SIMONE SILVA FRUTUOSO DE SOUZA

**ALGORITMO GRASP ESPECIALIZADO APLICADO AO PROBLEMA DE
RECONFIGURAÇÃO DE ALIMENTADORES EM SISTEMAS DE
DISTRIBUIÇÃO RADIAL**

Ilha Solteira

2013

SIMONE SILVA FRUTUOSO DE SOUZA

**ALGORITMO GRASP ESPECIALIZADO APLICADO AO PROBLEMA DE
RECONFIGURAÇÃO DE ALIMENTADORES EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO
RADIAL**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira - UNESP, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área do Conhecimento: Automação.

Prof. Dr. Rubén Augusto Romero Lázaro

Orientador

Prof^a. Dr^a. Marina Lavorato de Oliveira

Co-orientadora

Ilha Solteira

2013

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S729a Souza, Simone .
Algoritmo grasp especializado aplicado ao problema de reconfiguração de alimentadores em sistemas de distribuição radial / Simone Souza. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2013
118 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2013

Orientador: Rubén Augusto Romero Lázaro
Co-orientador: Marina Lavorato de Oliveira
Inclui bibliografia

1. Ampl. 2. Metaheurística Grasp. 3. Problema de programação não linear inteiro misto. 4. Reconfiguração de sistemas de distribuição. 5. Knitro.



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

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

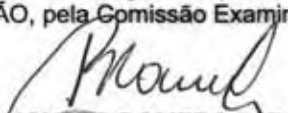
TÍTULO: Algoritmo GRASP especializado aplicado ao problema de reconfiguração de alimentadores em sistemas de distribuição radial

AUTORA: SIMONE SILVA FRUTUOSO DE SOUZA

ORIENTADOR: Prof. Dr. RUBEN AUGUSTO ROMERO LAZARO

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

Aprovada 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. JOSE ROBERTO SANCHES MANTOVANI
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. ARTURO SUMAN BRETAS
Departamento de Engenharia Elétrica / Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Data da realização: 25 de fevereiro de 2013.

DEDICO

Ao meu pai **José Carlos Frutuoso de Souza** e minha mãe **Santina Pereira da Silva Souza**, pela educação, amor e por todo apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus irmãos **José Rodrigo Silva Frutuoso de Souza**, **Ricardo Silva Frutuoso de Souza** e **Diego Silva Frutuoso de Souza**, pelo apoio e motivação.

Ao meu namorado **Fernando Parra dos Anjos Lima** pelo amor, compreensão e incentivo.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me concedido o dom da vida, conhecimento, força, persistência, fé para não desistir, e para que conseguisse alcançar meus objetivos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Rubén Augusto Romero Lázaro, agradeço pela confiança, atenção, dedicação, empenho. Agradeço pelo apoio, direcionamento e orientação no trabalho realizado, onde tive um grande aprendizado, vivência e experiência. Uma pessoa a quem admiro e me espelho.

À minha co-orientadora Profa. Dra. Marina Lavorato de Oliveira, que sempre esteve disponível, agradeço pela atenção, dedicação, empenho e pela paciência. Agradeço pelo apoio, direcionamento e orientação no trabalho realizado.

Aos meus pais, José Carlos Frutuoso de Souza e Santina Pereira da Silva Souza, que são exemplos de vida, que sempre estiveram ao meu lado dando total apoio e incentivo em minha busca pela realização de meus sonhos. Aos meus irmãos, José Rodrigo Silva Frutuoso de Souza, Ricardo Silva Frutuoso de Souza e Diego Silva Frutuoso de Souza, pelo carinho e apoio. Ao meu namorado e amigo Fernando Parra dos Anjos Lima, pelo amor, incentivo, paciência, e compreensão.

Agradeço a todos os companheiros e amigos do laboratório de pesquisa LAPSEE, em especial Julio Lopes, Donizete Ritter, Eliane Silva, Joel David, Lucas Teles, Adriana Resende, Emivan Ferreira, Gloria Patricia, Marlon Borges, Diego Piasson, Adriana Lima.

Aos meus amigos que sempre torceram e me apoiaram Regiane Gomes, Tamires Yamada, Celiane Sampaio, Mariane Freitas, Izabela Navarro, Juliana Pátaro, Miriam Bondinhon, Marcela Alexandra Inácio, Amanda Parra, Iris Matilde Parra e José dos Anjos.

Agradeço ao Alfredo Bonini Neto, pelo constante incentivo, amizade, desde a graduação sempre me apoiando, me incentivando, obrigado pela confiança.

Agradeço a banca de qualificação o prof. Dr. José Roberto Sanches Mantovani e o prof. Dr. Fábio Bertequini Leão que contribuíram, com ótimas ideias para melhorar a dissertação. Agradeço ao prof. Dr. Arturo Suman Bretas que participou da banca de defesa, com ótimas contribuições.

Meus agradecimentos a CAPES, por ter me proporcionado recursos, que possibilitaram a dedicação exclusiva.

RESUMO

Neste trabalho apresenta-se uma metodologia para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica, que é modelado como um problema de Programação Não Linear Inteiro Misto (PNLIM). Para resolver este problema utilizou-se a metaheurística GRASP especializada. O objetivo do problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica é encontrar a melhor topologia radial para um sistema de distribuição de energia elétrica de forma que as perdas ativas do sistema sejam as menores possíveis. Na metodologia proposta, todas as chaves de interconexão do sistema de distribuição estão abertas no início do processo e a cada passo um circuito é conectado no sistema e uma solução factível é construída. O algoritmo GRASP foi escrito na linguagem de modelagem matemática AMPL onde a cada iteração é resolvido um problema de programação não linear utilizando o solver comercial KNITRO. Para evidenciar a eficácia da metodologia proposta foram realizados testes com sistemas de 14, 33, 70, 84, 119, 136 e 417 barras, estes resultados são comparados com os resultados encontrados na literatura especializada.

Palavras-chave: AMPL. Metaheurística GRASP. Problema de programação não linear inteiro misto. Reconfiguração de sistemas de distribuição. KNITRO.

ABSTRACT

This work presents a methodology to solve the electric power distribution systems reconfiguration problem, which is modeled as a Mixed Integer Nonlinear Programming problem (MINLP). Specialized metaheuristic GRASP was used to solve the problem. The aim of the reconfiguration problem is to find the best topology for a radial electric power distribution system so that the active power losses are as small as possible. In the proposed methodology, at the beginning of the solution process all switches that interconnect the distribution system are open and in each next step a circuit is connected to the distribution system and therefore a feasible solution is constructed. The GRASP algorithm was written in AMPL mathematical modeling language where in each iteration was solved a nonlinear programming problem using the commercial solver KNITRO. To demonstrate the effectiveness of the proposed methodology, tests were performed with distribution systems of 14, 33, 70, 84, 119, 136, and 417 buses, these results are compared with results found in literature.

Keywords: AMPL. GRASP metaheuristic. mixed integer nonlinear programming. Electric power distribution systems reconfiguration. KNITRO.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema elétrico radial (a), Árvore conexa representando o sistema elétrico (b).	32
Figura 2 – Passos da sub-rotina para identificação de laços.	46
Figura 3 - Fluxograma da fase construtiva.	47
Figura 4 - Fluxograma da fase de melhoria local.	49
Figura 5 - Topologia do sistema de 14 barras após o pré-processamento.	51
Figura 6 - Iteração 1 da fase construtiva.	53
Figura 7 - Iteração 11 da fase construtiva.	58
Figura 8 - Topologia final da fase construtiva.	61
Figura 9 - Topologia da iteração 1 da fase de melhoria local.	61
Figura 10 - Topologia da iteração 2 da fase de melhoria local.	62
Figura 11 - Topologia da iteração 3 da fase de melhoria local.	63
Figura 12 - Topologia da iteração 4 da fase de melhoria local.	63
Figura 13 - Topologia da iteração 5 da fase de melhoria local.	64
Figura 14 - Topologia da iteração 6 da fase de melhoria local.	64
Figura 15 - Topologia da iteração 7 da fase de melhoria local.	65
Figura 16 - Topologia final encontrada na fase de melhoria local.	65
Figura 17 - Sistema de 33 barras.	67
Figura 18 - Níveis de tensão obtidos para o sistema de 33 barras.	68
Figura 19 - Sistema de 70 Barras.	69
Figura 20 - Níveis de tensão obtidos para o sistema de 70 barras.	70
Figura 21 - Sistema de 84 barras.	71

Figura 22 - Níveis de tensão obtidos para o sistema de 84 barras.	73
Figura 23 - Níveis de tensão obtidos para o sistema de 119 barras.	76
Figura 24 - Níveis de tensão obtidos para o sistema de 136 barras.	77
Figura 25 - Níveis de tensão obtidos para o sistema de 417 barras.	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fluxo de potência aparente dos circuitos que podem ser fechados.	52
Tabela 2 - Candidatos da lista RCL.	52
Tabela 3 - Fluxo de potência aparente dos circuitos que podem ser fechados.	54
Tabela 4 - Candidatos da lista RCL.	55
Tabela 5 - Fluxo de potência aparente dos circuitos que podem ser fechados.	56
Tabela 6 - Candidatos da lista RCL.	56
Tabela 7 - Fluxo de potência aparente dos circuitos que podem ser fechados.	59
Tabela 8 - Candidatos da lista RCL.	59
Tabela 9 – Iterações da fase construtiva, com os circuitos adicionados em Ω_1 e Ω_0 . ..	60
Tabela 10 - Resultados obtidos para o sistema de 33 barras.....	68
Tabela 11 - Resultados obtidos para o sistema de 70 barras.....	70
Tabela 12 - Resultados obtidos para o sistema de 84 barras.....	72
Tabela 13 - Resultados da análise do parâmetro alfa para o sistema de 84 barras.	72
Tabela 14 - Quantidade de elementos na lista para o sistema de 84 barras.	73
Tabela 15 - Resultados obtidos para o sistema de 119 barras.....	74
Tabela 16 - Resultados da análise do parâmetro alfa para o sistema de 119 barras	75
Tabela 17 - Quantidade de elementos na lista para o sistema de 119 barras.	75
Tabela 18 - Resultados obtidos para o sistema de 136 barras.....	77
Tabela 19 - Resultados obtidos para o sistema de 417 barras.....	78
Tabela 20 - Análise do índice de sensibilidade para o sistema de 84 barras.	80

LISTA DE SÍMBOLOS

Ω_b	Conjunto de Barras;
Ω_1	Conjunto de circuitos já fechados;
Ω_0	Conjunto de circuitos já abertos definitivamente;
Ω_c	Conjunto de circuitos livres (ainda podem ser fechados ou abertos);
Ω_l	Conjunto de circuitos ($\Omega_1 \cup \Omega_0 \cup \Omega_c$);
$\Omega_{bi,1}$	Conjunto de barras conectadas na barra i e cujos circuitos já foram fechados;
$\Omega_{bi,c}$	Conjunto de barras conectadas na barra i e cujos circuitos se encontram livres;
P_{ij}	Fluxo de potência ativa que sai da barra i para a barra j ;
Q_{ij}	Fluxo de potência reativa que sai a barra i para barra j ;
Pd_i	Demanda de potência ativa na barra i ;
Qd_i	Demanda de potência reativa na barra i ;
Ps_i	Potência ativa fornecida pela subestação da barra i ;
Qs_i	Potência reativa fornecida pela subestação da barra i ;
\underline{V}	Magnitude de tensão mínima;
\bar{V}	Magnitude de tensão máxima;
V_i	Magnitude de tensão na barra i ;
\bar{S}_{ij}	Limite de fluxo de potência aparente no circuito $i-j$;
g_{ij}	Condutância do circuito $i-j$;
b_{ij}	Susceptância do circuito $i-j$;
n_b	Número de barras do sistema ($n_b = \Omega_b $);
n_1	Número de circuitos já fechados;
x_{ij}	Variável binária que determina se o circuito entre as barras i e j está fechado ou aberto;

θ_{ij}	Diferença angular entre as barras i e j ;
$f(x)$	Função objetivo;
$h(x_i)$	Indicador de sensibilidade;
h^{\max}	Máximo valor de sensibilidade;
h^{\min}	Mínimo valor de sensibilidade;
$ISFC_{ij}$	Índice de sensibilidade do fechamento de circuitos;
S_{ij}	Fluxo de potência aparente nos circuitos ij ;
S_{\max}	Máximo valor de fluxo de potência aparente nos circuitos ij ;
S_{\min}	Mínimo valor de fluxo de potência aparente nos circuitos ij ;
α	Componente aleatória do algoritmo GRASP;
cc_i	Corte de Carga na barra i ;
ν	Perdas ativas;
\propto	Símbolo de Proporcionalidade;

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	Objetivos e Contribuição.....	18
1.2	Estrutura do Texto.....	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1	Introdução.....	20
2.2	Modelo matemático.....	20
2.3	Metodologias.....	22
2.3.1	Heurísticas.....	22
2.3.2	Metaheurísticas.....	23
2.3.3	Otimização clássica.....	27
2.3.4	Redes Neurais Artificiais.....	28
3	PROBLEMA DE RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO.....	30
3.1	Modelo matemático.....	30
4	METAHEURÍSTICA GRASP.....	34
4.1	Teoria Básica da Metaheurística GRASP.....	34
4.2	Fase de Pré-processamento da Metaheurística GRASP.....	35
4.3	Fase Construtiva da Metaheurística GRASP.....	36
4.4	Fase de Melhoria Local da Metaheurística GRASP.....	37
5	METAHEURÍSTICA GRASP APLICADA AO PROBLEMA DE RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO.....	39
5.1	Fase de Pré-processamento.....	40
5.2	Formulação do PNL para a Fase Construtiva.....	40

5.3	Fase Construtiva	42
5.4	Formulação do PNL para a Fase de Melhoria Local.....	48
5.5	Fase de Melhoria Local	48
5.6	Critério de Parada do GRASP	50
5.7	Exemplo Didático.....	50
5.7.1	Fase de Pré-processamento	50
5.7.2	Fase Construtiva	51
5.7.3	Fase de Melhoria Local	61
6	RESULTADOS	67
6.1	Sistema de 33 Barras	67
6.2	Sistema de 70 Barras	69
6.3	Sistema de 84 Barras	71
6.4	Sistema de 119 Barras	74
6.5	Sistema de 136 Barras	76
6.6	Sistema de 417 Barras	78
6.7	Análise do índice de sensibilidade	79
6.8	Comentários.....	81
7	CONCLUSÕES.....	82
7.1	Trabalhos Futuros.....	82
	REFERÊNCIAS	84
	APÊNDICE A - PUBLICAÇÕES.....	90
	ANEXO A - DADOS DOS SISTEMAS TESTES	92
	A.1 Sistema de 14 Barras	92
	A.2 Sistema de 33 Barras	93
	A.3 Sistema de 70 Barras	94

A.4 Sistema de 84 Barras	96
A.5 Sistema de 119 Barras	99
A.6 Sistema de 136 Barras	103
A.7 Sistema de 417 Barras	107

1 INTRODUÇÃO

Atualmente os sistemas elétricos de potência estão sendo objetivo de muitas pesquisas e investimentos visando à modernização, segurança e melhorias nas condições de operação, em especial os sistemas de distribuição de energia elétrica.

Devido ao crescimento econômico do país, as redes de distribuição de energia elétrica são constantemente submetidas a aumentos de demanda, e isto faz com que o sistema necessite de maiores investimentos em relação a expansão e também em operação, tendo em vista que as companhias distribuidoras estão sujeitas ao agente regulador dos sistemas.

O sistema de distribuição deve operar de forma econômica e confiável em qualquer condição, uma vez que este opera em regime permanente. Para aumentar sua eficiência e diminuir os custos operacionais uma alternativa é reduzir as perdas ativas. O autor Cavelluci (1998) destaca que um sistema de distribuição operando com tensão e corrente em níveis estáveis, influenciam diretamente no aumento da vida útil dos equipamentos instalados no sistema. Neste sentido a reconfiguração de sistemas pode ser uma importante ferramenta para melhoria das condições de estabilidade de tensão e diminuição da corrente, principalmente em momentos de alta demanda do sistema (PEREIRA, 2010).

A reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica tem o objetivo de encontrar a melhor topologia para o sistema de distribuição através da abertura e fechamento de chaves de interconexões mantendo uma topologia radial e os limites de tensão em níveis preestabelecidos pelas normas reguladoras. A reconfiguração é um procedimento realizado principalmente, visando minimizar as perdas ativas do sistema, melhorar os níveis de tensão, manter a confiabilidade do sistema, fazer isolamento de faltas e a realização de manutenção preventiva. Os chaveamentos são utilizados para manter o controle sobre a rede, e assegurar a operação dentro de altos padrões de qualidade de fornecimento de energia elétrica (GUIMARÃES, 2005). A reconfiguração é uma alternativa barata, permitindo postergar investimentos no reforço de linhas, subestações entre outros (PEREIRA, 2010).

O problema de reconfiguração é de natureza combinatorial e pode ser modelado como um problema de programação não linear inteiro misto (PNLIM) (MERLIN; BACK, 1975), onde o objetivo é minimizar as perdas de potência ativa no sistema elétrico, sujeito às restrições essenciais para a operação do sistema como a condição de radialidade, limites de

tensão, limites de corrente nos circuitos, além de ter que satisfazer a primeira e a segunda leis de Kirchhoff no sistema. A dimensão do problema está relacionada ao número de chaves envolvidas na busca de uma configuração ótima. Dado um sistema com X chaves, existem 2^X possíveis configurações correspondendo às posições aberta e fechada de todas as chaves no sistema. Algumas destas configurações não são permitidas, por não satisfazerem a restrição de radialidade, ou não são factíveis, por violarem as restrições operacionais do problema (DELBEM, 2002). Por outro lado o problema cresce exponencialmente com a quantidade e disposição destes dispositivos.

Os algoritmos heurísticos e as metaheurísticas são cada vez mais utilizados para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição, embora na maioria das vezes não garantam a solução ótima global para o problema. No entanto, tais algoritmos fornecem soluções de boa qualidade. São encontradas na literatura, diversas metodologias para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição, entre estas as heurísticas (MERLIN; BACK, 1975), metaheurísticas como o Algoritmo Genético (NARA et al., 1992), Busca Tabu (ZHANG et al., 2007), Colônia de Formiga (CABEZAS, 2007), *Simulated Annealing* (CHANG; KUO, 1994), GRASP (OLIVEIRA, 2011) e os métodos clássicos como algoritmo branch and bound (ABUR, 1996).

Neste trabalho será apresentada uma metodologia para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando a metaheurística GRASP. A metaheurística GRASP foi proposta por (FEO; RESENDE, 1989), e desenvolvida utilizando apenas conceitos existentes no campo da pesquisa operacional, diferente da maioria das metaheurísticas que foram desenvolvidas a partir de fenômenos naturais e biológicos. O algoritmo GRASP é composto por duas fases principais, sendo um algoritmo heurístico construtivo (AHC) e um algoritmo de busca local.

O AHC do GRASP tem por objetivo fornecer uma solução factível de boa qualidade. Esta solução é construída passo a passo, onde a cada iteração um circuito candidato é escolhido para fazer parte da solução do problema, através de um indicador de sensibilidade, indicando uma lista dos candidatos mais atraentes para serem introduzidos no sistema. Um elemento da lista é escolhido aleatoriamente para ser fechado, passando a fazer parte da solução do problema. Este processo se repete até que uma topologia radial seja encontrada.

Na fase de melhoria local é realizada uma busca por uma melhor solução na vizinhança da solução encontrada pelo AHC, se uma solução vizinha de melhor qualidade é encontrada, então a solução corrente recebe a solução vizinha, caso contrário a solução corrente não sofre modificações. A metaheurística GRASP está demonstrando ser uma técnica muito eficiente e de fácil implementação para problemas complexos. Uma vantagem do GRASP em relação a outras metaheurísticas é a capacidade de construir várias soluções factíveis de boa qualidade, e depois realizar um processo de busca em vizinhança, com o objetivo de melhorar as soluções encontradas tentando percorrer assim, todo o espaço de busca do problema.

1.1 Objetivos e Contribuição

Esta dissertação tem como objetivos e contribuições:

- Formulação e implementação computacional de um tipo de metaheurística GRASP para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição radiais de energia elétrica;
- Formulação de uma proposta original para a fase construtiva do GRASP, formulando um modelo de programação não linear que permite desenvolver a fase construtiva de forma eficiente;
- Formulação de uma estratégia eficiente na fase construtiva que permite gerar apenas topologias radiais. Essa estratégia é preservada na implementação da fase de melhoria local;
- Desenvolvimento de um algoritmo GRASP que apresenta excelente desempenho quando comparado com outras metaheurísticas;
- Apresentar uma revisão bibliográfica comparando as diferentes metodologias para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição.

1.2 Estrutura do Texto

O texto está organizado da seguinte forma:

Capítulo 1: Introdução

Neste capítulo apresentam-se os principais aspectos que fundamentam o desenvolvimento deste trabalho. O enfoque do trabalho, a proposta, os objetivos e contribuições fazem parte desta introdução.

Capítulo 2: Revisão bibliográfica

Neste capítulo será apresentado o processo de estudo para a realização deste trabalho, sendo destacados os principais, livros, artigos, dissertações e teses utilizadas como embasamento teórico para a realização deste trabalho.

Capítulo 3: Problema de reconfiguração de sistemas de distribuição

Neste capítulo apresentam-se os conceitos do problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica, sua aplicação e o modelo matemático.

Capítulo 4: Metaheurística GRASP

Este capítulo apresenta os conceitos teóricos da Metaheurística GRASP.

Capítulo 5: Metaheurística GRASP aplicada ao problema de reconfiguração de sistemas de distribuição

Apresenta-se a metodologia utilizada no desenvolvimento deste trabalho, onde serão apresentadas as fases do algoritmo GRASP desenvolvido para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição e também um exemplo didático.

Capítulo 6: Resultados

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos por esta metodologia, os quais são comparados com os resultados presentes na literatura especializada.

Capítulo 7: Conclusões

Finalmente, nesta seção, encontram-se as conclusões deste trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

Apêndice A: Publicações

Neste apêndice encontram-se as publicações realizadas pela autora no período do curso de mestrado.

Anexo A: Dados dos sistemas testes

Apresentam-se os dados dos sistemas testes utilizados neste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica dos modelos matemáticos e metodologias utilizadas para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição, que são encontrados na literatura especializada.

2.1 Introdução

O problema de reconfiguração de sistemas de distribuição é um problema clássico de otimização relacionado aos sistemas de distribuição de energia elétrica e tem como objetivo identificar uma topologia ótima para operação de um sistema radial, visando obter mínimas perdas ativas, atender a demanda de energia e manter a confiabilidade do sistema. Os sistemas elétricos operam com configuração radial, embora tenham estrutura malhada, isto é realizado para facilitar a coordenação e proteção do sistema, e também reduzir a corrente de curto circuito a subestação.

2.2 Modelo matemático

Nesta subseção será apresentada uma análise dos modelos matemáticos encontrados na literatura.

Em (RADHA et al., 2003) foi proposto um modelo para tratar o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição, que tem por objetivo minimizar as perdas ativas. Este modelo trata as restrições de limites de demanda, magnitude de tensão nas barras, limite de fluxo de corrente, as leis de Kirchhoff para corrente e para tensão, e a restrição de radialidade, que é apresentada de forma implícita.

Em (GUIMARÃES, 2005) resolve-se o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição, em que a função objetivo visa maximizar a margem de carregamento de redes de distribuição. As restrições de limite de magnitude de tensão, e limite de magnitude de corrente são tratadas pelo modelo e a radialidade é apresentada de maneira implícita.

Em (BUENO, 2005; ZVIETCOVICH, 2006) utiliza-se um método de fluxo de carga para encontrar o estado de operação do sistema elétrico. Nestes trabalhos o problema é formulado como um problema de Programação Não Linear Inteiro Misto, e a radialidade é

apresentada de forma implícita. O objetivo dos métodos apresentados é reduzir as perdas ativas do sistema.

Já em (PEREIRA, 2010) é utilizado o método de fluxo de carga em conjunto com a função de penalidade-Newton para encontrar o estado de operação do sistema. Em (OLIVEIRA, 2011) utiliza-se o fluxo de carga com o método de Newton e o fluxo de carga com o método de varredura para encontrar os pontos de operação do sistema. O objetivo de ambos os trabalhos é minimizar as perdas ativas dos sistemas de distribuição, trabalhando com o problema formulado através de Programação Não Linear Inteiro Misto.

Em (RUGTHAICHAROENCHEEP; SIRISUMRANNUKUL, 2010) é apresentada uma abordagem para resolver o problema de reconfiguração de alimentadores trifásicos com carregamento desequilibrado, onde a função objetivo do problema é minimizar as perdas ativas do sistema elétrico. Neste contexto é utilizado um algoritmo de fluxo de carga trifásico. O problema é submetido às restrições de limites de carregamento nos pontos de tensão, carga de ponto de interrupção e potência fornecida pelo alimentador.

Um modelo matemático de Programação Não Linear Binário Misto é apresentado em (LAVORATO et al., 2012) para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica. A função objetivo representa as perdas de energia na operação do sistema de distribuição, neste modelo são tratadas as seguintes restrições: as duas leis de Kirchhoff apresentadas na forma de equações de fluxo de carga generalizadas, limite da magnitude de tensão, limite de fluxo de corrente e a restrição de radialidade que é apresentada de maneira explícita.

Em (TAYLOR; HOVER, 2012) apresenta-se um modelo convexo quadrático para reconfiguração de sistemas de distribuição. A função objetivo é de minimização das perdas ativas através de acoplamento quadrático. No modelo são apresentadas restrições de limites de magnitude de tensão e fluxo de corrente e balanço de potência, também apresentam restrições que garantem a conectividade da topologia, isto é, garante que a topologia final seja disposta em árvore, assim a radialidade é apresentada de maneira explícita.

2.3 Metodologias

As técnicas encontradas na literatura para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição podem ser agrupadas em heurísticas, metaheurísticas, técnicas de otimização clássicas e redes neurais artificiais.

2.3.1 Heurísticas

Alguns trabalhos propõem algoritmos heurísticos construtivos para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição. Na sequência analisamos alguns desses trabalhos.

Em 1975 os pesquisadores franceses Merlin e Back apresentaram a primeira proposta para redução de perdas no sistema de distribuição de energia elétrica, os autores apresentaram dois métodos de resolução, uma heurística construtiva e um algoritmo de otimização clássica para a resolução do problema de reconfiguração de sistemas de distribuição (MERLIN; BACK, 1975).

O método heurístico proposto pelos autores consistia em, inicialmente, fechar todas as chaves de interconexões abertas no sistema, fazendo com que o sistema ficasse totalmente malhado, na sequência resolve-se os problemas de fluxo de carga do sistema, e encontram-se o fluxo de potência aparente de cada um dos circuitos. O circuito que apresenta o menor fluxo de potência aparente é escolhido como candidato para ter sua chave de interconexão aberta, este processo finaliza uma iteração do algoritmo heurístico construtivo. Este procedimento se repete até que uma solução radial seja encontrada, e ficou conhecido como “abertura sequencial de chaves”.

No ano de 1988 os pesquisadores Civanlar, Grainger e Lee, propuseram um método heurístico conhecido como “troca de ramos” (*branch-exchange*), que consistia em partir inicialmente de uma configuração radial do sistema. Então se alterava esta configuração através do fechamento de uma chave de interconexão e a abertura de outra, de maneira que a radialidade do sistema fosse mantida. Para realizar a escolha dos candidatos a abertura e fechamento, analisavam-se os níveis de tensão nos terminais dos circuitos, identificando a variação das perdas, devido à transferência de carga de um circuito para o outro. Este método apresentou bons resultados quando aplicado ao sistema de 14 barras proposto no trabalho (CIVANLAR et al., 1988).

O método heurístico proposto por Merlin e Back (1975), foi modificado pelos pesquisadores Shirmohammadi e Hong (1989). Nas modificações realizadas os autores incluíram restrições de limites de tensão nos barramentos e nas linhas, e também modificaram o cálculo do problema de fluxo de carga, considerando as perdas reativas, o que anteriormente não acontecia. Neste trabalho apresentaram-se resultados com desempenho satisfatório em três sistemas de distribuição.

Em 1992 os autores Goswami e Basu desenvolveram uma melhoria no algoritmo proposto por Shirmohammadi e Hong (1989), onde apenas uma chave de interconexão era fechada, visando formar um único laço, então se calcula o fluxo de potência dos circuitos do laço, e encontra-se o circuito com o menor fluxo de potência, este procedimento era realizado até percorrer todos os laços do sistema. Neste trabalho os resultados obtidos foram comparados com os melhores até então encontrados na literatura, e obtiveram-se os mesmos resultados (GOSWAMI; BASU, 1992).

Em (BARAN; WU, 1989) foi apresentada uma nova metodologia baseada no algoritmo de (CIVANLAR et al., 1988) em que aprimoraram a troca de circuitos e formularam dois métodos para o cálculo do problema de fluxo de carga, específico para redes radiais. Segundo Braz (2010) estas modificações fizeram com que o problema de reconfiguração passasse a ser reconhecido como um problema combinatorial. Os autores apresentaram o sistema teste de 33 barras, e obtiveram um desempenho satisfatório com o método.

Em Gomes et al. (2005), é apresentado um método que se divide em duas etapas, inicialmente uma heurística encontra uma configuração radial a partir de uma topologia totalmente malhada, onde a cada passo um circuito é retirado. Estas chaves são abertas de maneira a eliminar os laços do sistema. A segunda etapa consiste em um refinamento da solução encontrada na primeira etapa através do método de troca de ramos. Neste trabalho são apresentados resultados obtidos em sistemas de distribuição reais de grande escala.

2.3.2 *Metaheurísticas*

A seguir apresentam-se alguns trabalhos que utilizam metaheurísticas para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição, entre eles estão o Algoritmo Genético, a Busca Tabu, Colônia de Formigas, *Simulated Annealing* e GRASP.

O algoritmo genético foi proposto pelo pesquisador John H. Holland em 1975. Esta metaheurística visa reproduzir sistemas artificiais com propriedades aproximadamente similares aos sistemas naturais, como o conceito da evolução da espécie, segundo o qual sobrevive o indivíduo geneticamente melhor adaptado para superar os problemas do meio ambiente, isto é, o mecanismo da evolução e da genética natural (HOLLAND, 1975). A seguir encontram-se trabalhos que utilizam o algoritmo genético.

No ano de 1992, foi apresentado o primeiro método baseado em algoritmos genéticos para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição, proposto por Nara et al. (1992). Neste trabalho os genes foram codificados através de uma representação binária baseados nos estados dos circuitos do sistema, onde “0” indica chave aberta e “1” indica chave fechada. Os autores testaram a metodologia em dois sistemas de distribuição de médio porte obtendo melhores desempenhos quando comparados com resultados disponíveis na literatura.

Um algoritmo genético modificado foi proposto por (ROMERO, 2001) onde a contribuição foi uma nova maneira de realizar a recombinação, permitindo que configurações não radiais fossem evitadas.

No ano de 2005 foi proposto um algoritmo genético para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição sob diversas condições de carregamento do sistema. Foi utilizado o algoritmo de *kruskal* para geração da população inicial. O processo de crossover é aplicado visando manter preservadas as informações genéticas dos antecessores e tem como objetivo a geração de configurações factíveis (AMASIFEN et al., 2004).

Em (MENDONZA et al., 2006) apresenta-se uma metodologia baseada no algoritmo genético para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição, a ideia principal do trabalho é diminuir o espaço de busca do algoritmo alterando o processo de *crossover* utilizando uma mutação direcionada.

No trabalho de (CARREÑO et al., 2008) é apresentado o algoritmo genético com uma nova codificação, e utilizando um eficiente operador de recombinação que permitiu a geração de configurações factíveis. Este método foi testado em sistemas de distribuição reais, mostrando excelentes resultados e tempo computacional reduzido.

A metaheurística Busca Tabu (*Tabu Search*) foi proposta pelo pesquisador Fred Glover na década de 80. Este método permite resolver um problema complexo de maneira inteligente. Consiste basicamente em uma estratégia que guia e modifica outras heurísticas de modo a produzir soluções além das que seriam geradas normalmente em uma busca local, o algoritmo pode ser utilizado na resolução de uma gama grande de problemas combinatórios com grande sucesso. Este método difere dos outros por não ter uma origem relacionada com processos de otimização biológico ou químico (GLOVER; KOCHENBERGER, 2003).

Em Guimarães (2005), foi desenvolvido de forma adicional um algoritmo de Busca Tabu para a minimização das perdas ativas de potência, inicialmente foi implementado o algoritmo de busca tabu com memória de curto prazo e depois adicionadas melhorias como memória baseada em frequência objetivando intensidade e diversidade. O algoritmo inicia com uma configuração factível qualquer ou então de boa qualidade gerada pelo algoritmo de Shirmohammadi. Observou-se que quando é utilizada uma configuração inicial gerada, por um algoritmo heurístico, as configurações encontradas após a reconfiguração tem melhor qualidade que as obtidas quando utilizada uma configuração inicial qualquer considerando o mesmo número de iterações para os dois casos.

Em (ZHANG et al., 2007) foi utilizado um algoritmo de Busca tabu especializado para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição. Os autores propuseram um operador de mutação que utilizava expressões similares a formulação apresentada em (BARAN; WU, 1989) para reduzir o espaço de busca.

A metaheurística de Colônia de Formigas (ACO – *ant colony optimization*) foi apresentada em 1996 por Marco Dorigo. Esta metaheurística simula o comportamento de uma colônia de formigas, em especial a maneira como são capazes de determinar o menor caminho para uma fonte de alimento. Portanto o método utiliza formigas artificiais que cooperam entre si para encontrar soluções ótimas, baseando na quantidade de feromônio (DORIGO et al., 1996)

Em (CABEZAS, 2007) apresentou-se um algoritmo baseado no comportamento de colônia de formigas para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição. O método proposto utiliza uma representação através de circuitos e barras, onde “agentes” se movem identificando as chaves que devem permanecer fechadas para minimizar as perdas do sistema.

Uma proposta baseada em colônia de formigas foi apresentada por (CHANG, 2008) para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição, na qual, formigas artificiais escolhem quais chaves devem ser abertas para formar uma topologia radial. Este método foi aplicado em sistemas de 16 e 94 barras, obtendo bons resultados.

Em (PEREIRA, 2010), apresenta-se um método baseado em colônia de formigas para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição, na qual, formigas artificiais (agentes) exploram o meio ambiente (sistema de distribuição) e trocam informações para tentar encontrar a topologia que apresenta menores valores de perdas ativas. Para isso, foi feita uma adequação para o problema de reconfiguração, modificando a forma como os agentes procuram pela solução ótima. Isto tornou o método mais generalizado e permitiu que o algoritmo trabalhasse em um espaço mais abrangente de soluções factíveis. Foram realizados testes em sistemas de 33, 69 e 136 barras, obtendo resultados considerados bons quando comparados com as técnicas existentes na literatura.

Em 1950 a técnica de *Annealing* foi apresentada pelo pesquisador Metrópolis para o processo de cristalização de metais. Porém apenas na década de 1980 o autor Kirkpatrick (KIRKPATRICK et al., 1983) percebeu que o método físico se assemelhava com alguns problemas de otimização combinatória, e então foi proposto um método estocástico de otimização que consiste em uma busca local probabilística, e se fundamenta em uma analogia com a termodinâmica. Isto é, no processo térmico dito *Annealing* ou recozimento, utilizado em metalúrgicas para obtenção de estados de baixa energia em metais. Durante o recozimento o material passa por vários estados possíveis, que correspondem a soluções do espaço de busca, surgindo a metaheurística *Simulated Annealing*.

Foi proposta por Zimmerman (1992), a utilização da metaheurística *Simulated Annealing* com o objetivo de reduzir as perdas ativas de um sistema trifásico. Em Guimarães (2009) é proposto um sistema integrado que utiliza as metaheurísticas *Simulated Annealing* e o algoritmo genético. Neste método utiliza-se o algoritmo genético para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição e a partir da solução encontrada utiliza-se o *Simulated Annealing* para coordenar as manobras dos *taps* do transformador da subestação de forma automática. Foram apresentados resultados com os sistemas de 69 barras e 135 barras, obtendo bons resultados.

A metaheurística GRASP foi apresentada em 1989 por Thomas A. Feo e Mauricio G. C. Resende. A metaheurística GRASP é uma junção de um algoritmo heurístico construtivo do tipo guloso e um algoritmo de busca local e tem sido muito aplicado na resolução de problemas complexos (FEO; RESENDE, 1989).

Em (OLIVEIRA, 2011) o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição é resolvido utilizando a metaheurística GRASP. O objetivo do trabalho é minimizar as perdas ativas do sistema de distribuição. Na metodologia utilizada todas as chaves de interconexões do sistema estão fechadas no início do processo e a cada iteração da fase construtiva do GRASP resolve um fluxo de carga para calcular o ponto de operação do sistema, e assim em cada iteração um circuito é desconectado do sistema até encontrar uma topologia radial, a qual se difere deste trabalho pelo algoritmo heurístico construtivo (AHC). Na metodologia proposta neste trabalho o AHC considera que no início do processo iterativo todos os circuitos estão abertos e um problema de programação não linear (PNL) é resolvido a cada iteração para escolher um circuito a ser conectado no sistema, este processo se repete até que seja construída uma solução radial.

2.3.3 Otimização clássica

Segundo Sarfi et al., (1994) as técnicas de otimização clássica não são muito aplicadas para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição, pois requerem maior tempo computacional. Sendo assim na literatura especializada encontram-se apenas alguns exemplos.

Em 1975 os autores Merlin e Back apresentaram uma metodologia para resolver o problema de reconfiguração em redes de pequeno porte, utilizando programação linear inteira, em específico o algoritmo “*Branch-and-bound*” (MERLIN; BACK, 1975).

Já em 1990, Glamocanin apresentou uma metodologia para resolver o problema de reconfiguração utilizando o método simplex. O método inicialmente obtém uma topologia radial através da linearização das perdas, e então a partir disto utiliza-se o método simplex a fim de melhorar a solução. O método foi aplicado a um sistema de 10 barras, obtendo resultados satisfatórios (GLAMOCANIN, 1990).

Em (ABUR, 1996) apresenta-se um método baseado em um algoritmo de programação linear (PL) modificado para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de

distribuição. Segundo o autor a modificação do método permitiu encontrar a melhor topologia radial para um sistema de pequeno porte. Nos resultados o autor apresenta um exemplo numérico com um sistema de 9 barras.

No ano de 2012 foi apresentado em (LAVORATO et al., 2012) um método para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica através do algoritmo *Branch and Bound* não linear, no qual um problema de programação não linear é resolvido a cada nó da árvore de *Branch and Bound*.

2.3.4 *Redes Neurais Artificiais*

Redes neurais artificiais são conceitos baseados no mecanismo de funcionamento do cérebro emulados em software e/ou hardware. São capazes de adquirir conhecimento, ou seja, aprenderem com a experiência. As RNAs são modeladas através de várias unidades de neurônios ou unidades de processamento, dispostas em fileiras ou camadas, formando um arranjo de interligações, estas interligações são conexões constituídas por pesos, ou sinapses, que são o ponto de calibração das unidades de processamento. O processo de calibração dos pesos é chamado de treinamento ou aprendizado, o mesmo deve ser elaborado no modo off-line do sistema, ou como se pode dizer, antes que o sistema entre em funcionamento. Uma vez ajustada, empregando-se algum tipo de algoritmo de adaptação dos referidos pesos, a rede, a princípio, estará apta para efetuar diagnósticos e emitir um grau de precisão satisfatório no reconhecimento de padrões não utilizados no seu processo de aprendizado. (HAYKIN, 1994).

Em (KIM et al., 1993) apresenta-se um método baseado nas redes neurais artificiais do tipo “multi-layer perceptron” para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição. Neste método utilizaram-se dois grupos de redes neurais, sendo um grupo para identificar o perfil de carga e o segundo para gerar topologias baseadas nos perfis de carga obtidos pelo primeiro conjunto de redes neurais. Este método foi avaliado utilizando o sistema de 14 barras proposto em (CIVANLAR et al., 1988) e apresentou bons resultados.

Um método baseado nas redes neurais do tipo Hopfield foi proposto em (HAYASHI et al., 1996). Neste método associam-se conhecimentos técnicos sobre a rede elétrica para que as topologias geradas pela rede neural sejam seguras, e que possam operar dentro dos limites. Este método tem capacidade de evitar mínimos locais. Os resultados são satisfatórios, sendo encontrados para os sistemas teste de 10 barras e 21 barras.

Em (SALAZAR et al., 2006) foi apresentado um método baseado nas redes neurais do tipo “multi-layer perceptron” para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição. Os autores aplicaram técnicas de agrupamento, e validação para identificar as melhores topologias no treinamento da rede neural. Partindo disto foi possível identificar boas topologias com baixo custo computacional e utilizando apenas uma rede neural para resolver o problema. Este método apresentou bons resultados quando aplicado ao sistema de 14 barras proposto em (CIVANLAR et al., 1988) e ao sistema teste 136 barras.

3 PROBLEMA DE RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

Os sistemas elétricos de potência são compostos por três sistemas principais, sendo o sistema de geração de energia elétrica, transmissão de energia elétrica e o sistema de distribuição de energia elétrica. Entre estes sistemas, o sistema de distribuição de energia elétrica recebe uma maior atenção, pois tem a função de entregar a energia elétrica desde a subestação de distribuição até o consumidor final, com qualidade. Os grandes centros populacionais e industriais estão em constante crescimento, o que faz com que os sistemas existentes trabalhem com capacidade máxima, devido a isto as concessionárias e companhias de distribuição de energia elétrica veem realizando grandes investimentos nos sistemas de distribuição, visando automatizar sua operação, proporcionando segurança, confiabilidade e energia de boa qualidade, como exigido pelas normas do setor elétrico, tudo isto visando mínimos custos.

Neste contexto se encaixa o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica, que é um problema diretamente relacionado com o planejamento da operação dos sistemas de distribuição de energia elétrica.

Os sistemas de distribuição de energia elétrica operam com uma topologia radial, porém sua estrutura original é malhada. Esta maneira de operação tem objetivos de diminuir a quantidade e os custos de dispositivos de proteção e manobras ligados à rede elétrica, proporcionar maior segurança na distribuição de energia elétrica e principalmente facilitar a operação e proteção do sistema elétrico (PEREIRA, 2010).

A seguir será apresentado o modelo matemático utilizado neste trabalho.

3.1 Modelo matemático

O problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica neste trabalho é modelado como um problema de programação não linear inteiro misto (PNLIM). O modelo matemático pode ser escrito da seguinte forma (LAVORATO, et al., 2012):

$$\text{Min } v = \sum_{(ij) \in \Omega_l} [g_{ij} x_{ij} (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij})] \quad (1)$$

s.a.

$$Ps_i - Pd_i - \sum_{j \in \Omega_{bi}} (x_{ij} P_{ij}) = 0 \quad \forall i \in \Omega_b \quad (2)$$

$$Qs_i - Qd_i - \sum_{j \in \Omega_{bi}} (x_{ij} Q_{ij}) = 0 \quad \forall i \in \Omega_b \quad (3)$$

$$\underline{V} \leq V_i \leq \bar{V} \quad \forall i \in \Omega_b \quad (4)$$

$$x_{ij} (P_{ij}^2 + Q_{ij}^2) \leq \bar{S}_{ij}^2 \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (5)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (6)$$

$$\sum_{(ij) \in \Omega_l} x_{ij} = n_b - 1 \quad (7)$$

A equação (1) representa a função objetivo do problema. Neste modelo a função é do tipo minimização, sendo que o objetivo é minimizar as perdas ativas do sistema de distribuição de energia elétrica.

O modelo matemático do problema de reconfiguração está sujeito a dois tipos de restrições, sendo físicas e operacionais:

- Restrições Físicas: Estão relacionadas com os limites ou capacidades a qual os componentes da rede suportam, tal como: limite de fluxo de potência aparente nos circuitos.
- Restrições Operacionais: Estão relacionadas com a operação do sistema, o modo de operação (radial), cumprimento das leis naturais relacionadas com as duas leis de kirchhoff, limites de tensão nas barras, etc.

As restrições (2) e (3) representam a primeira e a segunda lei de Kirchhoff. Assim, o balanço de potências entre as barras do sistema garante o cumprimento da primeira lei de kirchhoff e a segunda lei de kirchhoff é garantida pelas equações (8) e (9) que assumem a seguinte forma.

$$P_{ij} = V_i^2 g_{ij} - V_i V_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \text{sen} \theta_{ij}) \quad (8)$$

$$Q_{ij} = V_i^2 g_{ij} - V_i V_j (g_{ij} \text{sen} \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (9)$$

A equação (4) representa a restrição dos limites de magnitude de tensão em cada barra do sistema, sendo os limites regidos e padronizados pelas normas reguladoras dos sistemas elétricos.

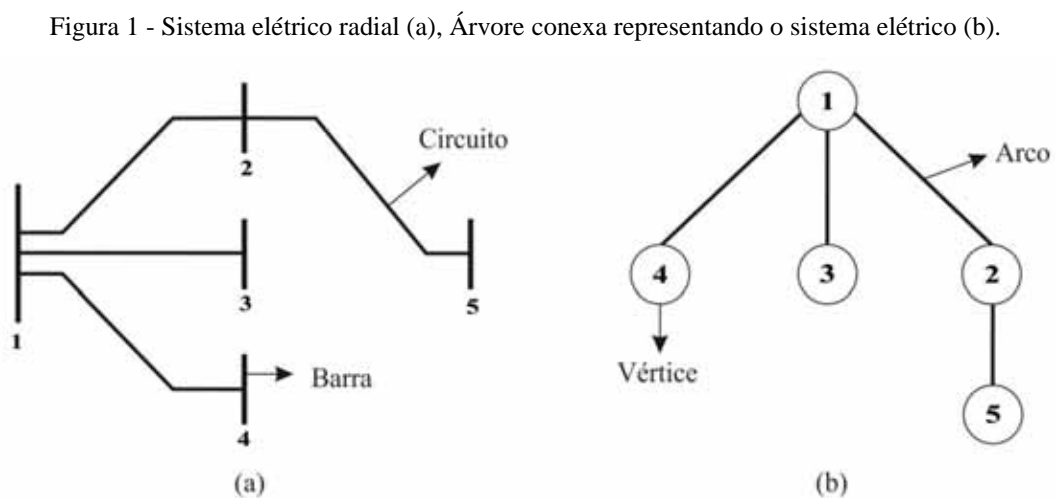
A restrição (5) representa o limite do fluxo de potência no circuito ij .

A restrição (6) representa a característica binária da variável de decisão do problema, onde x_{ij} pode assumir dois estados, quando é igual a 0 (zero) significa que o circuito ij está desligado e quando é igual a 1 (um) o circuito ij está ligado.

Em (7) apresenta-se uma das condições necessárias para garantir a radialidade do sistema, porém esta condição não é suficiente para garantir a radialidade.

A operação radial é uma exigência típica dos sistemas de distribuição de energia elétrica e isto se torna uma restrição que deve estar presente no problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica.

A topologia radial de um sistema de distribuição pode ser comparada a uma árvore de um grafo, desta forma da teoria de grafos sabemos que para que uma topologia de um sistema de distribuição com n_b barras seja radial, a mesma deve conectar as n_b barras do sistema (vértices) e deve ter $n_b - 1$ circuitos (arcos). Na figura 1 (a) ilustra-se um exemplo de um sistema elétrico radial de 5 barras, e na figura 1(b) tem-se uma árvore conexa representando o sistema elétrico.



Fonte: a própria autora.

Desta forma, para garantir que a topologia de um sistema de distribuição seja radial, além de satisfazer a restrição (7) é necessário garantir que todas as barras de carga do sistema

sejam atendidas e isso pode ser garantido pelas restrições (2) e/ou (3), (LAVORATO, et al., 2012). Assim se cada barra do sistema estiver com carga ativa diferente de zero então deve existir um caminho entre essa barra de carga e a subestação, portanto, todas as barras de demanda estão ligadas com a subestação. Neste contexto as restrições (2), (3) garantem que toda solução deve ser conexa. Em resumo, as restrições (2) e (7) garantem que qualquer solução viável, assim como a solução ótima, seja radial.

Como nos sistemas elétricos utilizados neste trabalho a potência ativa das barras de demanda é constante (modelo de carga de potência constante), então a função objetivo (1) apresentada no modelo matemático, pode ser modificada, sendo substituída por uma função objetivo alternativa, como expresso em (10).

$$\text{Min } v_1 = Ps_0 \quad (10)$$

Onde Ps_0 é o fluxo de potência ativa que está saindo da subestação. Assim as perdas ativas (v) podem ser facilmente encontradas usando a seguinte relação:

$$v = v_1 - D \quad (11)$$

Onde D é a demanda ativa total do sistema de distribuição, como apresentado em (12).

$$D = \sum_{i \in \Omega_b} Pd_i \quad (12)$$

Portanto a função objetivo alternativa assume a seguinte forma:

$$\text{Min } v = Ps_0 - \sum_{i \in \Omega_b} Pd_i \quad (13)$$

Adicionalmente, devemos observar que Ps_i e Qs_i são diferentes de zero apenas na subestação. E devemos observar que (13) é uma função linear.

4 METAHEURÍSTICA GRASP

A metaheurística GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) foi proposta pelos pesquisadores Thomas A. Feo e Mauricio G. C. Resende. Baseada em conceitos existentes no campo da pesquisa operacional, em sua essência o GRASP utiliza princípios construtivos do tipo guloso, porém também existe uma componente de busca local adaptativa e aleatória (FEO; RESENDE, 1989).

Particularmente os pesquisadores trabalhavam com o algoritmo heurístico construtivo e a heurística de busca através de vizinhança, que são considerados os mais importantes pelo desempenho que apresentaram e porque suas heurísticas podiam ser utilizadas para compor novas metaheurísticas através de um processo de junção e generalização. O algoritmo GRASP é considerado uma evolução destas heurísticas (ROMERO; LAVORATO, 2012).

Esta metaheurística é muito aplicada a problemas complexos e de grande porte, e tem apresentado ótimos resultados. Na fase construtiva constrói-se uma solução passo-a-passo, escolhendo os candidatos através de um índice de sensibilidade, que é responsável por indicar qual o melhor candidato a ser introduzido na solução. Partindo da solução encontrada na fase construtiva, a fase de melhoria local faz uma busca na vizinhança visando encontrar soluções que melhorem a solução encontrada na fase construtiva.

4.1 Teoria Básica da Metaheurística GRASP

A metaheurística GRASP é uma junção e uma generalização do algoritmo heurístico construtivo guloso e da heurística de busca através de vizinhança. Esta metaheurística é dividida em duas fases principais: a fase construtiva e a fase de melhoria local. A fase construtiva é baseada em um algoritmo heurístico construtivo (AHC) do tipo guloso, o qual é responsável por encontrar uma boa solução factível adicionando em cada passo uma componente da solução. Em cada passo do algoritmo é escolhida a melhor componente, identificado por um indicador de sensibilidade, que utiliza uma componente que tem características aleatória e adaptativa, controlado pelo parâmetro α para indicar as componentes de melhor qualidade para fazerem parte da solução do problema (FEO; RESENDE, 1989). Na fase de melhoria local é utilizado um algoritmo de busca local com o

objetivo de procurar na vizinhança da solução fornecida pela fase construtiva, uma melhor solução para o problema. O GRASP pode contar ainda com uma fase de pré-processamento na qual, as informações sobre o problema são pré-processadas e avaliadas com o objetivo de diminuir o espaço de busca do problema caso seja possível. A seguir apresentam-se os passos do algoritmo GRASP para um problema genérico:

1º Passo: Fazer a leitura dos dados do problema. Identificar a forma de codificação para uma proposta de solução. Identificar uma forma de avaliar a qualidade da função objetivo. Definir um algoritmo heurístico do tipo guloso a ser usado na fase construtiva e uma heurística de busca local para ser usada na fase de melhoria local. Definir o valor de α ;

2º Passo: Fazer a fase de pré-processamento, se houver;

3º Passo: Realizar a fase construtiva e encontrar uma proposta de solução;

4º Passo: Realizar a fase de busca local e atualizar a solução incumbente caso seja possível;

5º Passo: Se o critério de parada não for satisfeito, voltar ao 3º Passo. Caso contrário, pare. A resposta do algoritmo é a solução incumbente armazenada.

4.2 Fase de Pré-processamento da Metaheurística GRASP

Na fase de pré-processamento o objetivo é identificar componentes ou subestruturas do problema, isto é, atributos que permitam iniciar o processo construtivo de maneira mais eficiente ou diminuir o espaço de busca do problema.

A ideia central na fase de pré-processamento é diminuir o espaço de busca incorporando ou descartando componentes do problema na solução em construção. Para isto deve existir a certeza que esses componentes podem fazer ou não parte da solução do problema. Esta estratégia é muito comum e muito utilizada em métodos de otimização clássica, especialmente nas técnicas de solução de problemas de programação linear inteira mista. Nesse caso existem várias estratégias de pré-processamento que permitem fixar variáveis inteiras ou binárias nos valores ótimos antes de iniciar o processo de construção, por exemplo, combinando restrições em programação binária, ou simplesmente executando uma sub-rotina para identificação dos componentes que podem ser incorporados ou descartados no processo de construção da solução (ROMERO; LAVORATO, 2012).

4.3 Fase Construtiva da Metaheurística GRASP

A partir da leitura dos dados e após o pré-processamento, a fase construtiva do GRASP, tenta contornar as limitações do AHC e construir uma solução factível para o problema utilizando um algoritmo heurístico construtivo (AHC) generalizado. O AHC generalizado consiste em escolher componentes candidatos da solução em construção dentro de uma lista reduzida de candidatos, respeitando um índice de sensibilidade. O número de elementos da lista depende da qualidade dos componentes candidatos à adição e de um parâmetro alfa (α) que varia entre zero e um. A fase construtiva do algoritmo GRASP se resume nos seguintes passos:

1º Passo: Montar um conjunto solução inicial que pode ser vazio ou não. Essa solução se transformará na solução corrente;

2º Passo: Elaborar uma lista RCL (*restricted candidate list*) com as k componentes ou variáveis mais atraentes, utilizando um indicador de sensibilidade;

3º Passo: Escolher aleatoriamente uma variável da lista construída no 2º Passo e atualizar o conjunto solução adicionando a variável escolhida;

4º Passo: Se o critério de parada for satisfeito, ou seja, encontrou uma proposta de solução, fim da fase construtiva. Caso contrário voltar ao 2º Passo.

Nos passos apresentados anteriormente é explicado de forma clara o desenvolvimento do algoritmo, sendo necessário realizar uma breve explicação sobre os elementos da lista reduzida RCL. Então a seguir é apresentada uma forma adequada para encontrar os elementos da lista reduzida RCL.

Seja $f(x)$ a função objetivo de um problema com variáveis x . O indicador de sensibilidade assume a seguinte forma: (ROMERO; LAVORATO, 2012).

$$h(x_i) \propto \frac{\partial f(x_i)}{\partial x_i} \quad (14)$$

Onde a função $h(x_i)$ representa qualquer estratégia que permite identificar a qualidade da componente relacionada com a função objetivo, portanto, $h(x_i)$ pode ser obtido matematicamente ou pela experiência do pesquisador. Considerando que o problema é de minimizar a função objetivo, então a variável mais atraente, identificada pelo algoritmo guloso pode ser de dois tipos, dependendo do problema, sendo a que apresenta o menor valor de $h(x_i)$ ou a que apresenta o maior valor de $h(x_i)$, portanto fazem parte da lista RCL as

variáveis que pertencem à relação (15) na qual os elementos da lista estão ordenados de forma crescente ou (16) na qual os elementos da lista estão ordenados de forma decrescente.

$$RCL = \{i \in X / h^{\min} \leq h(x_i) \leq h^{\min} + \alpha(h^{\max} - h^{\min})\} \quad (15)$$

$$RCL = \{i \in X / h^{\max} - \alpha(h^{\max} - h^{\min}) \leq h(x_i) \leq h^{\max}\} \quad (16)$$

em que X é o conjunto de índices das variáveis que ainda podem ser adicionadas e alfa (α) é um parâmetro fornecido pelo usuário com valores entre $0 \leq \alpha \leq 1$. h^{\max} e h^{\min} assumem a seguinte forma:

$$h^{\max} = \max_{i \in X} \{h(x_i)\} \quad (17)$$

$$h^{\min} = \min_{i \in X} \{h(x_i)\} \quad (18)$$

Se $\alpha = 0$, o conjunto RCL tem apenas um elemento e se comporta como um AHC do tipo guloso, já se $\alpha = 1$, todos os elementos candidatos podem fazer parte do conjunto RCL e o processo de escolha se torna totalmente aleatório. A seguir destacam-se algumas observações em relação à lista RCL:

- O número de elementos do conjunto RCL varia em cada passo da fase construtiva, onde a dimensão da lista RCL depende do valor de α , mas também depende dos valores do indicador de sensibilidade de cada elemento, isto é, dos valores de h^{\max} e h^{\min} .
- Existe a possibilidade de utilizar um α variável na fase construtiva, visando obter uma lista RCL variável em cada iteração e também para usar o melhor valor de α em cada passo do algoritmo. Este procedimento no GRASP é conhecido como GRASP reativo.

4.4 Fase de Melhoria Local da Metaheurística GRASP

Após a fase construtiva, na fase de melhoria local é realizada uma busca por melhorias 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 busca local. O algoritmo de busca local consiste em realizar 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. A fase de melhoria local do GRASP se resume nos seguintes passos:

1º Passo: Ler os dados da solução corrente que é a solução encontrada na fase construtiva da metaheurística GRASP;

2º Passo: Obter uma solução vizinha dentro da vizinhança que circunda a solução corrente;

3º Passo: Se a solução vizinha for melhor que a solução corrente, a solução corrente será alterada recebendo a solução vizinha;

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

5 METAHEURÍSTICA GRASP APLICADA AO PROBLEMA DE RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

Neste capítulo será apresentada a metodologia proposta neste trabalho, onde se aplica a metaheurística GRASP na resolução do problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica.

O Algoritmo GRASP proposto neste trabalho para a resolução do problema de reconfiguração de sistemas de distribuição pode ser dividido em três partes principais: a fase de pré-processamento, a fase construtiva e a fase de melhoria local.

Inicialmente é realizada a leitura dos dados e informações do problema, são definidos o parâmetro α e o conjunto solução. A partir da leitura dos dados do sistema é possível realizar um pré-processamento onde as informações sobre o sistema são avaliadas com o objetivo de diminuir o espaço de busca do problema.

Na fase construtiva é realizada a construção de uma proposta de solução para o problema. A cada passo da fase construtiva, resolve-se um problema de programação não linear (PNL) e encontram-se os pontos de operação do sistema, assim utilizando um indicador de sensibilidade cria-se uma lista de candidatas, que indica quais os circuitos mais atraentes para serem introduzidos na solução. Com a lista de candidatos criada, escolhe-se um candidato aleatoriamente e o adiciona à solução do problema. Este processo é repetido iterativamente até que uma solução radial seja encontrada.

Na fase de melhoria local o objetivo é realizar uma busca na vizinhança da solução encontrada na fase construtiva, visando obter uma solução de melhor qualidade, caso seja encontrada atualiza-se a solução corrente do problema.

Nos tópicos a seguir serão descritas a formulação do problema de PNL e as fases da metaheurística GRASP.

5.1 Fase de Pré-processamento

Nesta fase do algoritmo GRASP, após fazer a leitura dos dados, realiza-se o pré-processamento nas informações, visando reduzir o espaço de busca do problema. Este processo ocorre conforme descrito a seguir:

- 1º Passo: Analisando os dados do problema, identifique os circuitos que não fazem parte de laços no grafo do sistema, se houver avance ao 2º passo, caso contrário Pare com $\Omega_1 = \phi$;
- 2º Passo: Fechar todos os circuitos $ij \in \Omega_l$ que não formam laço no grafo do sistema, identificados no passo anterior, fixando a variável com o valor $x_{ij} = 1$ e o conjunto Ω_1 é formado por todos os circuitos fechados;
- 3º Passo: A topologia corrente é formada pelos circuitos pertencentes ao conjunto Ω_1 ;
Sendo que $\Omega_c = \Omega_l \setminus \Omega_1$.

O conjunto Ω_0 inicia vazio, e o conjunto Ω_c é formado por todos os circuitos livres que podem ser fechados ou abertos no sistema. Ao final do processo atualizam-se os conjuntos Ω_1 , Ω_0 e Ω_c .

5.2 Formulação do PNL para a Fase Construtiva

Para realizar a fase construtiva do algoritmo GRASP proposto neste trabalho, o modelo matemático é relaxado para ser resolvido como um problema de programação não linear (PNL), que permite encontrar os valores do indicador de sensibilidade, para montar o conjunto RCL em cada passo da fase construtiva. Assim, devemos resolver esse PNL para encontrar adicionalmente o ponto de operação do sistema de distribuição a cada passo da fase construtiva do GRASP e obter o valor de perdas ativas totais (função objetivo).

A partir do modelo matemático apresentado no capítulo 3, para um problema de PNLIM (1) – (7), relaxa-se a integralidade das variáveis binárias e então o problema se transforma em um problema de PNL no qual está incorporada a informação gerada pela fase de pré-processamento. Assim, esse PNL assume a seguinte forma:

$$\text{Min } v = Ps_0 - \sum_{i \in \Omega_b} Pd_i \quad (19)$$

s.a.

$$Ps_i - Pd_i - \sum_{j \in \Omega_{b,i,c}} (x_{ij} P_{ij}) - \sum_{j \in \Omega_{b,i,1}} (P_{ij}) = 0 \quad \forall i \in \Omega_b \quad (20)$$

$$Qs_i - Qd_i - \sum_{j \in \Omega_{b,i,c}} (x_{ij} Q_{ij}) - \sum_{j \in \Omega_{b,i,1}} (Q_{ij}) = 0 \quad \forall i \in \Omega_b \quad (21)$$

$$\underline{V} \leq V_i \leq \bar{V} \quad \forall i \in \Omega_b \quad (22)$$

$$x_{ij} (P_{ij}^2 + Q_{ij}^2) \leq \bar{S}_{ij}^2 \quad \forall (ij) \in \Omega_c \quad (23)$$

$$(P_{ij}^2 + Q_{ij}^2) \leq \bar{S}_{ij}^2 \quad \forall (ij) \in \Omega_1 \quad (24)$$

$$0 \leq x_{ij} \leq 1 \quad \forall (ij) \in \Omega_c \quad (25)$$

$$\sum_{(ij) \in \Omega_c} x_{ij} = n_b - 1 - n_1 \quad (26)$$

O conjunto de circuitos fechados (Ω_1) representa os circuitos que vão estar conectados na topologia encontrada na solução da fase construtiva. No conjunto de circuitos abertos (Ω_0) é formado pelos circuitos que durante o processo iterativo formaram laço. O conjunto de circuitos livres (Ω_c) representa os circuitos que podem ser fechados ou abertos durante o processo iterativo.

As restrições (2), (3), (5) - (7) foram modificadas para que as informações sobre os circuitos já fixados e livres fossem incorporados ao PNL, resultando nas restrições (20), (21), (23) – (26), respectivamente. Tais informações evitam que os circuitos que já foram fechados ou abertos não entrem novamente na lista de candidatos (RCL).

Neste trabalho optou-se por utilizar a função objetivo alternativa apresentada em (13), conforme equação (19), para o problema de PNL.

As restrições (20) e (21) representam a primeira e segunda leis de Kirchhoff. Nestas restrições são considerados os circuitos pertencentes aos conjuntos $\Omega_{b,i,1}$ e $\Omega_{b,i,c}$, que representam o conjunto de barras conectadas à barra i , cujos circuitos já foram fechados, e o conjunto de barras conectadas à barra i e cujos circuitos se encontram livres, respectivamente.

A equação (22) representa os limites de magnitude de tensão em cada barra do sistema.

A partir da restrição (5) foram geradas as restrições (23) e (24) do PNL, que representam o limite máximo de fluxo de potência nos circuitos ij , para o conjunto de circuitos livres (Ω_c) e para o conjunto de circuitos fechados (Ω_1).

A restrição (26) representa uma das condições necessárias para garantir a radialidade do sistema, onde n_l é o número de circuitos já fechados, assim o objetivo é verificar a quantidade de circuitos que ainda estão livres.

5.3 Fase Construtiva

Na fase construtiva da metaheurística GRASP é utilizado um AHC baseado em (OLIVEIRA, 2010), inicialmente todos os circuitos estão livres e a cada iteração é escolhido um circuito candidato para ser fechado e adicionado na solução em construção, até que uma topologia radial seja encontrada. O AHC proposto neste trabalho se difere do AHC proposto em (OLIVEIRA, 2010) na escolha do circuito. Em (OLIVEIRA, 2010) a cada passo do AHC o circuito é escolhido para ser adicionado ao sistema desde que este circuito esteja conectado a uma barra já alimentada por uma subestação. No AHC implementado neste trabalho a condição de barra já alimentada pela subestação não é considerada, por este motivo é necessário uma sub-rotina para evitar soluções infactíveis.

Nesta fase, caso $\Omega_1 = \emptyset$, então, considera-se que todos os circuitos pertencem ao conjunto de circuitos livres (Ω_c) no início do processo, desta forma o algoritmo heurístico construtivo utilizado tem como objetivo a cada iteração fechar um circuito no sistema visando construir uma solução factível. Para escolher qual circuito será fechado no sistema foi utilizado um índice de sensibilidade que é chamado de índice de sensibilidade de fechamento de circuitos (ISFC), cuja função é indicar quais os circuitos mais atraentes para serem fechados no sistema a cada iteração. O ISFC é expresso em (27).

$$ISFC_{ij} = S_{ij} \quad (27)$$

em que $S_{ij} = \sqrt{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}$ é o fluxo de potência aparente calculado nos circuitos livres do sistema após a resolução de um problema de PNL. Tendo como base o ISFC cria-se uma lista RCL de circuitos candidatos para serem fechados no sistema. O número de elementos desta lista depende do valor do parâmetro α escolhido, do tamanho do sistema, e do fluxo mínimo e

máximo nos circuitos ainda não fixados (livres). Deve-se observar que quanto maior é o valor de S_{ij} então maior é a possibilidade de que o circuito x_{ij} seja fechado.

A lista de candidatos é criada com circuitos que não possuem nenhum impedimento de serem inseridos, isto é, circuitos pertencentes ao conjunto Ω_c , e estes circuitos devem possuir o valor de potência aparente dentro do intervalo descrito na inequação (28).

$$S_{\max} - \alpha(S_{\max} - S_{\min}) \leq S_{ij} \leq S_{\max} \quad (28)$$

A inequação (28) representa um intervalo decrescente, partindo do valor de fluxo máximo. O objetivo do intervalo é proporcionar a seleção de candidatos com valores maiores de fluxo de potência aparente.

O parâmetro alfa (α) tem o valor determinado de forma experimental, a partir de simulações realizadas para diferentes valores do mesmo. Sendo que quando α é igual a zero, o algoritmo adquire uma característica extremamente gulosa, pois terá apenas um elemento na lista de candidatos e, portanto, transforma-se em AHC padrão. Desta forma, quanto mais próximo de zero for o valor de α , o algoritmo é mais guloso. Se α for igual a 1, então todos os circuitos livres estarão na lista de candidatos, desta forma o algoritmo fica extremamente aleatório, pois pode escolher qualquer circuito para ser fechado no sistema. Assim quando α assume um valor mais próximo de 1, dizemos que o algoritmo adquire características de mais aleatório.

Depois de criar a lista de candidatos, escolhe-se de forma aleatória o circuito ij que deve ser adicionado na solução corrente, e atualiza-se o conjunto Ω_1 .

Na sequência após incluir o novo circuito na topologia corrente executa-se um processo de avaliação, para verificar a possibilidade de fixar circuitos com $x_{ij} = 0$, ou seja, identificar a formação de laços. O laço no sistema pode ser ocasionado por um circuito livre adjacente aos circuitos que se encontre fechado no sistema. A avaliação é essencial para o AHC, pois auxilia ao mesmo a gerar somente propostas de soluções factíveis.

O processo de avaliação tem característica antecipatória, onde o objetivo é verificar se a nova topologia formada encontra laços, possibilitando fixar circuitos com $x_{ij} = 0$.

O funcionamento do processo de avaliação de circuitos pode ser descrita nos passos a seguir:

- 1º Passo: Executar um ciclo de repetição para analisar todos os circuitos pertencentes ao conjunto de circuitos fechados (Ω_1);
- 2º Passo: Em cada repetição do ciclo, analisar um circuito fechado, visando verificar se existem circuitos livres adjacentes ao circuito em análise;
- 3º Passo: Se existem circuitos livres adjacentes ao circuito em análise, feche os mesmos no sistema e avance ao 4º passo. Caso contrário, avance ao 7º passo;
- 4º Passo: Na nova topologia formada existe laço? Se sim, avance ao 5º passo. Caso contrário avance ao 6º passo;
- 5º Passo: No laço formado existe somente 1 circuito adjacente? Se sim, fixe o circuito ij com o valor $x_{ij} = 0$ e avance ao 7º passo. Caso contrário avance ao 6º passo;
- 6º Passo: Desconectar os circuitos adjacentes fechados, voltando a fazer parte do conjunto de circuitos livres (Ω_c);
- 7º Passo: Atualizar a topologia corrente ($\Omega_1, \Omega_0, \Omega_c$), e incrementar o contador do ciclo de repetição;
- 8º Passo: Critério de parada, se todos os circuitos fechados foram analisados, final do processo de avaliação, caso contrário voltar ao 2º Passo.

Em resumo é realizada uma análise na nova topologia formada em cada iteração da fase construtiva, após o fechamento do circuito na topologia corrente do sistema. Inicialmente no processo de avaliação executa-se um ciclo de repetição, onde a cada repetição do ciclo é analisado um circuito pertencente ao conjunto de circuitos fechados (Ω_1). Na sequência em cada um dos circuitos em análise, é verificada a existência de circuitos livres adjacentes. Caso o circuito em análise possua circuitos livres adjacentes, estes circuitos são fechados no sistema, caso contrário, passa-se a analisar o próximo circuito fechado. Após fechar os circuitos livres adjacentes no sistema, verifica-se a existência de um laço, se não for encontrado um laço no sistema os circuitos adjacentes que foram fechados são desconectados, voltando a fazer parte do conjunto de circuito livres (Ω_c). Se um laço for encontrado, então é verificado se o laço formado contém apenas 1 circuito adjacente, caso esta possibilidade ocorra, este circuito ij é fixado com o valor $x_{ij} = 0$. Caso possua mais do que um circuito adjacente no laço, estes circuitos são desconectados do sistema. Na sequência atualiza-se a

topologia corrente ($\Omega_1, \Omega_0, \Omega_c$) e repetem-se todos os passos do processo analisando os circuitos fechados, até que todos sejam analisados, assim o processo de avaliação chega ao fim.

Após este processo de avaliação verifica se a topologia é radial e com todas as barras conexas usando apenas a informação da condicionalidade do conjunto $\Omega_1, |\Omega_1|$. Caso a topologia seja radial encontrou-se a solução da fase construtiva, caso contrário o processo se repete iterativamente até encontrar uma topologia radial.

Para verificar se o circuito formou laço, utiliza-se uma sub-rotina para identificação de laços, baseada em (SOUZA, 2011), descrita com os seguintes passos:

- 1º Passo: Monta-se um vetor que contém todos os circuitos presentes na solução corrente;
- 2º Passo: Identificar as barras que estão conectadas por apenas um circuito;
- 3º Passo: Os circuitos que conectam estas barras são retirados da solução corrente;
- 4º Passo: Repetir o 2º e o 3º Passo até que não exista nenhuma barra conectada ao sistema por apenas um circuito.

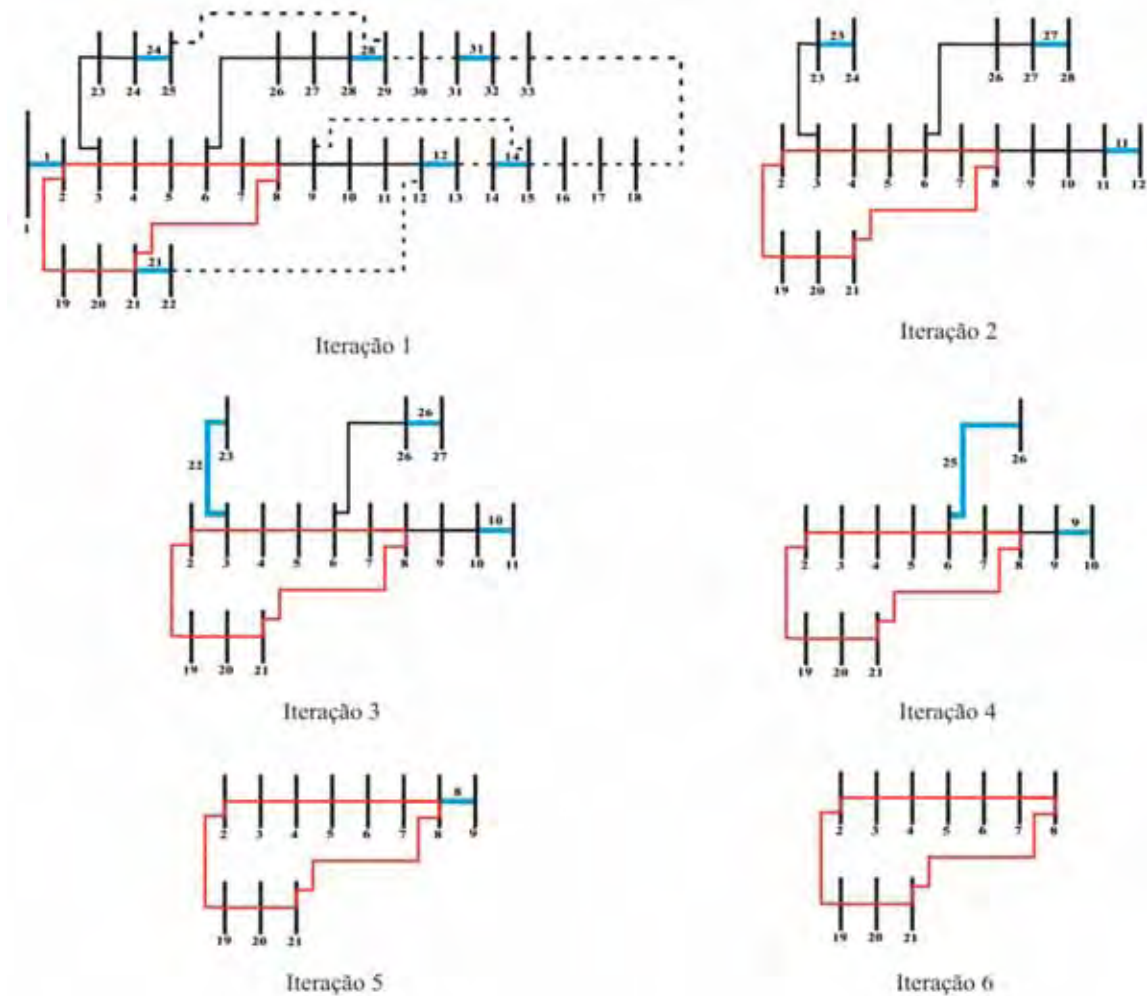
Ao final da busca se restar circuitos no vetor de circuitos significa que a topologia do sistema encontra-se com um laço.

Na sequência será ilustrado de maneira exemplificada o funcionamento desta sub-rotina. Para este exemplo foi utilizado o sistema teste de 33 barras.

Inicialmente na sub-rotina de verificação de laços monta-se um vetor que contenha todos os circuitos fechados presentes na solução corrente, como ilustrado na figura 2. Os circuitos fechados são representados por uma linha contínua, e os circuitos abertos por uma linha pontilhada. Após montar o vetor com a topologia corrente do sistema é realizada a verificação visando encontrar as barras conectadas por apenas um circuito, caso sejam encontradas, os circuitos conectados a estas barras são removidos do vetor solução, e assim iterativamente este procedimento ocorre até que não possua mais barras conectadas a apenas um único circuito. A seguir podem-se observar na figura 2 destacados em azul os circuitos que foram removidos do vetor a cada iteração da sub-rotina.

Na iteração 1 os circuitos removidos foram: 1, 12, 14, 21, 24, 28 e 31. Na iteração 2 foram removidos os circuitos 11, 23 e 27. Já na iteração 3 foram removidos os circuitos 10, 22 e 26. Na iteração 4 os circuitos 9 e 25 foram removidos. Na próxima iteração foi removido o circuito 8. Por fim na iteração 6 da sub-rotina não existem mais barras conectadas a um único circuito, portanto é o fim da sub-rotina.

Figura 2 – Passos da sub-rotina para identificação de laços.

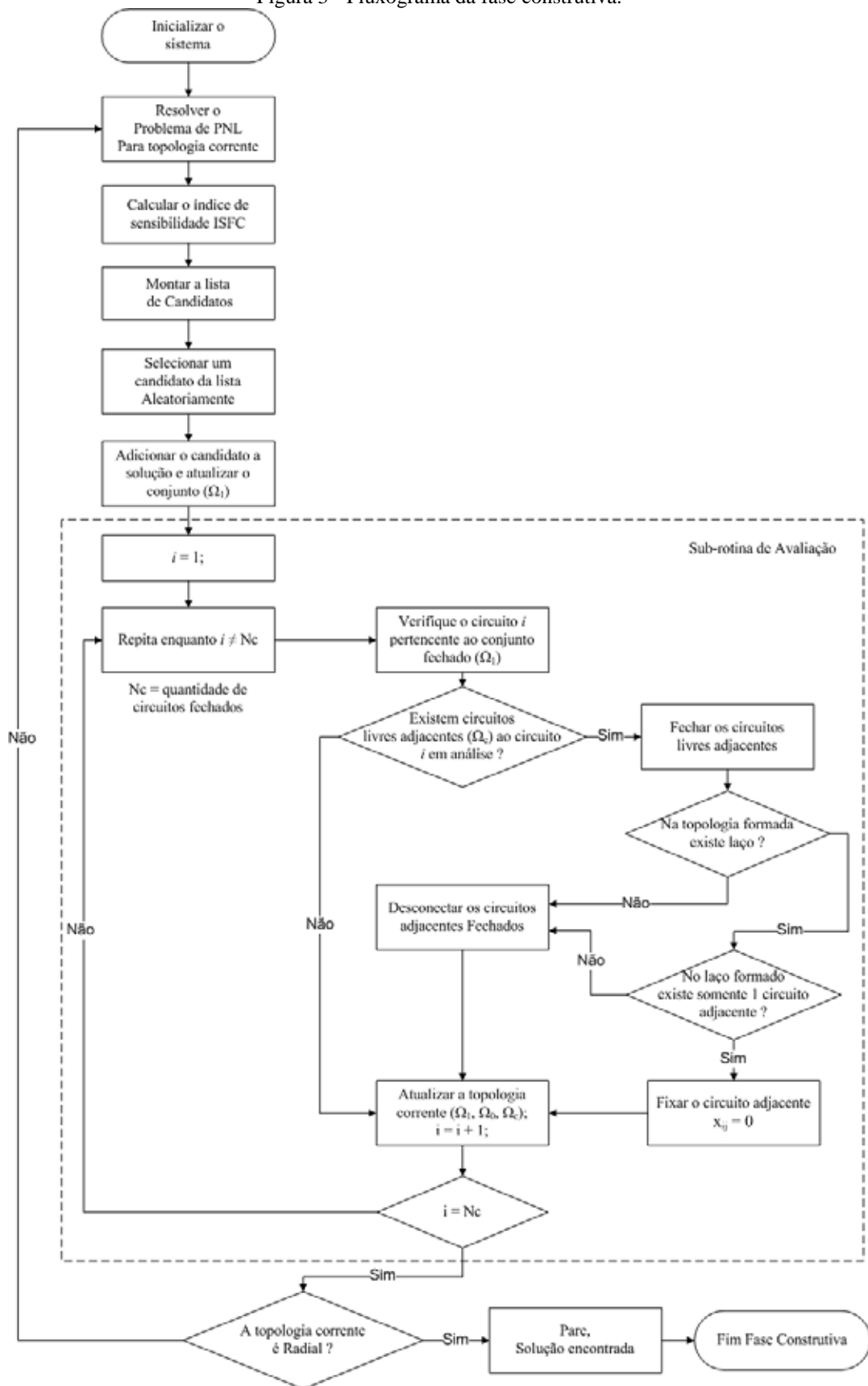


Fonte: a própria autora

Ao final da sub-rotina se possuir circuitos no vetor, então um laço foi encontrado, caso contrário não há nenhum laço no sistema. Para este exemplo, ao final da sub-rotina foi encontrado um laço, ilustrado pelos circuitos em vermelho, como apresentado na figura 2, iteração 6.

Na figura 3 é apresentado o fluxograma da fase construtiva.

Figura 3 - Fluxograma da fase construtiva.



Fonte: a própria autora.

5.4 Formulação do PNL para a Fase de Melhoria Local

Na fase de melhoria local foi acrescentada uma variável de corte de carga com o objetivo de resolver apenas PNL's factíveis. Desta forma a função objetivo (19) foi substituída pela equação (29).

$$\sum_{(ij) \in \Omega_b} (cc_i) \quad (29)$$

Para evitar a utilização de uma penalização do corte de carga optou-se utilizar como função objetivo a minimização do corte de carga, assim, as perdas ativas do sistema são calculadas após o cálculo do ponto de operação do sistema caso o corte de carga seja igual a zero.

Devido ao acréscimo do corte de carga no PNL as restrições (20) e (21) também foram modificadas, ficando da seguinte forma:

$$Ps_i - (1 - cc_i)Pd_i - \sum_{j \in \Omega_{b,i,t}} (x_{ij}P_{ij}) - \sum_{j \in \Omega_{b,i,l}} (x_{ij}P_{ij}) = 0 \quad \forall i \in \Omega_b \quad (30)$$

$$Qs_i - (1 - cc_i)Qd_i - \sum_{j \in \Omega_{b,i,t}} (x_{ij}Q_{ij}) - \sum_{j \in \Omega_{b,i,l}} (x_{ij}Q_{ij}) = 0 \quad \forall i \in \Omega_b \quad (31)$$

Ao adicionar o corte de carga no PNL, foi necessário acrescentar a restrição (32) e as restrições (22), (23), (24), (25) e (26) não foram modificadas.

$$0 \leq cc_i \leq 1 \quad (32)$$

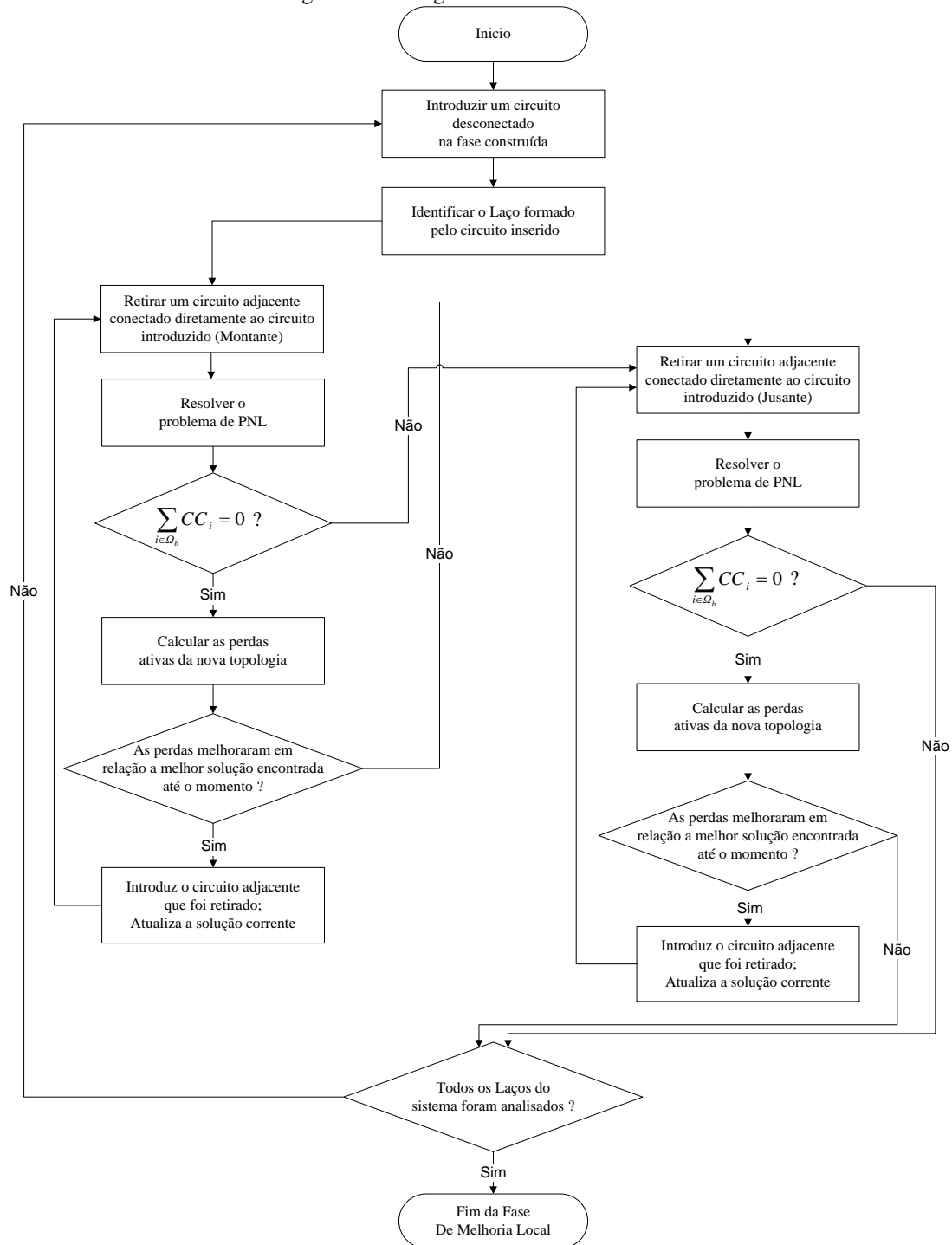
5.5 Fase de Melhoria Local

A fase de melhoria local tem como objetivo encontrar uma melhor topologia dentro da vizinhança da solução obtida pela fase construtiva. Neste trabalho foi utilizada uma heurística de busca baseada na heurística apresentada em (CARREÑO et al., 2007).

Nesta fase todos os circuitos desconectados na fase construtiva são utilizados para fazer a análise na vizinhança. Assim, os circuitos são fechados individualmente no sistema, com o objetivo de encontrar um laço. A sub-rotina para identificar o laço formado no sistema durante a fase de melhoria local é a mesma utilizada na fase construtiva. No laço formado, retira-se um circuito adjacente ao circuito inserido e então um problema de PNL é resolvido para encontrar o ponto de operação do sistema e a partir deste, calcular as perdas ativas do sistema. Se as perdas da solução vizinha forem menores que a solução corrente, a mesma é

atualizada. Este processo se repete até que todos os laços sejam analisados. A solução vizinha encontrada na fase de melhoria local é comparada com a solução corrente, caso esta seja melhor, atualiza-se a solução corrente do problema, caso contrário a solução corrente permanece inalterada. A figura 4 a seguir ilustra o fluxograma da fase de melhoria local.

Figura 4 - Fluxograma da fase de melhoria local.



Fonte: a própria autora.

5.6 Critério de Parada do GRASP

O algoritmo GRASP para este problema tem como critério de parada um número de iterações definido previamente, isto é, o usuário define inicialmente quantas iterações vão ser executadas, e quando este número de iterações for executado o programa chega ao fim. Nestas iterações, são executadas as fases construtiva e de melhoria local, toda solução encontrada é comparada com a solução incumbente, e no final do processo a melhor solução encontrada em todas as iterações é apresentada como resposta da resolução do problema.

5.7 Exemplo Didático

Para melhor compreensão da metodologia proposta neste trabalho, é apresentado nesta seção um exemplo didático que será dividido em três partes, sendo a fase de pré-processamento, a fase construtiva e a fase de melhoria local. Para este exemplo utiliza-se o sistema teste de 14 barras (CIVANLAR et al.,1988), que possui 13 barras de carga, 1 subestação, e 16 circuitos.

5.7.1 Fase de Pré-processamento

Após fazer a leitura dos dados do sistema e definir os parâmetros, sendo $\alpha = 0,5$, verifica se existe algum circuito $ij \in \Omega_l$ que não forme laço no grafo do sistema. Caso exista algum circuito ij que não forme laço no sistema, o mesmo é fixado no conjunto de circuitos fechados, isto é, $x_{ij} = 1$.

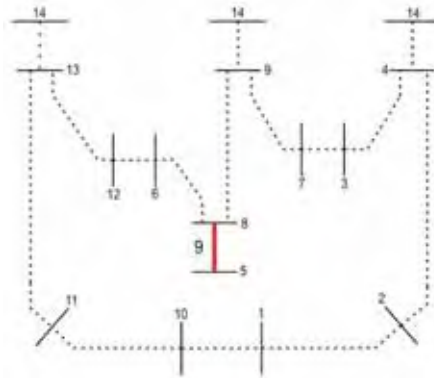
Neste passo foi encontrado um circuito que não forma laço no grafo do sistema. O circuito 9 (barras de 8-5) do sistema não forma laço no grafo do sistema, portanto é fixado no conjunto de circuitos fechados (Ω_1), com o valor $x_{8,5} = 1$.

Atualizando os conjuntos Ω_1 , Ω_0 e Ω_c , obtemos:

- $\Omega_1 = \{9\}$;
- $\Omega_0 = \{\phi\}$;
- $\Omega_c = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16\}$;

A figura 5 ilustra a topologia do sistema após realizar a fase de pré-processamento, onde o circuito que foi fixado está representado por uma linha contínua na cor vermelha.

Figura 5 - Topologia do sistema de 14 barras após o pré-processamento.



Fonte: a própria autora.

Após realizar a fase de pré-processamento avança ao próximo passo que é a fase construtiva.

5.7.2 Fase Construtiva

Partindo da topologia corrente que foi obtida na fase de pré-processamento, onde se tem o conjunto de circuitos fechados (Ω_1), na fase construtiva utilizada tem como objetivo a cada iteração fechar um circuito no sistema, visando construir soluções factíveis.

Para escolher qual circuito será fechado no sistema foi utilizado o índice de sensibilidade de fechamento de circuitos (ISFC), cuja função é indicar quais os circuitos mais atraentes para serem fechados no sistema a cada iteração.

Neste ponto iniciam-se as iterações da fase construtiva.

- Iteração 1

Na tabela 1 são apresentados os valores dos fluxos de potência aparente nos circuitos do sistema após a resolução do PNL para a topologia inicial da fase construtiva, ilustrada na figura 5.

Tabela 1 - Fluxo de potência aparente dos circuitos que podem ser fechados.

Circuito	Barra inicial	Barra final	Fluxo de potência (kVA)
1	14	13	11391,362
2	13	12	5914,840
3	13	11	3106,647
4	11	10	680,875
5	14	9	11567,272
6	9	8	7311,286
7	9	7	15,371
8	8	6	2315,140
10	14	4	6884,558
11	4	3	2149,477
12	4	2	3597,029
13	2	1	2090,932
14	12	6	2853,533
15	7	3	730,483
16	10	1	86,802

Com o ISFC calculado cria-se uma lista RCL com os circuitos candidatos a serem fechados na topologia do sistema. Na lista RCL somente podem estar presentes aqueles circuitos que pertencerem ao conjunto de circuitos livres (Ω_c), e devem necessariamente ter valores de fluxo de potência aparente dentro do intervalo expresso na inequação (28).

Utilizando a inequação (28) calcula-se o intervalo para criar a lista RCL como apresentado em (33) e (34).

$$11567,272 - 0,5(11567,272 - 15,371) \leq S_{ij} \leq 11567,272 \quad (33)$$

$$5791,322 \leq S_{ij} \leq 11567,272 \quad (34)$$

Na tabela 2 são apresentados os circuitos livres que possuem valores de fluxos de potência aparente entre os limites estabelecidos pelo intervalo expresso em (34).

Tabela 2 - Candidatos da lista RCL.

Circuito	Barra inicial	Barra final	Fluxo de potência (kVA)
1	14	13	11391,362
2	13	12	5914,840
5	14	9	11567,272
6	9	8	7311,286
10	14	4	6884,558

A lista criada contém 5 circuitos. O terceiro circuito da lista (circuito 5) foi escolhido aleatoriamente para ser fechado no sistema.

O conjunto de circuitos fechados (Ω_1) é então atualizado. Após ser atualizado, o conjunto de circuito fechados possui a seguinte configuração: $\Omega_1 = \{5, 9\}$. Assim, nesta topologia é executado o processo de avaliação para verificar se há possibilidade de fixar circuitos com $x_{ij} = 0$.

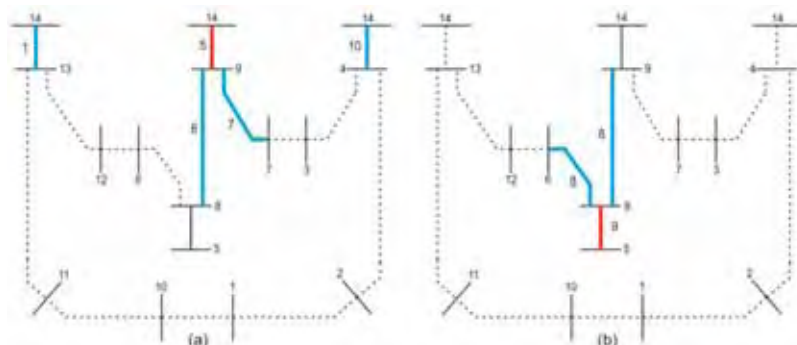
O conjunto de circuitos fechados (Ω_1) possui dois elementos, assim a variável Nc (quantidade de circuitos fechados) é igual a dois, portanto o processo de avaliação tem um ciclo de repetições com duas iterações.

No 1º ciclo de execução do processo de avaliação o circuito fechado em análise é o circuito 5 (barras de 14-9), ilustrado por uma linha vermelha na figura 6 (a). Verificando a existência de circuitos livres adjacentes, foram identificados os circuitos 1, 6, 7 e 10, ilustrados por uma linha contínua em azul na figura 6 (a). Ao identificar os circuitos livres adjacentes, estes circuitos são fechados. Na nova topologia formada verifica se há a formação de um laço. Neste caso nenhum laço foi encontrado, assim os circuitos adjacentes são desconectados do sistema voltando a fazer parte do conjunto de circuitos livres (Ω_c), atualiza-se a topologia corrente e avança-se ao 2º ciclo de execução.

No 2º ciclo de execução do processo de avaliação o circuito fechado em análise é o circuito 9 (barras de 8-5) que foi fechado na fase de pré-processamento, ilustrado por uma linha vermelha na figura 6 (b). Verificando a existência de circuitos livres adjacentes, foram identificados os circuitos 6 e 8, ilustrados por uma linha contínua em azul na figura 6 (b). Estes circuitos são fechados. Na nova topologia formada verifica se há a formação de laço. Neste caso nenhum laço foi encontrado, assim os circuitos adjacentes são desconectados do sistema voltando a fazer parte do conjunto de circuitos livres (Ω_c), atualiza-se a topologia corrente e chega-se ao fim do processo de avaliação.

Nesta iteração não foi possível fixar nenhum circuito ij com o valor $x_{ij} = 0$.

Figura 6 - Iteração 1 da fase construtiva.



Fonte: a própria autora

Na sequência encontra-se a topologia corrente ($\Omega_1, \Omega_0, \Omega_c$), após o término da iteração 1 da fase construtiva.

- $\Omega_1 = \{5, 9\}$;
- $\Omega_0 = \{\phi\}$;
- $\Omega_c = \{1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16\}$;

Esta topologia não é uma proposta de solução para o problema, portanto continua o processo iterativo e passa para a segunda iteração da fase construtiva.

- Iteração 2

Na tabela 3 são apresentados os valores dos fluxos de potência aparente nos circuitos do sistema após a resolução do PNL para a topologia da iteração 2 da fase construtiva.

Tabela 3 - Fluxo de potência aparente dos circuitos que podem ser fechados.

Circuito	Barra inicial	Barra final	Fluxo de potência (kVA)
1	14	13	11391,233
2	13	12	5914,768
3	13	11	3106,593
4	11	10	680,970
6	9	8	7311,356
7	9	7	15,386
8	8	6	2315,065
10	14	4	6884,660
11	4	3	2149,105
12	4	2	3597,081
13	2	1	2091,410
14	12	6	2852,802
15	7	3	730,693
16	10	1	86,829

Utilizando a inequação (28) calcula-se o intervalo para criar a lista RCL como apresentado em (35) e (36).

$$11391,233 - 0,5(11391,233 - 15,386) \leq S_{ij} \leq 11391,233 \quad (35)$$

$$5703,309 \leq S_{ij} \leq 11391,233 \quad (36)$$

Na tabela 4 são apresentados os circuitos livres que possuem valores de fluxos de potência aparente entre os limites estabelecidos pelo intervalo.

Tabela 4 - Candidatos da lista RCL.

Circuito	Barra inicial	Barra final	Fluxo de potência (kVA)
1	14	13	11391,233
2	13	12	5914,768
6	9	8	7311,356
10	14	4	6884,660

A lista criada contém 4 circuitos. O segundo circuito da lista (circuito 2) foi escolhido aleatoriamente para ser fechado no sistema. O conjunto de circuitos fechados (Ω_1) é então atualizado. Após ser atualizado, o conjunto de circuitos fechados possui a seguinte configuração: $\Omega_1 = \{2, 5, 9\}$. Assim, nesta topologia é executado o processo de avaliação para verificar se há possibilidade de fixar circuitos com $x_{ij} = 0$.

A variável Nc (quantidade de circuitos fechados) é igual a três, portanto são analisados três circuitos fechados.

No 1º ciclo de execução do processo de avaliação o circuito fechado em análise é o circuito 2 (barras de 13-12), e os circuitos livres adjacentes identificados são os circuitos 1 e 14, estes circuitos são fechados. Verificando a formação de laço, não foi encontrado nenhum laço, assim os circuitos adjacentes são desconectados do sistema, atualiza-se a topologia corrente e avança-se ao 2º ciclo de execução.

No 2º ciclo de execução do processo de avaliação o circuito fechado em análise é o circuito 5 (barras de 14-9), e os circuitos livres adjacentes identificados são os circuitos 1, 6, 7 e 10, estes circuitos são fechados. Verificando a formação de laço, não foi encontrado nenhum laço, assim os circuitos adjacentes são desconectados do sistema, atualiza-se a topologia corrente e avança-se ao 3º ciclo de execução.

No 3º ciclo de execução do processo de avaliação o circuito fechado em análise é o circuito 9 (barras de 8-5), e os circuitos livres adjacentes identificados são os circuitos 6 e 8, estes circuitos são fechados. Verificando a formação de laço, não foi encontrado nenhum laço, assim os circuitos adjacentes são desconectados do sistema, atualiza-se a topologia corrente e chega-se ao fim do processo de avaliação.

Nesta iteração não foi possível fixar nenhum circuito ij com o valor $x_{ij} = 0$.

Na sequência encontra-se a topologia corrente ($\Omega_1, \Omega_0, \Omega_c$), após o término da iteração 2 da fase construtiva.

- $\Omega_1 = \{2, 5, 9\}$;

- $\Omega_0 = \{ \phi \};$
- $\Omega_c = \{1, 3, 4, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16\};$

Esta topologia não é uma proposta de solução para o problema, portanto continua o processo iterativo e passa para a próxima iteração da fase construtiva.

O processo iterativo é executado conforme exemplificado nas iterações anteriores. Na sequência apresenta-se a iteração 11. A topologia corrente ($\Omega_1, \Omega_0, \Omega_c$) ao final da iteração 10 é a seguinte:

- $\Omega_1 = \{1, 2, 3, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13\};$
 - $\Omega_0 = \{14\};$
 - $\Omega_c = \{4, 7, 15, 16\};$
- Iteração 11

Na tabela 5 são apresentados os valores dos fluxos de potência aparente nos circuitos do sistema após a resolução do PNL para a topologia da iteração 11 da fase construtiva.

Tabela 5 - Fluxo de potência aparente dos circuitos que podem ser fechados.

Circuito	Barra inicial	Barra final	Fluxo de potência (kVA)
4	11	10	559,351
7	9	7	1,627
15	7	3	582,921
16	10	1	119,456

Utilizando a inequação (28) calcula-se o intervalo para criar a lista RCL como apresentado em (37) e (38).

$$582,921 - 0,5(582,921 - 1,627) \leq S_{ij} \leq 582,921 \quad (37)$$

$$292,274 \leq S_{ij} \leq 582,921 \quad (38)$$

Na tabela 6 são apresentados os circuitos livres que possuem valores de fluxos de potência aparente entre os limites estabelecidos pelo intervalo.

Tabela 6 - Candidatos da lista RCL.

Circuito	Barra inicial	Barra final	Fluxo de potência (kVA)
4	11	10	559,351
15	7	3	582,921

A lista criada contém 2 circuitos. O segundo circuito da lista (circuito 15) foi escolhido aleatoriamente para ser fechado no sistema. O conjunto de circuitos fechados (Ω_1) é então atualizado. Após ser atualizado o conjunto de circuito fechados possui a seguinte configuração: $\Omega_1 = \{1, 2, 3, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15\}$. Assim, nesta topologia é executado o processo de avaliação para verificar se há possibilidade de fixar circuitos com $x_{ij} = 0$.

A variável Nc (quantidade de circuitos fechados) é igual a doze, portanto são analisados doze circuitos fechados.

No 1º ciclo de execução do processo de avaliação o circuito fechado em análise é o circuito 1 (barras de 14-13), não sendo identificado nenhum circuito livre adjacente, assim atualiza-se a topologia corrente e avança-se ao 2º ciclo de execução.

No 2º ciclo de execução do processo de avaliação o circuito fechado em análise é o circuito 2 (barras de 13-12), não sendo identificado nenhum circuito livre adjacente, assim atualiza-se a topologia corrente e avança-se ao 3º ciclo de execução.

No 3º ciclo de execução do processo de avaliação o circuito fechado em análise é o circuito 3 (barras de 13-11), e o circuito livre adjacente identificado é o circuito 4, este circuito então é fechado. Verificando a formação de laço, não foi encontrado nenhum laço, assim os circuitos adjacentes são desconectados do sistema, atualiza-se a topologia corrente e avança ao 4º ciclo de execução. Este ciclo está ilustrado na figura 7 (a).

No 4º ciclo de execução do processo de avaliação o circuito fechado em análise é o circuito 5 (barras de 14-9), e o circuito livre adjacente identificado é o circuito 7, este circuito então é fechado. Verificando a formação de laço, foi encontrado um laço, ao analisar se no laço formado existe somente 1 circuito adjacente, foi comprovado que o circuito 7 pode ser fixado com o valor $x_{9,7} = 0$. Atualiza-se a topologia corrente e avança-se ao 5º ciclo de execução. Este ciclo está ilustrado na figura 7 (b).

No 5º ciclo de execução do processo de avaliação o circuito fechado em análise é o circuito 6 (barras de 9-8), não sendo identificado nenhum circuito livre adjacente, assim atualiza-se a topologia corrente e avança-se ao 6º ciclo de execução.

No 6º ciclo de execução do processo de avaliação o circuito fechado em análise é o circuito 8 (barras de 8-6), não sendo identificado nenhum circuito livre adjacente, assim atualiza a topologia corrente e avança-se ao 7º ciclo de execução.

No 7º ciclo de execução do processo de avaliação o circuito fechado em análise é o circuito 9 (barras de 8-5), não sendo identificado nenhum circuito livre adjacente, assim atualiza-se a topologia corrente e avança-se ao 8º ciclo de execução.

No 8º ciclo de execução do processo de avaliação o circuito fechado em análise é o circuito 10 (barras de 14-4), não sendo identificado nenhum circuito livre adjacente, assim atualiza a topologia corrente e avança-se ao 9º ciclo de execução.

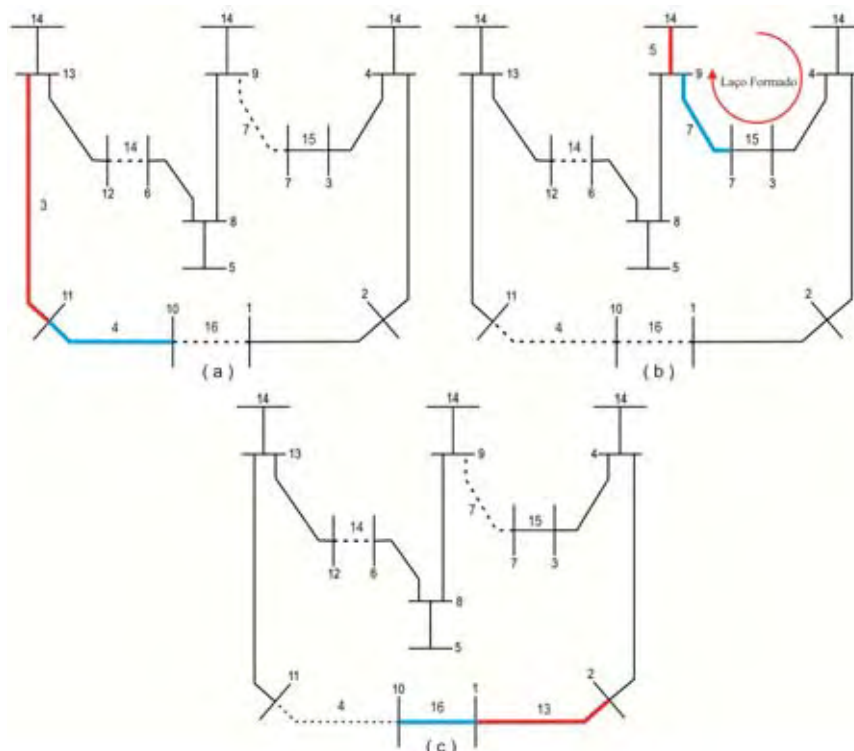
No 9º ciclo de execução do processo de avaliação o circuito fechado em análise é o circuito 11 (barras de 4-3), não sendo identificado nenhum circuito livre adjacente, assim atualiza-se a topologia corrente e avança-se ao 10º ciclo de execução.

No 10º ciclo de execução do processo de avaliação o circuito fechado em análise é o circuito 12 (barras de 4-2), não sendo identificado nenhum circuito livre adjacente, assim atualiza-se a topologia corrente e avança-se ao 11º ciclo de execução.

No 11º ciclo de execução do processo de avaliação o circuito fechado em análise é o circuito 13 (barras de 2-1), e o circuito livre adjacente identificado é o circuito 16, este circuito então é fechado. Verificando a formação de laço, não foi encontrado nenhum laço, assim os circuitos adjacentes são desconectados do sistema, atualiza-se a topologia corrente e avança-se ao 12º ciclo de execução. Este ciclo esta ilustrado na figura 7 (c).

No 12º ciclo de execução do processo de avaliação o circuito fechado em análise é o circuito 15 (barras de 7-3), não sendo identificado nenhum circuito livre adjacente, pois o circuito 7 foi fixado com o valor $x_{ij} = 0$ no 4º ciclo de repetição, assim atualiza-se a topologia corrente e chega-se ao fim do ciclo de execução.

Figura 7 - Iteração 11 da fase construtiva.



Fonte: a própria autora

Nesta iteração foi possível fixar um circuito ij com o valor $x_{ij} = 0$, o circuito 7.

Na sequência encontra-se a topologia corrente $(\Omega_1, \Omega_0, \Omega_c)$, após o término da iteração 11 da fase construtiva.

- $\Omega_1 = \{1, 2, 3, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15\}$;
- $\Omega_0 = \{7, 14\}$;
- $\Omega_c = \{4, 16\}$;

Esta topologia não é uma proposta de solução para o problema, portanto continua-se o processo iterativo e passa para a décima segunda iteração da fase construtiva.

- Iteração 12

Na tabela 7 são apresentados os valores dos fluxos de potência aparente nos circuitos do sistema após a resolução do PNL para a topologia da iteração 12 da fase construtiva.

Tabela 7 - Fluxo de potência aparente dos circuitos que podem ser fechados.

Circuito	Barra inicial	Barra final	Fluxo de potência (kVA)
4	11	10	409,222
16	10	1	31,832

Utilizando a inequação (28) calcula-se o intervalo para criar a lista RCL como apresentado em (39) e (40).

$$409,222 - 0,5(409,222 - 31,832) \leq S_{ij} \leq 409,222 \quad (39)$$

$$220,527 \leq S_{ij} \leq 409,222 \quad (40)$$

Na tabela 8 são apresentados os circuitos livres que possuem valores de fluxos de potência aparente entre os limites estabelecidos pelo intervalo.

Tabela 8 - Candidatos da lista RCL.

Circuito	Barra inicial	Barra final	Fluxo de potência (kVA)
4	11	10	409,222

A lista criada contém um único circuito. Então este circuito é fechado no sistema. O conjunto (Ω_1) é então atualizado. Após ser atualizado, o conjunto de circuito fechados possui a seguinte configuração: $\Omega_1 = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15\}$.

Verificamos que $|\Omega_1| = 13 = n_b - 1$, portanto foi gerada uma solução radial e então termina a fase construtiva. Adicionalmente os circuitos ainda livres são incorporados no conjunto de circuitos Ω_0 .

Na sequência encontra-se a topologia corrente $(\Omega_1, \Omega_0, \Omega_c)$, após o término da iteração 12 da fase construtiva.

- $\Omega_1 = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15\}$;
- $\Omega_0 = \{7, 14, 16\}$;
- $\Omega_c = \{\phi\}$;

Encontrada uma proposta de solução radial, portanto a fase construtiva chegou ao fim.

A solução construída na fase construtiva tem perdas ativas de 483,86 kW, que melhora em relação à perda da topologia inicial, que tem perdas ativas de 511,43 kW.

Na tabela 9 encontra-se o processo iterativo da fase construtiva, onde se apresenta o que ocorreu em cada iteração no conjunto de circuitos fechados (Ω_1) e no conjunto de circuitos abertos (Ω_0). Os circuitos destacados em vermelho foram adicionados ao sistema na respectiva iteração.

Tabela 9 – Iterações da fase construtiva, com os circuitos adicionados em Ω_1 e Ω_0 .

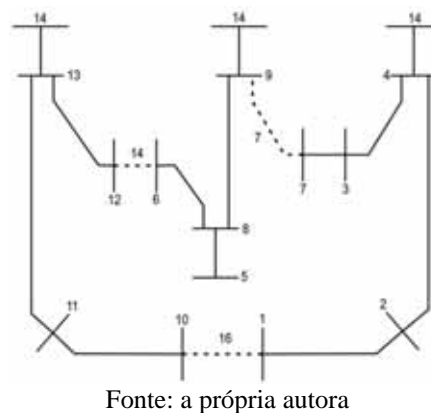
Iteração	Circuitos adicionados em Ω_1	Circuitos adicionados em Ω_0
1	5, 9	ϕ
2	2, 5, 9	ϕ
3	2, 5, 9, 10	ϕ
4	2, 5, 6, 9, 10	ϕ
5	1, 2, 5, 6, 9, 10	ϕ
6	1, 2, 5, 6, 9, 10, 12	ϕ
7	1, 2, 5, 6, 8, 9, 10, 12	14
8	1, 2, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12	14
9	1, 2, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13	14
10	1, 2, 3, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13	14
11	1, 2, 3, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15	7, 14
12	1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15	7, 14, 16

5.7.3 Fase de Melhoria Local

Na fase de melhoria local o objetivo é tentar melhorar a solução encontrada na fase construtiva realizando uma busca na vizinhança. Assim, conectando os circuitos que ficaram desconectados na fase construtiva, pode-se analisar o laço formado por estes circuitos, sendo realizada uma busca na vizinhança destes circuitos.

Na figura 8 apresenta-se a topologia encontrada pela fase construtiva, que possui perdas ativas de 483,86 kW. Esta topologia é a topologia inicial da fase de melhoria local.

Figura 8 - Topologia final da fase construtiva.

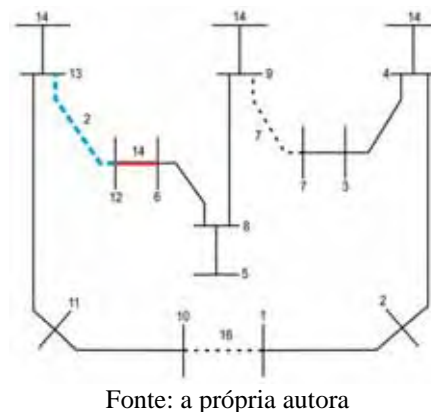


A partir desta topologia inicia-se a fase de melhoria local.

- Iteração 1.

Na iteração 1 o circuito a ser fechado para formar o laço é o circuito 14 (barras de 12-6) ilustrado por uma linha contínua em vermelho, e o circuito adjacente que será aberto para a montante é o circuito 2 (barras de 13-12), ilustrado por uma linha pontilhada em azul ao lado do circuito inserido. Na figura 9 ilustra-se este processo

Figura 9 - Topologia da iteração 1 da fase de melhoria local.

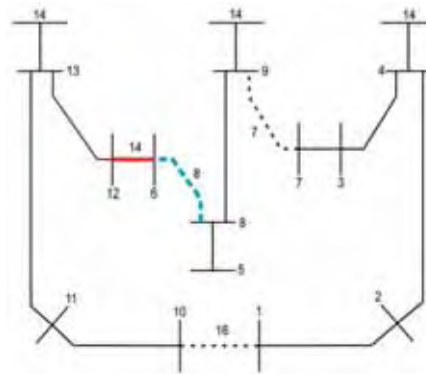


A solução vizinha encontrada tem perdas ativas totais de 639,54 kW. Esta solução é pior que a solução corrente, portanto não é necessário continuar a busca para a montante, assim volta-se a topologia corrente, onde o circuito 2 (barras de 13-12) é fechado.

- Iteração 2

Na iteração 2 considera-se ainda como circuito fechado para formar um laço o circuito 14 (barras de 12-6), e então é avaliado o circuito adjacente. O circuito adjacente que será aberto para a jusante é o circuito 8 (barras de 6-8). Na figura 10 ilustra-se este processo.

Figura 10 - Topologia da iteração 2 da fase de melhoria local.



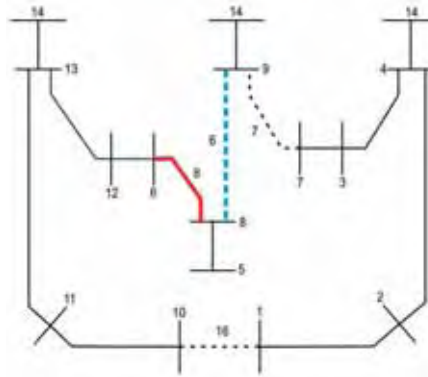
Fonte: a própria autora

A solução vizinha encontrada tem perdas ativas totais de 466,10 kW. Esta solução é melhor que a solução corrente, portanto a solução corrente recebe a solução vizinha e continua-se analisando para a jusante, em busca de uma melhor solução, a partir desta topologia.

- Iteração 3

Na iteração 3 partindo da topologia da iteração anterior, o circuito 8 (barras de 6-8) é fechado e o circuito adjacente para a jusante que será aberto é o circuito 6 (barras de 8-9). Na figura 11 ilustra-se este processo

Figura 11 - Topologia da iteração 3 da fase de melhoria local.



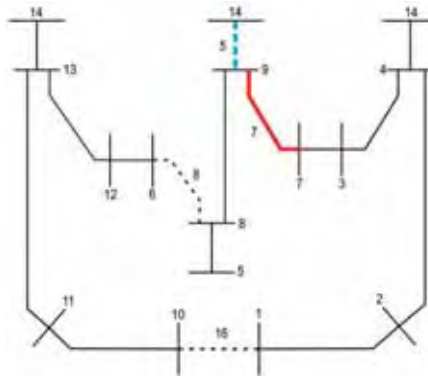
Fonte: a própria autora

A solução vizinha encontrada tem perdas ativas totais de 705,01 kW. Esta solução é pior que a solução corrente, portanto não é necessário continuar a busca para a jusante. A busca local termina para este laço e na iteração seguinte inicia em outro laço.

▪ Iteração 4

Na iteração 4 o circuito a ser fechado para formar o laço é o circuito 7 (barras de 9-7), e o circuito adjacente que será aberto para a montante é o circuito 5 (barras de 14-9). Na figura 12 ilustra-se este processo.

Figura 12 - Topologia da iteração 4 da fase de melhoria local.



Fonte: a própria autora.

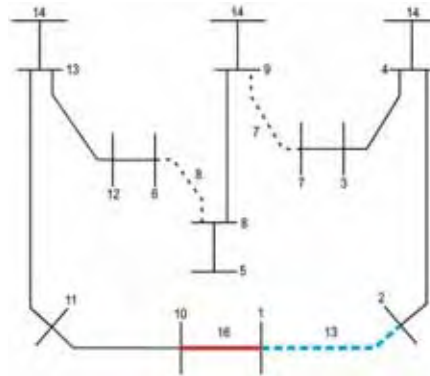
A solução vizinha encontrada tem perdas ativas totais de 1334,30 kW. Esta solução é pior que a solução corrente, portanto não é necessário continuar a busca para a montante, assim, volta-se a configuração inicial, onde o circuito 5 (barras de 14-9) é fechado.

A solução vizinha encontrada tem perdas ativas totais de 479,26 kW. Esta solução é pior que a solução corrente, portanto não é necessário continuar a busca para a montante, assim, volta-se a configuração inicial, onde o circuito 4 (barras de 11-10) é fechado.

▪ Iteração 7

Na iteração 7 considera-se ainda como circuito fechado para formar um laço o circuito 16 (barras de 10-1), e então é avaliado o circuito adjacente para a jusante. O circuito adjacente que será aberto para a jusante é o circuito 13 (barras de 1-2). Na figura 15 ilustra-se este processo.

Figura 15 - Topologia da iteração 7 da fase de melhoria local.

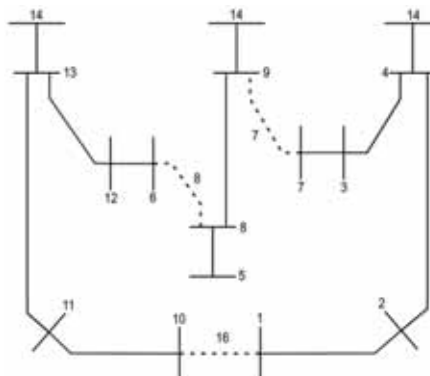


Fonte: a própria autora.

A solução vizinha encontrada tem perdas ativas totais de 492,80 kW. Esta solução é pior que a solução corrente, portanto não é necessário continuar verificando para a jusante. A busca local termina para este laço e chega-se ao fim da fase de melhoria local.

Então a incumbente do problema que é a melhor topologia encontrada, tem perdas ativas de 466,10 kW. Esta topologia é a ilustrada na figura 16.

Figura 16 - Topologia final encontrada na fase de melhoria local.



Fonte: a própria autora.

A solução encontrada tem perdas ativas de 466,10 kW, e esta topologia é a solução ótima para o sistema de 14 barras, como apresentado na literatura especializada (CARREÑO et al., 2007).

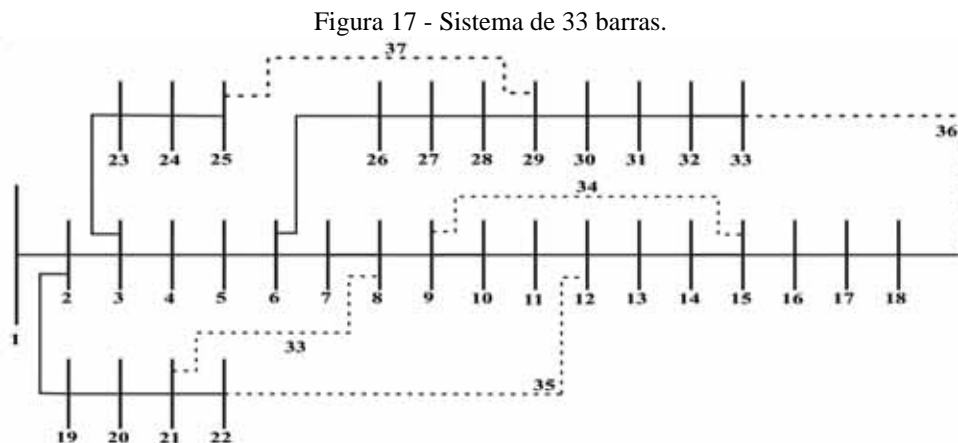
6 RESULTADOS

Os resultados obtidos com a aplicação da metodologia proposta neste trabalho são apresentados neste capítulo, em que o objetivo é resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica.

A metodologia foi escrita na linguagem de modelagem matemática AMPL (*A Modeling Language for Mathematical Programming*) (FOURER et al., 2003) e para resolver o problema de PNL a cada iteração do AHC e da fase de melhoria local foi utilizado o solver comercial KNITRO® 7.0 (BYRD et al., 2006). Todas as simulações foram realizadas utilizando um PC Intel Core 2 Duo 1.9 GHz, 2 GB de Memória RAM, e sistema operacional Windows 7 Ultimate 32 bits. Para os testes computacionais foram utilizados os sistemas teste de 33, 70, 84, 119, 136 barras (BARAN; WU, 1989; GUIMARÃES, 2005; CHIOU et al., 2005; CARREÑO et al., 2007; ZHANG et al., 2007) respectivamente e o sistema real de 417 barras (BERNAL-AGUSTIN, 1998). Os dados de linhas e cargas dos sistemas encontram-se descritos no Anexo deste trabalho.

6.1 Sistema de 33 Barras

O sistema teste de 33 barras possui 32 barras de cargas, 1 barra de subestação e 37 circuitos, tem como tensão base 12,66 kV, e as condições de carga total ativa e reativa são de 3.715 kW e 2.315 kVAr respectivamente. A figura 17 ilustra o sistema de 33 barras, que possui cinco circuitos de interconexões, sendo os circuitos 33, 34, 35, 36 e 37 que inicialmente encontram-se abertos e são ilustrados pelas linhas tracejadas.



Fonte: Guimarães (2005, p. 54).

Os resultados obtidos para o sistema de 33 barras são apresentados na tabela 10. Estes resultados foram obtidos utilizando um $\alpha = 0,5$.

Tabela 10 - Resultados obtidos para o sistema de 33 barras.

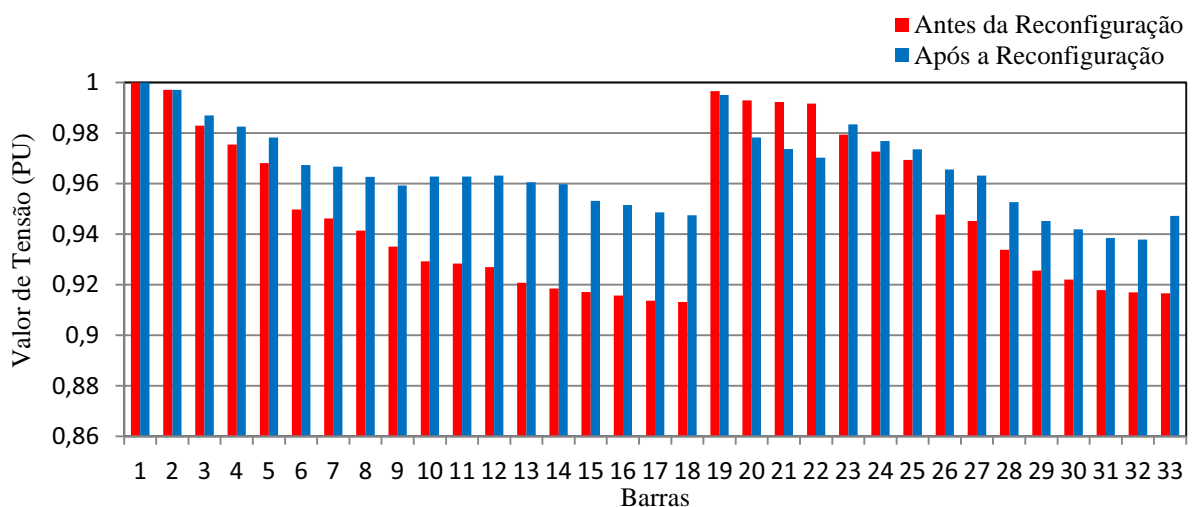
Configurações	Circuitos Abertas	Perdas Ativas (kW)
Inicial	33-34-35-36-37	202,52
Final	7-9-14-32-37	139,55
(CARREÑO et al., 2008; OLIVEIRA, 2011)	7-9-14-32-37	139,55

A configuração final e as perdas ativas obtidas para o sistema de 33 barras são iguais aos melhores resultados encontrados na literatura (CARREÑO et al., 2008; OLIVEIRA, 2011).

Para encontrar a solução foram realizadas 30 iterações do GRASP, com um tempo computacional de 111,69 segundos. Neste teste foram resolvidos 942 problemas de PNL na fase construtiva e 327 problemas de PNL na fase de melhoria local. A quantidade de problemas de PNL's resolvidos na fase de melhoria local depende das configurações encontradas na fase construtiva.

Na figura 18 são apresentados os níveis das magnitudes de tensão encontrados para as topologias inicial e final do sistema de 33 barras.

Figura 18 - Níveis de magnitude de tensões obtidos para o sistema de 33 barras.



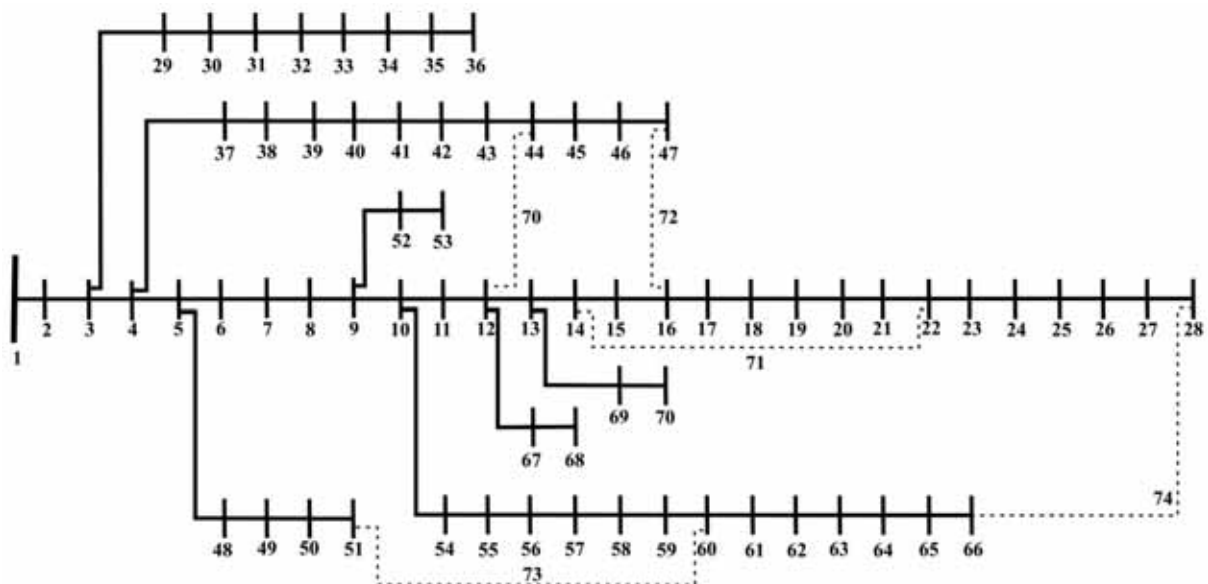
Fonte: a própria autora.

A topologia final possui na maioria das barras um nível de tensão mais elevado que a topologia inicial. Na topologia inicial a menor tensão se encontra na barra 18 com o valor de 0,91309 pu. A queda de tensão neste caso está ultrapassando os limites permitidos pelas normas reguladoras da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (2012). Após a reconfiguração a menor tensão se encontra na barra 32 com o valor de 0,93782 pu. As tensões nas barras da topologia final não violam o limite mínimo exigido pela norma, que é de 7%, isto é, o valor das tensões está acima de 0,93 pu.

6.2 Sistema de 70 Barras

O Sistema teste de 70 barras possui 69 barras de cargas, 1 subestação e 74 circuitos, tem como tensão base 12,66 kV, e as condições de carga total ativa e reativa são de 1.128,84 kW e 900,71 kVAr. A figura 19 ilustra o sistema de 70 barras, que possui cinco circuitos de interconexões, sendo os circuitos 70, 71, 72, 73 e 74 que inicialmente encontram-se abertos e são ilustrados pelas linhas tracejadas.

Figura 19 - Sistema de 70 Barras.



Fonte: Guimarães (2005, p. 56).

Os resultados obtidos para o sistema de 70 barras são apresentados na tabela 11. Estes resultados foram obtidos utilizando um $\alpha = 0,5$.

Tabela 11 - Resultados obtidos para o sistema de 70 barras.

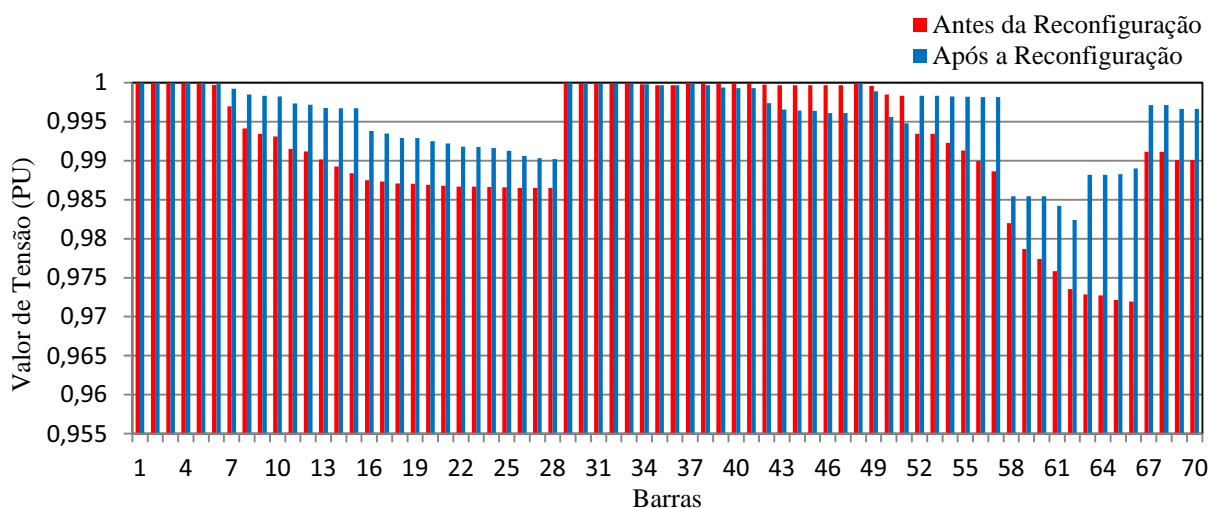
Configurações	Circuitos Abertas	Perdas Ativas (kW)
Inicial	70-71-72-73-74	20,91
Final	15-57-62-70-71	9,34
(CHIANG; JEAN-JUMEAU,1990)	15-57-62-70-71	9,34

A configuração final e as perdas ativas obtidas para o sistema de 70 barras são iguais aos melhores resultados encontrados na literatura (CHIANG; JEAN-JUMEAU,1990).

Para encontrar a solução foram realizadas 30 iterações do GRASP, com um tempo computacional de 191,38 segundos. Neste teste foram resolvidos 1966 problemas PNL na fase construtiva e 340 problemas de PNL na fase de melhoria local. A quantidade de problemas de PNL's resolvidos na fase de melhoria local depende das configurações encontradas na fase construtiva.

Na figura 20 são apresentados os níveis de tensão encontrados para as topologias inicial e final do sistema de 70 barras.

Figura 20 - Níveis de magnitude de tensões obtidos para o sistema de 70 barras.



Fonte: a própria autora

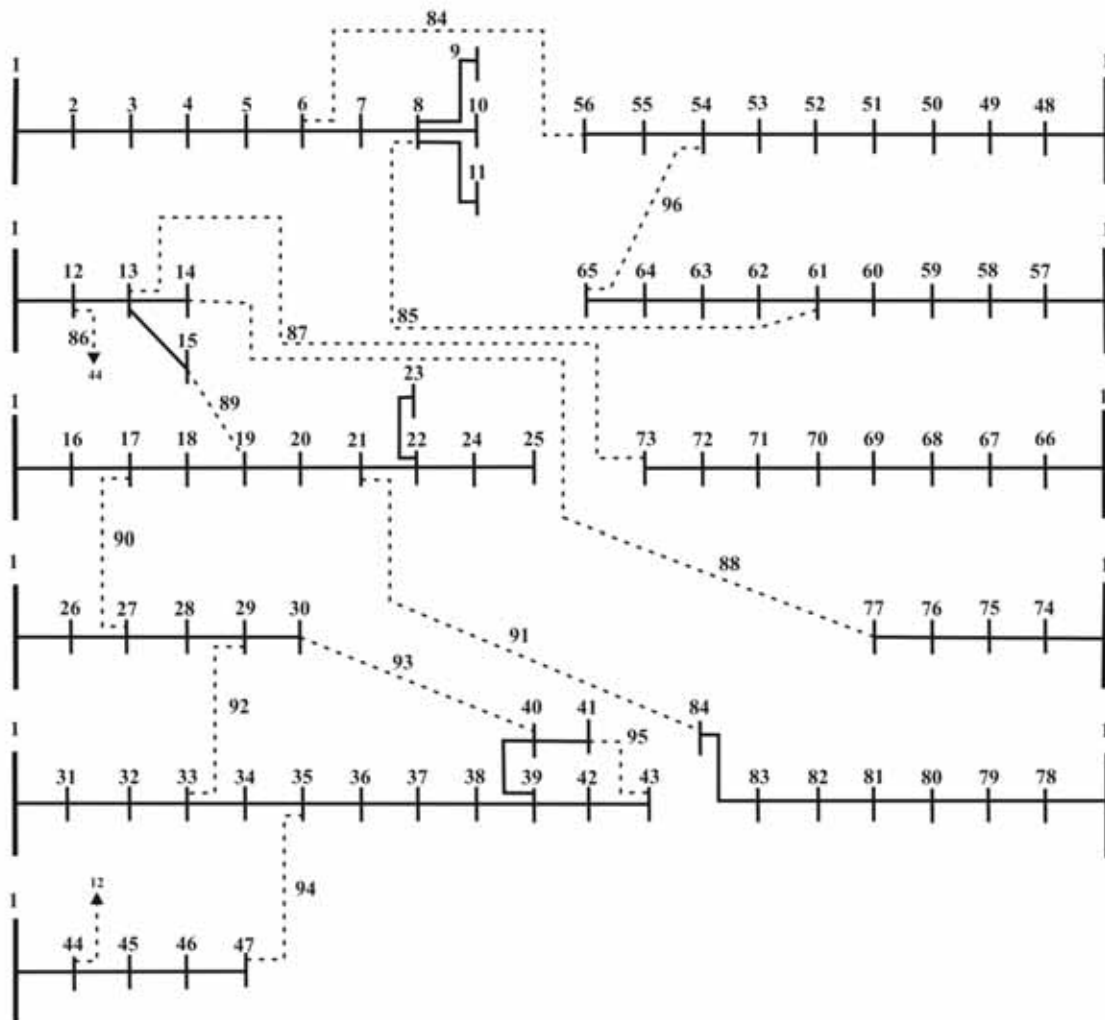
A nova topologia possui na maioria das barras um nível de tensão mais elevado que a topologia inicial. Na topologia inicial a menor tensão se encontra na barra 66 com o valor de 0,97196 pu. A queda de tensão neste caso está dentro dos limites permitidos pelas normas reguladoras da ANEEL (2012). Após a reconfiguração a menor tensão se encontra na barra 62

com o valor de 0,98240 pu. Tanto as magnitudes das tensões nas barras da topologia inicial como na topologia final não violam o limite mínimo exigido pela norma, que é de 7%.

6.3 Sistema de 84 Barras

O Sistema teste de 84 barras possui 83 barras de carga, 1 subestação e 96 circuitos, tem como tensão base 11,40 kV, e as condições de carga total ativa e reativa são de 28.350,00 kW e 20.700,00 kVAr. A figura 21 ilustra o sistema de 84 barras, que possui treze circuitos de interconexões, sendo os circuitos 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95 e 96 que inicialmente encontram-se abertos e são ilustrados pelas linhas tracejadas.

Figura 21 - Sistema de 84 barras.



Fonte: Guimarães (2005, p. 58).

Os resultados obtidos para o sistema de 84 barras são apresentados na tabela 12. Estes resultados foram obtidos utilizando um $\alpha = 0,5$.

Tabela 12 - Resultados obtidos para o sistema de 84 barras.

Configurações	Circuitos Abertas	Perdas Ativas (kW)
Inicial	84-85-86-87-88-89-90-91-92-93-94-95-96	531,90
Final	7-13-34-39-42-55-62-72-83-86-89-90-92	469,88
(WANG, 2008; OLIVEIRA, 2011)	7-13-34-39-42-55-62-72-83-86-89-90-92	469,88

A configuração final e as perdas ativas obtidas para o sistema de 84 barras são iguais aos melhores resultados encontrados na literatura (WANG, 2008; OLIVEIRA, 2011).

Para encontrar a solução foram realizadas 50 iterações do GRASP, com um tempo computacional de 879,36 segundos. Neste teste foram calculados 3612 PNL na fase construtiva e 1498 PNL na fase de melhoria local. A quantidade de problemas de PNL's resolvidos na fase de melhoria local depende das configurações encontradas na fase construtiva.

No sistema de 84 barras foi realizada uma análise do parâmetro alfa (α) a fim de comprovar que o mesmo não precisa ser calibrado cuidadosamente. Nesta análise o programa foi executado 50 vezes, com 50 iterações do algoritmo GRASP para cada valor de alfa. Os resultados obtidos são os mesmos que o melhor resultado encontrado na literatura (WANG, 2008; OLIVEIRA, 2011), para os diferentes valores de alfa. A tabela 13 apresenta o intervalo de iterações que foi encontrada a melhor solução da literatura.

Tabela 13 - Resultados da análise do parâmetro alfa para o sistema de 84 barras.

Valor de alfa	Intervalo de iterações que foi encontrada a solução
0,9	7-18
0,7	3-10
0,5	1-5
0,3	1-3
0,1	1-2

O objetivo deste teste é mostrar que para qualquer valor de α no intervalo de 0,1 a 0,9 são necessárias poucas iterações do GRASP para que a melhor solução, comparada com a literatura especializada, seja encontrada.

Em relação ao parâmetro alfa, na sequência será apresentado quantos elementos entram na lista RCL na primeira iteração da fase construtiva do algoritmo GRASP para o sistema de

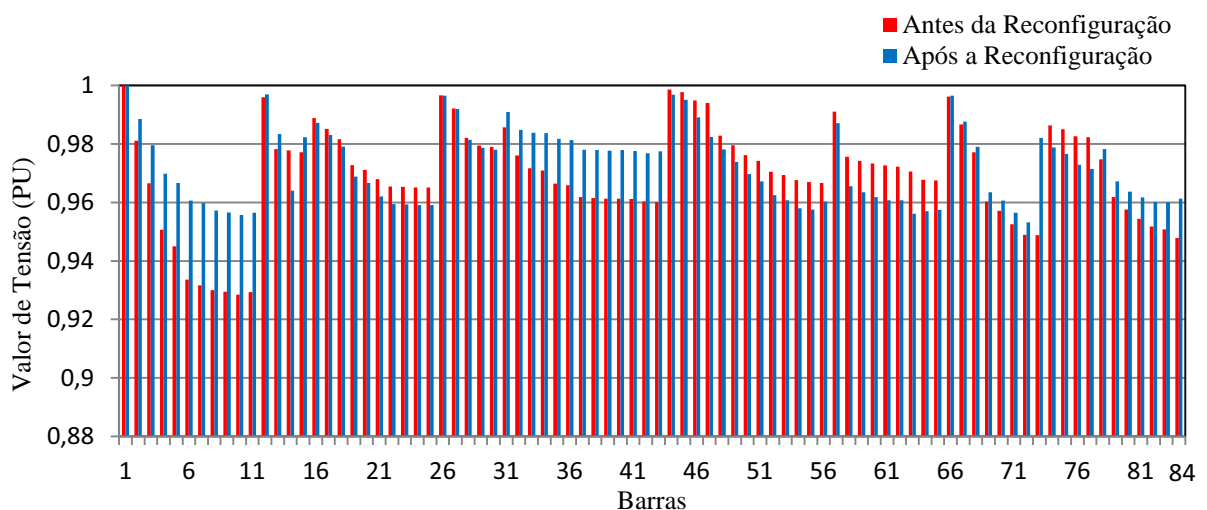
84 barras para diferentes valores de alfa. A lista é formada pelos circuitos pertencentes ao conjunto de circuitos Ω_c e que satisfazem o intervalo imposto pela inequação (28).

Tabela 14 - Quantidade de elementos na lista para o sistema de 84 barras.

Valor de alfa	Quantidade de circuitos na lista
0,9	65
0,7	52
0,5	29
0,3	19
0,1	1

Na figura 22 são apresentados os níveis das magnitudes de tensões encontrados para as topologias inicial e final do sistema de 84 barras.

Figura 22 - Níveis de magnitude de tensões obtidos para o sistema de 84 barras.



Fonte: a própria autora

A topologia final possui na maioria das barras um nível de tensão mais elevado que a topologia inicial. Na topologia inicial a menor tensão encontra-se na barra 10 com o valor de 0,92852 pu. A queda de tensão neste caso está ultrapassando os limites permitidos pelas normas reguladoras da ANEEL (2012). Após a reconfiguração a menor tensão se encontra na barra 72 com o valor de 0,95319 pu. As tensões nas barras da topologia final não violam o limite mínimo exigido pela norma, que é de 7%.

6.4 Sistema de 119 Barras

O Sistema teste de 119 barras possui 118 barras de carga, 1 subestação e 133 circuitos, tem como tensão base 11,00 kV, e as condições de carga total ativa e reativa são de 22.709,72 kW e 17.041,07 kVAr. O sistema de 119 barras, que possui quinze circuitos de interconexões, sendo os circuitos 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132 e 133 que inicialmente encontram-se abertos.

Os resultados obtidos para o sistema de 119 barras são apresentados na tabela 15. Estes resultados foram obtidos utilizando um $\alpha = 0,5$.

Tabela 15 - Resultados obtidos para o sistema de 119 barras.

Configurações	Circuitos Abertas	Perdas Ativas (kW)
Inicial	119-120-121-122-123-124-125-126-127-128-129-130-131-132-133	1294,63
Final	24-26-35-40-43-51-59-72-75-96-98-110-122-130-131	853,65
(OLIVEIRA, 2010; OLIVEIRA, 2011)	24-26-35-40-43-51-59-72-75-96-98-110-122-130-131	853,65
(ZHANG et al., 2007)	24-27-35-40-43-53-59-72-75-96-98-110-123-130-131	865,86

As perdas ativas obtidas para o sistema de 119 barras foram menores que as obtidas em (ZHANG et al., 2007), porém os resultados são iguais aos melhores resultados encontrados por (OLIVEIRA, 2010; OLIVEIRA, 2011).

Para encontrar a solução foram realizadas 50 iterações do GRASP, com um tempo computacional de 7583,3 segundos. Neste teste foram resolvidos 5187 PNL na fase construtiva e 1851 problemas de PNL na fase de melhoria local. A quantidade de problemas de PNL's resolvidos na fase de melhoria local depende das configurações encontradas na fase construtiva.

No sistema de 119 barras foi realizada uma análise do parâmetro alfa (α) a fim de comprovar que o mesmo não precisa ser calibrado cuidadosamente. Nesta análise o programa foi executado 50 vezes, com 50 iterações do algoritmo GRASP para cada valor de alfa. Os resultados obtidos são os mesmos que o melhor resultado encontrado na literatura

(OLIVEIRA, 2010; OLIVEIRA, 2011), para os diferentes valores de alfa. A tabela 16 apresenta o intervalo de iterações que foi encontrada a melhor solução da literatura.

Tabela 16 - Resultados da análise do parâmetro alfa para o sistema de 119 barras

Valor de alfa	Intervalo de iterações que foi encontrada a solução
0,9	10-24
0,7	11-19
0,5	3-9
0,3	1-5
0,1	1-3

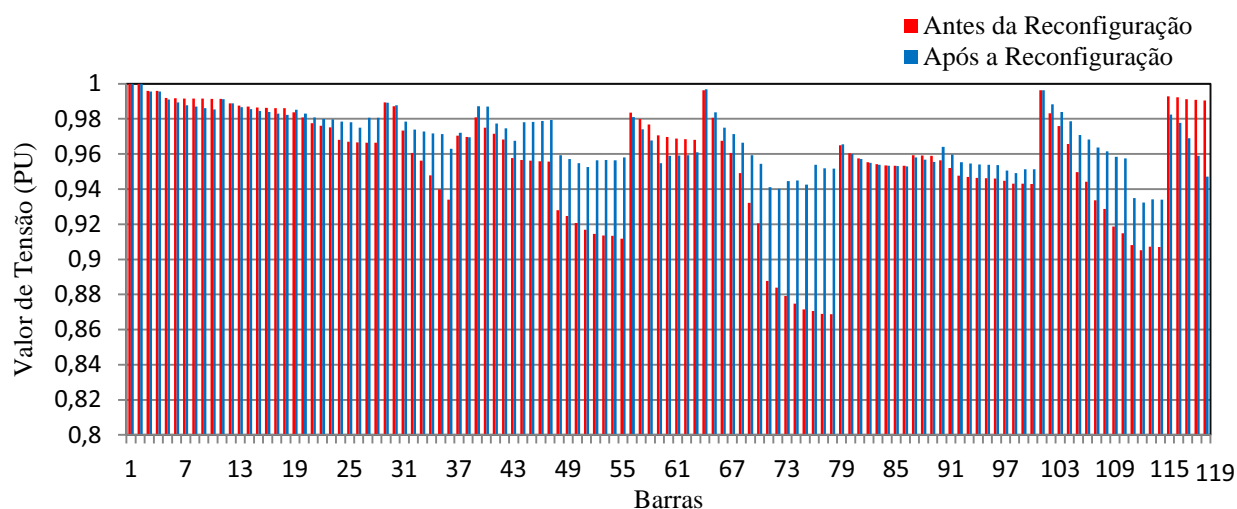
O valor de alfa foi modificado para o sistema de 119 barras, para verificar quantos elementos entram na lista RCL, na primeira iteração da fase construtiva. A lista é formada pelos circuitos pertencentes ao conjunto de circuitos Ω_c e que satisfazem o intervalo imposto pela inequação (28).

Tabela 17 - Quantidade de elementos na lista para o sistema de 119 barras.

Valor de alfa	Quantidade de circuitos na lista
0,9	47
0,7	18
0,5	5
0,3	2
0,1	1

Na figura 23 são apresentados os níveis de magnitude de tensões encontrados para a topologia inicial e final do sistema de 119 barras.

Figura 23 - Níveis de magnitude de tensões obtidos para o sistema de 119 barras.



Fonte: a própria autora.

A topologia final possui na maioria das barras um nível de tensão mais elevado que a topologia inicial. Na topologia inicial a menor tensão se encontra na barra 78 com o valor de 0,86878 pu. A queda de tensão neste caso está ultrapassando os limites permitidos pelas normas reguladoras da ANEEL (2012). Após a reconfiguração a menor tensão se encontra na barra 112 com o valor de 0,93227 pu. As tensões nas barras da topologia final não violam o limite mínimo exigido pela norma, que é de 7%.

6.5 Sistema de 136 Barras

O Sistema teste de 136 barras possui 135 barras de carga, 1 subestação e 155 circuitos, tem como tensão base 13,80 kV, e as condições de carga total ativa e reativa são de 18.313,809 kW e 9.384,827 kVAr. O sistema de 136 barras possui 21 circuitos de interconexões, sendo os circuitos 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155 e 156 que inicialmente encontram-se abertos.

Os resultados obtidos para o sistema de 136 barras são apresentados na tabela 18. Estes resultados foram obtidos utilizando um $\alpha = 0,5$.

Tabela 18 - Resultados obtidos para o sistema de 136 barras.

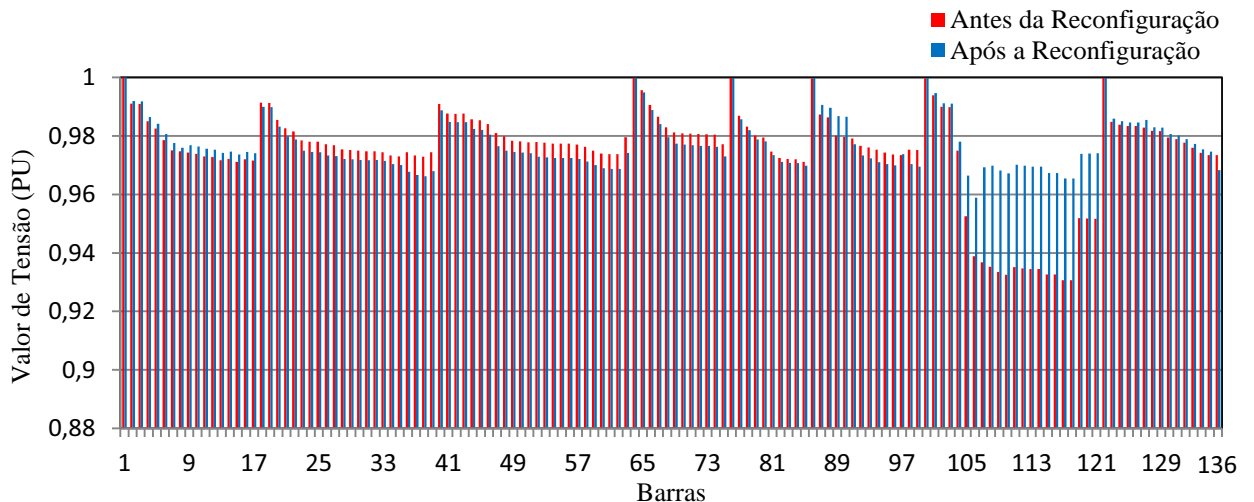
Configurações	Circuitos Abertas	Perdas Ativas (kW)
Inicial	136-137-138-139-140- 141-142-143-144-145- 146-147-148-149-150- 151-152-153-154-155-156	320,24
Final	7-35-51-90-96-106-118- 126-135-137-138-141- 142-144-145-146-147- 148-150-151-155	280,16
(CARREÑO et al., 2008; OLIVEIRA, 2011)	7-35-51-90-96-106-118- 126-135-137-138-141- 142-144-145-146-147- 148-150-151-155	280,16

A configuração final e as perdas ativas obtidas para o sistema de 136 barras são iguais aos melhores resultados encontrados na literatura (CARREÑO et al., 2008; OLIVEIRA, 2011).

Para encontrar a solução foram realizadas 100 iterações do GRASP, com um tempo computacional de 17680,33 segundos. Neste teste foram resolvidos 10413 problemas PNL na fase construtiva e 4778 problemas de PNL na fase de melhoria local. A quantidade de problemas de PNL's resolvidos na fase de melhoria local depende das configurações encontradas na fase construtiva.

Na figura 24 são apresentados os níveis de magnitude de tensões encontrados para a topologia inicial e final do sistema de 136 barras.

Figura 24 - Níveis de magnitude de tensões obtidos para o sistema de 136 barras.



Fonte: a própria autora.

Na topologia inicial a menor tensão se encontra nas barras 117 e 118 com o valor de 0,93065 pu. A queda de tensão neste caso está dentro dos limites permitidos pelas normas reguladoras da ANEEL (2012). Após a reconfiguração a menor tensão encontrada está na barra 106 com o valor de 0,95891 pu. As tensões nas barras das topologias inicial e final não violam o limite mínimo exigido pela norma, que é de 7%.

6.6 Sistema de 417 Barras

O Sistema real de 417 barras possui 416 barras de carga, 1 subestação e 473 circuitos, tem como tensão base 11,00 kV, e as condições de carga total ativa e reativa são de 21.836,55 kW e 10.763,72 kVAr.

Os resultados obtidos para o sistema de 417 barras são apresentados na tabela 19. Estes resultados foram obtidos utilizando um $\alpha = 0,5$.

Tabela 19 - Resultados obtidos para o sistema de 417 barras.

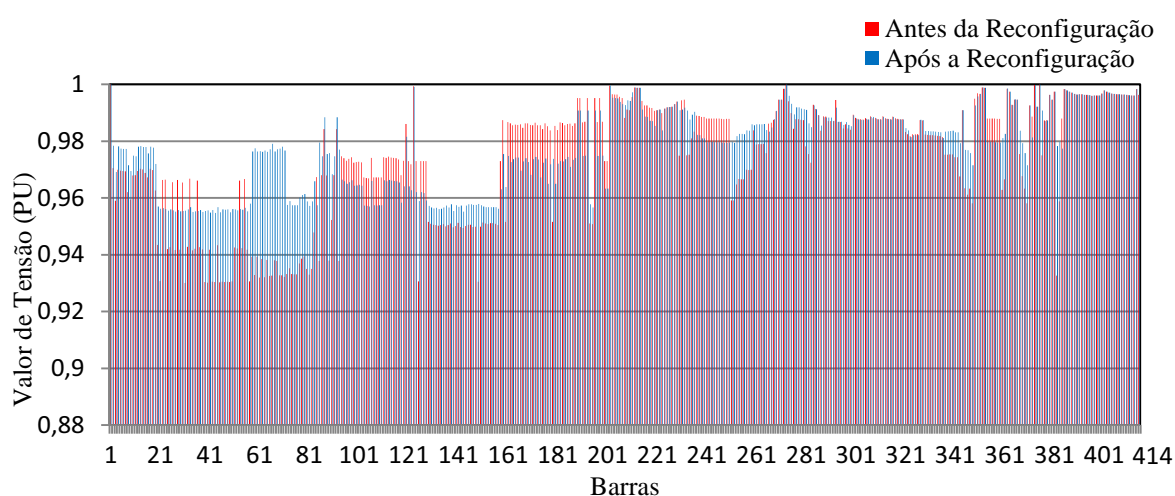
Configurações	Circuitos Abertas	Perdas Ativas (kW)
Inicial	1-5-15-16-26-31-53-54-55-75-82-94-96-97-106-107-119-136-138-154-155-156-168-169-177-179-194-195-201-207-211-214-219-241-256-258-282-297-302-314-321-354-359-362-364-385-388-395-396-404-407-423-424-426-431-436-445-446-449	708,94
Final	5- 13- 15- 16- 21- 26- 31-54- 57- 59-60-73- 86- 87- 94- 96- 97-111-115-136-142-149-150-155-156-158-163-168-169-178-179-191-195-199-214-221-254- 256-266-282-317-322-325-358- 362-369-392-395-403-404- 416-423-426- 431-436-437- 446- 449- 466	581,56
(LAVORATO et al., 2012)	1-4-15-16-29-31-34-40-43-46-65-70-73-75-83-84-94-97-107-110-115-123-136-146-156-158-163-168-169-183-199-201-209-211-214-236-252-290-297-302-321-322-358-366-367-369-376-380-388-395-404-415-416-423-426-427-436-445-446	685,88

Para o sistema de 417 barras o método obteve uma melhor solução do que o apresentado em (LAVORATO et al., 2012).

Para encontrar a solução foram realizadas 200 iterações do GRASP, com um tempo computacional de 104687,9 segundos. Neste teste foram resolvidos 57847 problemas de PNL na fase construtiva e 24603 problemas de PNL na fase de melhoria local. A quantidade de problemas de PNL's resolvidos na fase de melhoria local depende das configurações encontradas na fase construtiva.

Na figura 25 são apresentados os níveis de magnitude de tensões encontrados para as topologias inicial e final do sistema de 417 barras.

Figura 25 - Níveis de magnitude de tensões obtidos para o sistema de 417 barras.



Fonte: a própria autora.

Na topologia inicial a menor tensão encontra-se nas barras 31 com o valor de 0,930078 pu. A queda de tensão neste caso está dentro dos limites permitidos pelas normas reguladoras da ANEEL (2012). Após a reconfiguração a menor tensão encontrada está na barra 43 com o valor de 0,95477 pu. As tensões nas barras das topologias inicial e final não violam o limite mínimo exigido pela norma, que é de 7%.

Os dados do sistema real de 417 barras foram adaptados para serem utilizados no problema de reconfiguração de sistemas de distribuição, os dados originais são do problema de planejamento. (BERNAL-AGUSTIN, 1998). A solução inicial apresentada neste trabalho foi elaborada pela própria autora.

6.7 Análise do índice de sensibilidade

O índice de sensibilidade tem uma função fundamental no contexto da Metaheurística GRASP, pois indicam quais são os circuitos mais atraentes para fazer parte da proposta de

solução. Uma vez que o índice de sensibilidade seja bem escolhido, ele pode proporcionar muitos benefícios na execução do algoritmo, como eficiência e qualidade nas soluções.

Com o objetivo de encontrar um índice de sensibilidade de melhor desempenho, foram testados os três tipos de índices de sensibilidades apresentados a seguir:

$$ISFC_{ij} = S_{ij} \quad (41)$$

$$ISFC_{ij} = S_{ij} * x_{ij} \quad (42)$$

$$ISFC_{ij} = x_{ij} \quad (43)$$

Para escolher o melhor índice de sensibilidade foram feitos testes com todos os índices de sensibilidade em todos os sistemas testes utilizados neste trabalho. Nestes testes executou para cada índice de sensibilidade 50 vezes o programa para cada sistema teste, desta maneira foi possível identificar qual índice de sensibilidade obteve mais eficiência.

Por exemplo, para o sistema teste de 84 barras, com o parâmetro alfa igual a 0,5, foram executados 50 vezes o programa para cada índice de sensibilidade, com 50 iterações do algoritmo Grasp, o resultado é apresentado na tabela a seguir:

Tabela 20 - Análise do índice de sensibilidade para o sistema de 84 barras.

Índice de sensibilidade	Iterações que encontrou a solução do problema
$ISFC_{ij} = S_{ij}$	1-5
$ISFC_{ij} = S_{ij} * x_{ij}$	5-13
$ISFC_{ij} = x_{ij}$	9-27

Como foi possível verificar que todos os índices de sensibilidade encontram a melhor solução encontrada na literatura (WANG, 2008; OLIVEIRA, 2011), porém dependendo do índice de sensibilidade o resultado pode ser encontrado em um menor número de iterações, como foi apresentado na tabela.

Portanto foi escolhido o primeiro índice de sensibilidade, pois este encontrou a melhor configuração em um menor número de iterações, em todos os sistemas testados. Além dos resultados para o sistema de 84 barras foram testados os sistemas de 33, 70, 119, 136 e 417 barras, e em todos os testes o primeiro índice de sensibilidade obteve um melhor desempenho.

Vale ressaltar que qualquer índice de sensibilidade poderia ser utilizado no trabalho, pois os mesmos encontraram a melhor solução do problema. A única diferença entre eles é que a solução pode ser encontrada em um menor número de iterações, o que proporciona maior eficiência e qualidade ao algoritmo de reconfiguração.

6.8 Comentários

Diferente da metodologia apresentada em (OLIVEIRA, 2011), os valores de α não precisaram ser calibrados cuidadosamente para que soluções de melhor qualidade sejam encontradas, o que é uma vantagem da metodologia proposta em relação a (OLIVEIRA, 2011).

7 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado um método para resolução do problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando a metaheurística GRASP, tendo como objetivo principal a minimização das perdas ativas do sistema. Foram descritas as principais etapas e características da metaheurística GRASP e sua aplicação no problema proposto.

Para verificar o desempenho do algoritmo e realizar uma validação foram utilizados 7 sistemas elétricos, sendo os sistemas de 14, 33, 70, 84, 119, 136 e 417 barras. O algoritmo proposto apresentou excelentes resultados. As topologias finais encontradas para os sistemas teste de 14, 33, 70, 84, 119 e 136 foram iguais aos melhores resultados encontrados na literatura, e a topologia final do sistema real de 417 barras apresentou perdas menores que a melhor solução encontrada na literatura, portanto esta topologia é a melhor encontrada até o presente momento.

Sendo assim, conclui-se que a metaheurística GRASP aplicada na resolução do problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica obteve um desempenho satisfatório nos testes realizados para os sistemas elétricos propostos. Então a metodologia proposta é bastante confiável, eficiente, segura e robusta para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica.

Adicionalmente, deve-se mencionar que o tempo de processamento são relativamente elevados, mas esse não é um problema crítico já que estamos resolvendo um problema de planejamento da operação de sistemas de distribuição de energia elétrica.

7.1 Trabalhos Futuros

A proposta apresentada pode ser melhorada ou estendida para se tornar mais eficiente, especialmente para diminuir o tempo de processamento e estender a proposta para modelos matemáticos mais complexos. Assim, os seguintes trabalhos podem ser realizados no futuro:

- Melhoria da estratégia que fixa variáveis no valor $x_{ij} = 0$ cada vez que adicionamos um circuito no sistema;

- Desenvolver um software próprio baseado no método de pontos interiores para resolver os problemas de PNL da fase construtiva e abandonar o ambiente AMPL. Essa implementação deve diminuir de forma significativa o tempo de processamento;
- Desenvolver um software próprio de fluxo de carga radial para resolver problemas de fluxo de carga radial na fase de melhoria local. Essa proposta também deve diminuir de forma significativa o tempo de processamento;
- Implementar a estratégia de *path relinking* na fase de melhoria local;
- Estender a proposta para o problema de reconfiguração considerando vários níveis de demanda;
- Estender a proposta para o problema de reconfiguração considerando o modelo de carga trifásica desequilibrada.

REFERÊNCIAS

- ABUR, A. Determining the optimal radial network topology within the line flow constrains. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CIRCUITS AND SYSTEMS - ISCAS, 2., 1996, Atlanta. **Anais...** New York: IEEE, 1996a. p. 673-676.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANNEL. Módulo 8 - qualidade da energia elétrica. In: _____. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST**. Brasília, DF: ANNEL, 2012. p. 1 – 71.
- AMASIFEN, J. C. C.; ROMERO, R; MANTOVANI, J. R. S. Algoritmo evolutivo dedicado a reconfiguração de redes radiais de distribuição de energia elétrica sob demandas variáveis. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA – CBA, 15., 2004, Gramado. **Anais...** Gramado: CBA, 2004. v. 1, p. 1-6.
- 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.
- BERNAL-AGUSTIN, J. L. **Application og genetic algorithms to the optimal design of power distribution systems**. 1998. 346 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – University of Zaragoza, Zaragoza, 1998.
- 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 Reconfigurações 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.
- BYRD, R. H.; NOCEDAL, J. E; WALTZ, R. A. KNITRO: an integrated package for nonlinear optimization. In: DI PILLO, G.; ROMA, M. (Ed.). **Large-scale nonlinear optimization**. Berlin: Springer 2006. p. 35–59.

CABEZAS, A. M. G. **Novas formulações para o problema de reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica**. 2007. 77 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, 2007.

CARREÑO, E. M.; MOREIRA, N.; ROMERO, R. Distribution network reconfiguration using an efficient evolutionary algorithm. In: IEEE Power Engineering Society General Meeting – IEEE-PES-GM, 2. 2007, New York. **Anais...** New York: IEEE-PES-GM, 2007. v. 1, p. 24-28.

CARREÑO, E. M.; 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.

CAVELLUCI, C. **Buscas informadas baseadas em grafos para a minimização das perdas em sistemas de distribuição de energia elétrica**. 1998. 139 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade de Campinas, Campinas, 1998.

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. M. Optimal network reconfigurations in distribution systems: Part 2: Solution algorithms and Numerical Results. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Toronto, v. 5, n. 3, p. 1568-1574, 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.

DELBEM, A. C. B. **Restabelecimento de energia em sistemas de distribuição por algoritmo evolucionário associado a cadeias de grafos**. 2002. 114 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – USP, São Carlos, 2002.

DORIGO, M.; MANIEZZO, V.; COLORNI, A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. **IEEE Transactions on Systems, Cybernetics**, New York, v. 26, n. 1, p. 29-41, 1996. part B.

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.

FOURER, R. GAY, D. M. E KERNIGHAN, B. W. **AMPL: a modeling language for mathematical programming**. 2nd ed. Pacific Grove: Brooks/Cole-Thomson Learning, 2003.

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.; KOCHENBERGER, G. **Handbook of metaheuristics**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003. 570 p.

GOMES, F. V.; CARNEIRO, S.; PEREIRA, J. L. R.; VINAGRE, M. P.; GARCIA, P. A. N. ; ARAUJO, L. R. 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. **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. **Plataforma integrada para o planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando Metaheurísticas**. 2009. 166 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

HAYASHI, Y.; IWAMOTO, S.; FURUYA, S.; LIU, C.C. 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.

HAYKIN, S. **Neural networks: a comprehensive foundation**. 2. ed. New Jersey: Prentice-Hall, 1994. 842 p.

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

KIRKPATRICK, S.; GELATT, C.; VECCHI, M. Optimization by simulated annealing. **Science**. New York, v. 220, n. 4598, p. 621-630, 1983.

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.

LAVORATO, M.; FRANCO, J. F.; RIDER, M. J.; ROMERO, R. Imposing Radiality Constraints in Distribution System Optimization Problems, **IEEE Transaction on Power Systems**, New York, v. 27, n. 1, p. 172-180, 2012.

MENDONZA, J. LOPEZ, R.; MORALES, D.; LOPEZ, E.; DESSANTE, P.; MORAGA, R. Minimal loss reconfiguration using genetic algorithms with restricted population and address. **IEEE transaction on Power Systems**, New York, v. 21, n. 2, p. 948-954, may 2006.

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

NARA, K.; SHIOSE, A; KITAGAWA, M; ISHIHARA, T. 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.

OLIVEIRA, M. B. C. **Reconfiguração de alimentadores em sistemas de distribuição usando a metaheurística GRASP**. 2011. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP, Ilha Solteira, 2011.

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

RADHA, B.; KING, R. T. F.; RUGHOPUTH, C. S. A modified genetic algorithm for optimal electrical distribution network reconfiguration. In: CONGRESS EVOLUTIONARY COMPUTATION – CEC, 3., 2003, Canberra. **Proceedings...** Canberra: CEC, 2003. p. 1472-1479.

ROMERO R. Reconfiguração de alimentadores em sistemas de distribuição de energia elétrica usando um algoritmo genético modificado. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL - SBPO, 33., 2001, Campos do Jordão. **Anais...** Campos do Jordão: SBPO, 2001. v. 1, p. 551-560.

ROMERO, R.; LAVORATO, M. Metaheurísticas em sistemas elétricos de potência: introdução ao estudo e aplicações. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – SBSE, 4., 2012, Goiânia. **Anais...** Goiânia: SBSE, 2012. p. 1-52. Minicurso.

RUGTAICHAROENCHEEP, N.; SIRISUMRANNUKUL, S. Feeder reconfiguration for loss reduction in three phase distribution system under unbalanced loading conditions. In: UNIVERSITIES POWER ENGINEERING CONFERENCE - UPEC, 45., 2010, Cardiff. **Proceedings...** Cardiff: UPEC, 2010. p. 1-6.

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.

SHIRMOHAMMADI, 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.

SOUZA, R. F. F. **Planejamento da expansão de sistemas de distribuição usando a metaheurística de busca em vizinhança variável**. 2011. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, Ilha Solteira, 2011.

TAYLOR, J. A.; HOVER, F. S. Convex models of distribution system reconfiguration. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 27, n. 3, p. 1407-1413, 2012.

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.

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.

ZIMMERMAN, R. D. **Network reconfiguration for loss reduction in three-phase power distribution systems**. 1992, 120 f. Dissertation (Mestrado em Engenharia Elétrica)- Cornell University, New York, 1992.

ZVIETCOVICH, W. G. C. **Reconfiguração de sistemas de energia elétrica utilizando a metaheurística busca em vizinhança variável**. 2006. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, Ilha Solteira, 2006.

APÊNDICE A - PUBLICAÇÕES

De acordo com as exigências do Regulamento do PPGEE (Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica) da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP o aluno do Mestrado deverá ao mínimo ter submetido um artigo completo relacionado com a pesquisa da dissertação, em periódicos, congressos ou eventos similares que possuem corpo técnico de revisores de competência reconhecida pela comunidade científica para realizar a defesa da dissertação. Assim sendo, neste Apêndice são apresentados os artigos completos que foram publicados e se relacionam com a pesquisa de mestrado:

1. SOUZA, S. S. F.; LAVORATO, M.; ROMERO, R. GRASP especializado aplicado ao problema de reconfiguração de sistemas de distribuição. In: IEEE PES Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (T&D-LA), 6, 2012, Montevideo. **Anais...** Montevideo: Renewable Energies in a Developing Continent, 2012. v. 1, p. 1-6.

Em paralelo com a pesquisa de mestrado foram desenvolvidos outros trabalhos que não se relacionam com a pesquisa de mestrado, estes artigos são relacionados a temas das disciplinas cursadas durante o curso. A seguir apresentam-se os artigos publicados.

2. SOUZA, S. S. F.; LIMA, F. P. A.; ROMERO, R.; MINUSSI, C. R. Analisando as técnicas de solução por quadros e o método simplex quando empregados na resolução do problema de transporte de uma indústria de pneus. **Revista CIPPUS - UNILASALLE**, Canoas, v. 1, n. 2, p. 1-24, 2012.
3. LIMA, F. P. A.; SOUZA, S. S. F.; MINUSSI, C. R.; ROMERO, R. Compressão de Imagens Digitais com o uso de Redes Neurais Multicamadas e o Algoritmo *Backpropagation*. **Revista Universitas – Revista do Centro Universitário Católico Salesiano Auxilium**, Araçatuba, v.5, n. 5, p. 1-15, 2012.
4. SOUZA, S. S. F.; LIMA, F. P. A.; ROMERO, R.; MINUSSI, C. R. Resolução de problemas de programação não linear com métodos unidimensionais irrestritos. **Revista Omnia Exatas**, Adamantina, v. 4, n. 1, p. 58-72, 2011.
5. SOUZA, S. S. F.; LIMA, F. P. A.; ROMERO, R.; MINUSSI, C. R. Programação linear: uma solução alternativa para o problema de transporte. **Revista Omnia Exatas**, Adamantina, v. 4, n. 2, p. 63-76, 2011.

6. LIMA, F. P. A.; SOUZA, S. S. F.; MINUSSI, C. R.; ROMERO, R. Compressão de imagens digitais com o uso de redes neurais artificiais. **Revista Omnia Exatas**, Adamantina, v. 4, n. 2, p. 26-35, 2011.
7. SOUZA, S. S. F.; LIMA, F. P. A.; ROMERO, R.; MINUSSI, C. R. Resolução de problemas de programação não linear com métodos unidimensionais irrestritos. In: CONGRESSO DE PESQUISA CIENTIFICA DAS FACULDADES ADAMANTINENSES INTEGRADAS- CPCFAI, 1., 2011, Adamantina. **Anais...** Adamantina: CPCFAI, 2011. v. 15, p. 1-14.
8. SOUZA, S. S. F.; LIMA, F. P. A.; ROMERO, R.; MINUSSI, C. R. Programação linear: uma solução alternativa para o problema de transporte. In: CONGRESSO DE PESQUISA CIENTIFICA DAS FACULDADES ADAMANTINENSES INTEGRADAS-CPCAI, 1., 2011, Adamantina. **Anais...** Adamantina: CPCFAI, 2011. v. 15, p. 1-13.
9. LIMA, F. P. A.; SOUZA, S. S. F.; MINUSSI, C. R.; ROMERO, R. Compressão de imagens digitais com o uso de redes neurais artificiais. In: CONGRESSO DE PESQUISA CIENTIFICA DAS FACULDADES ADAMANTINENSES INTEGRADAS- CPCFAI, 1., 2011, Adamantina. **Anais...** Adamantina: CPCFAI, 2011. v. 15, p. 1-9.

Os artigos 7, 8 e 9 listados acima foram apresentados no CPCFAI e receberam uma premiação de destaque entre os 5 melhores trabalhos na área de exatas apresentados no evento, portanto foram selecionados para publicação na revista Omnia Exatas, gerando as publicações 4, 5 e 6.

ANEXO A - DADOS DOS SISTEMAS TESTES

A.1 Sistema de 14 Barras

Ramo	De	Para	Resistência do Ramo (PU)	Reatância do Ramo (PU)	Potência Ativa Demanda (KW)	Potência Reativa Demanda (KVar)
1	14	13	0,075	0,1	0,0	0,0
2	13	12	0,08	0,11	2000,0	1600,0
3	13	11	0,09	0,18	3000,0	400,0
4	11	10	0,04	0,04	2000,0	-400,0
5	14	9	0,11	0,11	1500,0	1200,0
6	9	8	0,08	0,11	4000,0	2700,0
7	9	7	0,11	0,11	5000,0	1800,0
8	8	6	0,11	0,11	1000,0	900,0
9	8	5	0,08	0,11	600,0	-500,0
10	14	4	0,11	0,11	4500,0	-1700,0
11	4	3	0,09	0,12	1000,0	900,0
12	4	2	0,08	0,11	1000,2	-1100,0
13	2	1	0,04	0,04	1000,0	900,0
14	12	6	0,04	0,04	2100,0	-800,0
15	7	3	0,04	0,04		
16	10	1	0,09	0,12		

Valor base da tensão: 23,00 kV.

Valor base da potência: 100000 W.

A.2 Sistema de 33 Barras

Ramo	De	Para	Resistência do Ramo (Ω)	Reatância do Ramo (Ω)	Potência Ativa Demanda (KW)	Potência Reativa Demanda (KVar)
1	1	2	0,0922	0,047	0	0
2	2	3	0,493	0,2511	100	60
3	3	4	0,366	0,1864	90	40
4	4	5	0,3811	0,1941	120	80
5	5	6	0,819	0,707	60	30
6	6	7	0,1872	0,6188	60	20
7	7	8	0,7114	0,2351	200	100
8	8	9	1,03	0,74	200	100
9	9	10	1,044	0,74	60	20
10	10	11	0,1966	0,065	60	20
11	11	12	0,3744	0,1238	45	30
12	12	13	1,468	1,155	60	35
13	13	14	0,5416	0,7129	60	35
14	14	15	0,591	0,526	120	80
15	15	16	0,7463	0,545	60	10
16	16	17	1,289	1,721	60	20
17	17	18	0,732	0,574	60	20
18	2	19	0,164	0,1565	90	40
19	19	20	15,042	13,554	90	40
20	20	21	0,4095	0,4784	90	40
21	21	22	0,7089	0,9373	90	40
22	3	23	0,4512	0,3083	90	40
23	23	24	0,898	0,7091	90	50
24	24	25	0,896	0,7011	420	200
25	6	26	0,203	0,1034	420	200
26	26	27	0,2842	0,1447	60	25
27	27	28	1,059	0,9337	60	25
28	28	29	0,8042	0,7006	60	20
29	29	30	0,5075	0,2585	120	70
30	30	31	0,9744	0,963	200	600
31	31	32	0,3105	0,3619	150	70
32	32	33	0,341	0,5302	210	100
33	8	21	2	2	60	40
34	9	15	2	2		
35	12	22	2	2		
36	18	33	0,5	0,5		
37	25	29	0,5	0,5		

A.3 Sistema de 70 Barras

Ramo	De	Para	Resistência do Ramo (Ω)	Reatância do Ramo (Ω)	Potência Ativa Demanda (KW)	Potência Reativa Demanda (KVar)
1	1	2	0,0005	0,0012	0	0
2	2	3	0,0005	0,0012	0	0
3	3	4	0,0001	0,0001	0	0
4	4	5	0,0015	0,0036	0	0
5	5	6	0,0251	0,0294	0	0
6	6	7	0,366	0,1864	0	0
7	7	8	0,3811	0,1941	0,878	0,72
8	8	9	0,0922	0,047	13,455	0,72
9	9	10	0,0493	0,0251	24,887	17,81
10	10	11	0,819	0,2707	10	7,208
11	11	12	0,1872	0,0619	9,333	6,666
12	12	13	0,7114	0,2351	48,5	34,609
13	13	14	1,03	0,34	48,5	34,609
14	14	15	1,044	0,345	2,71	1,821
15	15	16	1,058	0,3496	2,71	1,521
16	16	17	0,1966	0,065	0	0
17	17	18	0,3744	0,1238	15,176	10,198
18	18	19	0,0047	0,0016	16,5	11,775
19	19	20	0,3276	0,1083	16,5	11,775
20	20	21	0,2106	0,0696	0	0
21	21	22	0,3416	0,1129	0,316	0,212
22	22	23	0,014	0,0046	37,983	27,1
23	23	24	0,1591	0,0526	1,762	1,184
24	24	25	0,3463	0,1145	0	0
25	25	26	0,7488	0,2475	9,39	6,67
26	26	27	0,3089	0,1021	0	0
27	27	28	0,1732	0,0572	4,667	3,33
28	3	29	0,0044	0,0108	4,667	33,301
29	29	30	0,064	0,1565	8,667	6,185
30	30	31	0,3978	0,1315	8,667	6,185
31	31	32	0,0702	0,0232	0	0
32	32	33	0,351	0,116	0	0
33	33	34	0,839	0,2816	0	0
34	34	35	1,708	0,5646	4,582	3,26
35	35	36	1,474	0,4873	6,501	5,549
36	4	37	0,0044	0,0108	1,92	1,29
37	37	38	0,064	0,1565	8,667	6,185
38	38	39	0,1053	0,123	8,667	6,185
39	39	40	0,0304	0,0355	0	0

Continua ...

Ramo	De	Para	Resistência do Ramo (Ω)	Reatância do Ramo (Ω)	Potência Ativa Demanda (KW)	Potência Reativa Demanda (KVar)
40	40	41	0,0018	0,0021	8	5,709
41	41	42	0,7283	0,8509	8	5,709
42	42	43	0,31	0,3623	0,392	0,325
43	43	44	0,041	0,0478	0	0
44	44	45	0,0092	0,0116	2	1,427
45	45	46	0,1089	0,1373	0	0
46	46	47	0,0009	0,0012	3,076	8,787
47	5	48	0,0034	0,0084	3,076	8,787
48	48	49	0,0851	0,2083	0	0
49	49	50	0,2898	0,7091	26,35	18,8
50	50	51	0,0822	0,2011	28,226	91,492
51	9	52	0,0928	0,0473	128,226	91,492
52	52	53	0,3319	0,1114	13,512	9,442
53	10	54	0,174	0,0886	1,202	0,894
54	54	55	0,203	0,1034	1,449	1,162
55	55	56	0,2842	0,1447	8,787	6,322
56	56	57	0,2813	0,1433	8	7,708
57	57	58	1,59	0,5337	0	0
58	58	59	0,7837	0,263	0	0
59	59	60	0,3042	0,1006	0	0
60	60	61	0,3861	0,1172	0,667	24,025
61	61	62	0,5075	0,2555	0	0
62	62	63	0,974	0,0496	414,667	295,91
63	63	64	0,145	0,0738	10,667	7,612
64	64	65	0,7105	0,3619	0	0
65	65	66	1,041	0,5302	75,67	53,873
66	12	67	0,2012	0,0611	19,67	13,912
67	67	68	0,0047	0,0017	6	4,282
68	13	69	0,7394	0,2444	6	4,282
69	69	70	0,0047	0,0016	9,333	6,66
70	12	44	0,5	0,5	9,333	66,604
71	14	22	0,5	0,5		
72	16	47	1,0	1,0		
73	51	60	2,0	2,0		
74	28	66	1,0	1,0		

A.4 Sistema de 84 Barras

Ramo	De	Para	Resistência do Ramo (Ω)	Reatância do Ramo (Ω)	Potência Ativa Demanda (KW)	Potência Reativa Demanda (KVar)
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	1,000
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	1,800	1,300
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

Continua ...

Ramo	De	Para	Resistência do Ramo (Ω)	Reatância do Ramo (Ω)	Potência Ativa Demanda (KW)	Potência Reativa Demanda (KVar)
40	39	40	0,2096	0,4304	20	10
41	38	41	0,1965	0,4035	20	10
42	41	42	0,2096	0,4304	200	160
43	0	43	0,0486	0,1656	50	30
44	43	44	0,0393	0,0807	0	0
45	44	45	0,131	0,269	30	20
46	45	46	0,2358	0,4842	800	700
47	0	47	0,243	0,828	200	150
48	47	48	0,0655	0,1345	0	0
49	48	49	0,0655	0,1345	0	0
50	49	50	0,0393	0,0807	0	0
51	50	51	0,0786	0,1614	200	160
52	51	52	0,0393	0,0807	800	600
53	52	53	0,0786	0,1614	500	300
54	53	54	0,0524	0,1076	500	350
55	54	55	0,131	0,269	500	300
56	0	56	0,2268	0,7728	200	80
57	56	57	0,5371	11,029	0	0
58	57	58	0,0524	0,1076	30	20
59	58	59	0,0405	0,138	600	420
60	59	60	0,0393	0,0807	0	0
61	60	61	0,0262	0,0538	20	10
62	61	62	0,1048	0,2152	20	10
63	62	63	0,2358	0,4842	200	130
64	63	64	0,0243	0,0828	300	240
65	0	65	0,0486	0,1656	300	200
66	65	66	0,1703	0,3497	0	0
67	66	67	0,1215	0,414	50	30
68	67	68	0,2187	0,7452	0	0
69	68	69	0,0486	0,1656	400	360
70	69	70	0,0729	0,2484	0	0
71	70	71	0,0567	0,1932	0	0
72	71	72	0,0262	0,0528	2000	1500
73	0	73	0,324	1,104	200	150
74	73	74	0,0324	0,1104	0	0
75	74	75	0,0567	0,1932	0	0
76	75	76	0,0486	0,1656	1200	950
77	0	77	0,2511	0,8556	300	180
78	77	78	0,1296	0,4416	0	0
79	78	79	0,0486	0,1656	400	360
80	79	80	0,131	0,264	2000	1300

Continua ...

Ramo	De	Para	Resistência do Ramo (Ω)	Reatância do Ramo (Ω)	Potência Ativa Demanda (KW)	Potência Reativa Demanda (KVar)
81	80	81	0,131	0,264	200	140
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		

A.5 Sistema de 119 Barras

Ramo	De	Para	Resistência do Ramo (Ω)	Reatância do Ramo (Ω)	Potência Ativa Demanda (KW)	Potência Reativa Demanda (KVar)
1	0	1	0	0,0001	0	0
2	1	2	0,036	0,01296	0	0
3	2	3	0,033	0,01188	133,84	101,14
4	2	4	0,045	0,0162	16,214	11,292
5	4	5	0,015	0,054	34,315	21,845
6	5	6	0,015	0,054	73,016	63,602
7	6	7	0,015	0,0125	144,2	68,604
8	7	8	0,018	0,014	104,47	61,725
9	8	9	0,021	0,063	28,547	11,503
10	2	10	0,166	0,1344	87,56	51,073
11	10	11	0,112	0,0789	198,2	106,77
12	11	12	0,187	0,313	146,8	75,995
13	12	13	0,142	0,1512	26,04	18,687
14	13	14	0,18	0,118	52,1	23,22
15	14	15	0,15	0,045	141,9	117,5
16	15	16	0,16	0,18	21,87	28,79
17	16	17	0,157	0,171	33,37	26,45
18	11	18	0,218	0,285	32,43	25,23
19	18	19	0,118	0,185	20,234	11,906
20	19	20	0,16	0,196	156,94	78,523
21	20	21	0,12	0,189	546,29	351,4
22	21	22	0,12	0,0789	180,31	164,2
23	22	23	1,41	0,723	93,167	54,594
24	23	24	0,293	0,1348	85,18	39,65
25	24	25	0,133	0,104	168,1	95,178
26	25	26	0,178	0,134	125,11	150,22
27	26	27	0,178	0,134	16,03	24,62
28	4	28	0,015	0,0296	26,03	24,62
29	28	29	0,012	0,0276	594,56	522,62
30	29	30	0,12	0,2766	120,62	59,117
31	30	31	0,21	0,243	102,38	99,554
32	31	32	0,12	0,054	513,4	318,5
33	32	33	0,178	0,234	475,25	456,14
34	33	34	0,178	0,234	151,43	136,79
35	34	35	0,154	0,162	205,38	83,302
36	30	36	0,187	0,261	131,6	93,082
37	36	37	0,133	0,099	448,4	369,79
38	29	38	0,33	0,194	440,52	321,64
39	38	39	0,31	0,194	112,54	55,134

Continua ...

Ramo	De	Para	Resistência do Ramo (Ω)	Reatância do Ramo (Ω)	Potência Ativa Demanda (KW)	Potência Reativa Demanda (KVar)
40	39	40	0,13	0,194	53,963	38,998
41	40	41	0,28	0,15	393,05	342,6
42	41	42	1,18	0,85	326,74	278,56
43	42	43	0,42	0,2436	536,26	240,24
44	43	44	0,27	0,0972	76,247	66,562
45	44	45	0,339	0,1221	53,52	39,76
46	45	46	0,27	0,1779	40,328	31,964
47	35	47	0,21	0,1383	39,653	20,758
48	47	48	0,12	0,0789	66,195	42,361
49	48	49	0,15	0,0987	73,904	51,653
50	49	50	0,15	0,0987	114,77	57,965
51	50	51	0,24	0,1581	918,37	1205,1
52	51	52	0,12	0,0789	210,3	146,66
53	52	53	0,405	0,1458	66,68	56,608
54	52	54	0,405	0,1458	42,207	40,184
55	29	55	0,391	0,141	433,74	283,41
56	55	56	0,406	0,1461	62,1	26,86
57	56	57	0,406	0,1461	92,46	88,38
58	57	58	0,706	0,5461	85,188	55,436
59	58	59	0,338	0,1218	345,3	332,4
60	59	60	0,338	0,1218	22,5	16,83
61	60	61	0,207	0,0747	80,551	49,156
62	61	62	0,247	0,8922	95,86	90,758
63	1	63	0,028	0,0418	62,92	47,7
64	63	64	0,117	0,2016	478,8	463,74
65	64	65	0,255	0,0918	120,94	52,006
66	65	66	0,21	0,0759	139,11	100,34
67	66	67	0,383	0,138	391,78	193,5
68	67	68	0,504	0,3303	27,741	26,713
69	68	69	0,406	0,1461	52,814	25,257
70	69	70	0,962	0,761	66,89	38,713
71	70	71	0,165	0,06	467,5	395,14
72	71	72	0,303	0,1092	594,85	239,74
73	72	73	0,303	0,1092	132,5	84,363
74	73	74	0,206	0,144	52,699	22,482
75	74	75	0,233	0,084	869,79	614,775
76	75	76	0,591	0,1773	31,349	29,817
77	76	77	0,126	0,0453	192,39	122,43
78	64	78	0,559	0,3687	65,75	45,37
79	78	79	0,186	0,1227	238,15	223,22
80	79	80	0,186	0,1227	294,55	162,47

Continua ...

Ramo	De	Para	Resistência do Ramo (Ω)	Reatância do Ramo (Ω)	Potência Ativa Demanda (KW)	Potência Reativa Demanda (KVar)
81	80	81	0,26	0,139	485,57	437,92
82	81	82	0,154	0,148	243,53	183,03
83	82	83	0,23	0,128	243,53	183,03
84	83	84	0,252	0,106	134,25	119,29
85	84	85	0,18	0,148	22,71	27,96
86	79	86	0,16	0,182	49,513	26,515
87	86	87	0,2	0,23	383,78	257,16
88	87	88	0,16	0,393	49,64	20,6
89	65	89	0,669	0,2412	22,473	11,806
90	89	90	0,266	0,1227	62,93	42,96
91	90	91	0,266	0,1227	30,67	34,93
92	91	92	0,266	0,1227	62,53	66,79
93	92	93	0,266	0,1227	114,57	81,748
94	93	94	0,233	0,115	81,292	66,526
95	94	95	0,496	0,138	31,733	15,96
96	91	96	0,196	0,18	33,32	60,48
97	96	97	0,196	0,18	531,28	224,85
98	97	98	0,1866	0,122	507,03	367,42
99	98	99	0,0746	0,318	26,39	11,7
100	1	100	0,0625	0,0265	45,99	30,392
101	100	101	0,1501	0,234	100,66	47,572
102	101	102	0,1347	0,0888	456,48	350,3
103	102	103	0,2307	0,1203	522,56	449,29
104	103	104	0,447	0,1608	408,43	168,46
105	104	105	0,1632	0,0588	141,48	134,25
106	105	106	0,33	0,099	104,43	66,024
107	106	107	0,156	0,0561	96,793	83,647
108	107	108	0,3819	0,1374	493,92	419,34
109	108	109	0,1626	0,0585	225,38	135,88
110	109	110	0,3819	0,1374	509,21	387,21
111	110	111	0,2445	0,0879	188,5	173,46
112	110	112	0,2088	0,0753	918,03	898,55
113	112	113	0,2301	0,0828	305,08	215,37
114	100	114	0,6102	0,2196	54,38	40,97
115	114	115	0,1866	0,127	211,14	192,9
116	115	116	0,3732	0,246	67,009	53,336
117	116	117	0,405	0,367	162,07	90,321
118	117	118	0,489	0,438	48,785	29,156
119	46	27	0,5258	0,2925	33,9	18,98
120	17	27	0,5258	0,2916		
121	8	24	0,4272	0,1539		

Continua ...

Ramo	De	Para	Resistência do Ramo (Ω)	Reatância do Ramo (Ω)	Potência Ativa Demanda (KW)	Potência Reativa Demanda (KVar)
122	54	43	0,48	0,1728		
123	62	54	0,36	0,1296		
124	37	62	0,57	0,572		
125	9	40	0,53	0,3348		
126	58	96	0,3957	0,1425		
127	73	91	0,68	0,648		
128	88	75	0,4062	0,1464		
129	99	77	0,4626	0,1674		
130	108	83	0,651	0,234		
131	105	86	0,8125	0,2925		
132	110	118	0,7089	0,2553		
133	25	35	0,5	0,5		

A.6 Sistema de 136 Barras

Ramo	De	Para	Resistência do Ramo (Ω)	Reatância do Ramo (Ω)	Potência Ativa Demanda (KW)	Potência Reativa Demanda (KVar)
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

Continua ...

Ramo	De	Para	Resistência do Ramo (Ω)	Reatância do Ramo (Ω)	Potência Ativa Demanda (KW)	Potência Reativa Demanda (KVar)
40	39	40	0,11819	0,27283	0,0	0,0
41	40	41	296,288	101,628	1,254	0,531
42	40	42	0,00188	0,00433	6,274	2,660
43	42	43	0,06941	0,16024	0,0	0,0
44	43	44	0,81502	0,42872	117,880	49,971
45	43	45	0,06378	0,14724	62,668	26,566
46	45	46	0,13132	0,30315	172,285	73,034
47	46	47	0,06191	0,14291	458,556	194,388
48	47	48	0,11444	0,26417	262,962	111,473
49	48	49	0,28374	0,28331	235,761	99,942
50	49	50	0,28374	0,28331	0,0	0,0
51	48	51	0,04502	0,10394	109,215	46,298
52	51	52	0,02626	0,06063	0,0	0,0
53	52	53	0,06003	0,13858	72,809	30,865
54	53	54	0,03002	0,06929	258,473	109,570
55	54	55	0,02064	0,04764	69,169	29,322
56	52	56	0,10881	0,25118	21,843	9,260
57	56	57	0,25588	0,13460	0,0	0,0
58	57	58	0,41699	0,21934	20,527	8,702
59	58	59	0,50228	0,26421	150,548	63,819
60	59	60	0,33170	0,17448	220,687	93,552
61	60	61	0,20849	0,10967	92,384	39,163
62	47	62	0,13882	0,32047	0,0	0,0
63	0	63	0,00750	0,01732	226,693	96,098
64	63	64	0,27014	0,62362	0,0	0,0
65	64	65	0,38270	0,88346	294,016	116,974
66	65	66	0,33018	0,76220	83,015	33,028
67	66	67	0,32830	0,75787	83,015	33,028
68	67	68	0,17072	0,39409	103,770	41,285
69	68	69	0,55914	0,29412	176,408	70,184
70	68	70	0,05816	0,13425	83,015	33,028
71	70	71	0,70130	0,36890	217,917	86,698
72	71	72	102,352	0,53839	23,294	9,267
73	70	73	0,06754	0,15591	5,075	2,019
74	73	74	132,352	0,45397	72,638	28,899
75	0	75	0,01126	0,02598	405,990	1,615,235
76	75	76	0,72976	168,464	0,0	0,0
77	76	77	0,22512	0,51968	100,182	42,468
78	77	78	0,20824	0,48071	142,523	60,417
79	78	79	0,04690	0,10827	96,042	40,713
80	79	80	0,61950	0,61857	300,454	127,366

Continua ...

Ramo	De	Para	Resistência do Ramo (Ω)	Reatância do Ramo (Ω)	Potência Ativa Demanda (KW)	Potência Reativa Demanda (KVar)
81	80	81	0,34049	0,33998	141,238	59,873
82	81	82	0,56862	0,29911	279,847	118,631
83	81	83	0,10877	0,10860	87,312	37,013
84	83	84	0,56862	0,29911	243,849	103,371
85	0	85	0,01126	0,02598	247,750	105,025
86	85	86	0,41835	0,96575	0,0	0,0
87	86	87	0,10499	0,13641	89,878	38,101
88	86	88	0,43898	101,338	1,137,280	482,108
89	88	89	0,07520	0,02579	458,339	194,296
90	89	90	0,07692	0,17756	385,197	163,290
91	90	91	0,33205	0,76653	0,0	0,0
92	91	92	0,08442	0,19488	79,608	33,747
93	92	93	0,13320	0,30748	87,312	37,013
94	93	94	0,29320	0,29276	0,0	0,0
95	94	95	0,21753	0,21721	74,001	31,370
96	95	96	0,26482	0,26443	232,050	98,369
97	93	97	0,10318	0,23819	141,819	60,119
98	97	98	0,13507	0,31181	0,0	0,0
99	0	99	0,00938	0,02165	76,449	32,408
100	99	100	0,16884	0,38976	0,0	0,0
101	100	101	0,11819	0,27283	51,322	21,756
102	101	102	228,608	0,78414	59,874	25,381
103	101	103	0,45587	105,236	9,065	3,843
104	103	104	0,69600	160,669	2,092	0,887
105	104	105	0,45774	105,669	16,735	7,094
106	105	106	0,20298	0,26373	1,506,522	638,634
107	106	107	0,21348	0,27737	313,023	132,694
108	107	108	0,54967	0,28914	79,831	33,842
109	108	109	0,54019	0,28415	51,322	21,756
110	107	110	0,04550	0,05911	0,0	0,0
111	110	111	0,47385	0,24926	202,435	85,815
112	111	112	0,86241	0,45364	60,823	25,784
113	112	113	0,56862	0,29911	45,618	19,338
114	108	114	0,77711	0,40878	0,0	0,0
115	114	115	108,038	0,56830	157,070	66,584
116	109	116	109,933	0,57827	0,0	0,0
117	116	117	0,47385	0,24926	250,148	106,041
118	104	118	0,32267	0,74488	0,0	0,0
119	118	119	0,14633	0,33779	69,809	29,593
120	119	120	0,12382	0,28583	32,072	13,596
121	0	121	0,01126	0,02598	61,084	25,894

Continua ...

Ramo	De	Para	Resistência do Ramo (Ω)	Reatância do Ramo (Ω)	Potência Ativa Demanda (KW)	Potência Reativa Demanda (KVar)
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		

A.7 Sistema de 417 Barras

Ramo	De	Para	Resistência do Ramo (Ω)	Reatância do Ramo (Ω)	Potência Ativa Demanda (KW)	Potência Reativa Demanda (KVar)
1	383	67	0,0310675	0,02142	0,1	0
2	88	66	0,1078225	0,07434	0,1	0
3	224	223	0,069445	0,04788	122	59
4	20	71	0,193715	0,13356	0,1	0
5	65	383	0,0347225	0,02394	0,1	0
6	2	19	0,610385	0,42084	114	55
7	223	221	0,069445	0,04788	51	25
8	71	73	0,02193	0,01512	83	40
9	69	381	0,0310675	0,02142	0,1	0
10	19	50	0,08772	0,06048	122	59
11	221	220	0,08772	0,06048	122	59
12	75	71	0,054825	0,0378	77	37
13	381	65	0,032895	0,02268	0,1	0
14	50	51	0,069445	0,04788	68	33
15	220	219	0,084065	0,05796	71	34
16	74	80	0,084065	0,05796	0,1	0
17	58	69	0,0537285	0,037044	0,1	0
18	51	55	0,11696	0,08064	77	37
19	0	272	0,0142545	0,009828	30	14
20	80	75	0,0529975	0,03654	13	6
21	67	84	0,02924	0,02016	1	0
22	55	26	0,09503	0,06552	194	94
23	0	273	0,115498	0,079632	77	37
24	73	74	0,105995	0,07308	77	37
25	67	92	0,084065	0,05796	77	37
26	26	30	0,10234	0,07056	122	59
27	273	274	0,0836995	0,057708	104	51
28	71	72	0,098685	0,06804	0,1	0
29	59	57	0,010965	0,00756	77	37
30	30	39	0,105995	0,07308	243	118
31	274	208	0,139621	0,096264	77	37
32	72	79	0,0731	0,0504	77	37
33	64	70	0,0712725	0,04914	0,1	0
34	39	46	0,091375	0,063	121	58
35	274	275	0,1158635	0,079884	194	94
36	72	76	0,076755	0,05292	122	59
37	68	64	0,0310675	0,02142	77	37
38	50	53	0,054825	0,0378	0,1	0
39	275	263	0,1151325	0,07938	0,1	0

Continua ...

Ramo	De	Para	Resistência do Ramo (Ω)	Reatância do Ramo (Ω)	Potência Ativa Demanda (KW)	Potência Reativa Demanda (KVar)
40	76	77	0,05117	0,03528	96	47
41	58	68	0,021199	0,014616	122	59
42	53	23	0,0731	0,0504	70	34
43	262	263	0,068714	0,047376	58	28
44	78	82	0,24123	0,16632	0,1	0
45	62	60	0,10965	0,0756	122	59
46	23	28	0,09503	0,06552	122	59
47	261	262	0,0630936	0,0532656	122	59
48	81	79	0,0731	0,0504	86	42
49	70	62	0,022661	0,015624	77	37
50	28	33	0,1151325	0,07938	0,1	0
51	260	261	0,037973	0,032058	122	59
52	77	78	0,02193	0,01512	122	59
53	60	59	0,04386	0,03024	122	59
54	33	46	0,1736125	0,1197	0,1	0
55	258	260	0,0511175	0,043155	42	20
56	82	89	0,1209805	0,083412	122	59
57	57	61	0,129387	0,089208	13	6
58	46	20	0,084065	0,05796	77	37
59	256	258	0,068714	0,047376	50	24
60	76	58	0,38743	0,26712	0,1	0
61	63	66	0,0449565	0,030996	60	29
62	19	43	0,01462	0,01008	71	34
63	371	238	0,0265811	0,0224406	122	59
64	122	0	0,013524	0,015953	77	37
65	66	67	0,086258	0,059472	95	46
66	43	24	0,127925	0,0882	121	58
67	263	264	0,072369	0,049896	77	37
68	119	93	0,2538284	0,2584552	103	50
69	61	63	0,0603075	0,04158	52	25
70	24	34	0,127925	0,0882	57	27
71	368	346	0,13158	0,09072	171	83
72	119	122	0,294875	0,30025	121	58
73	57	19	0,59211	0,40824	39	19
74	34	37	0,08041	0,05544	119	58
75	368	369	0,208335	0,14364	49	24
76	113	114	0,047515	0,03276	0,1	0
77	0	91	0,388892	0,268128	50	24
78	37	40	0,1041675	0,07182	44	21
79	369	347	0,1187875	0,0819	82	40
80	114	111	0,040205	0,02772	132	64

Continua ...

Ramo	De	Para	Resistência do Ramo (Ω)	Reatância do Ramo (Ω)	Potência Ativa Demanda (KW)	Potência Reativa Demanda (KVar)
81	91	1	0,3410115	0,235116	194	94
82	40	42	0,11696	0,08064	0,1	0
83	382	250	0,010965	0,00756	122	59
84	93	112	0,032895	0,02268	3	1
85	91	86	0,0128524	0,0108504	52	25
86	42	47	0,08041	0,05544	103	50
87	382	369	0,018275	0,0126	21	10
88	112	113	0,076755	0,05292	21	10
89	1	16	0,08772	0,06048	21	10
90	47	49	0,0731	0,0504	5	3
91	207	276	0,067252	0,046368	0,1	0
92	105	94	0,084065	0,05796	0,1	0
93	5	6	0,040205	0,02772	21	10
94	19	32	0,06579	0,04536	18	9
95	276	277	0,032895	0,02268	122	59
96	94	111	0,032895	0,02268	116	56
97	6	2	0,051901	0,035784	7	3
98	83	32	0,0420325	0,02898	64	31
99	276	278	0,048246	0,033264	49	24
100	93	110	0,06579	0,04536	16	8
101	17	4	0,1224425	0,08442	77	37
102	27	35	0,091375	0,063	119	58
103	278	279	0,034357	0,023688	71	34
104	110	105	0,06579	0,04536	77	37
105	4	5	0,0493425	0,03402	194	94
106	35	44	0,13158	0,09072	122	59
107	279	280	0,062135	0,04284	55	27
108	118	120	0,0102235	0,008631	38	18
109	16	17	0,11696	0,08064	22	10
110	48	44	0,04386	0,03024	0,1	0
111	280	234	0,0493425	0,03402	77	37
112	93	118	0,056028	0,066091	122	59
113	1	13	0,0164475	0,01134	38	18
114	54	22	0,076755	0,05292	122	59
115	280	281	0,0537285	0,037044	27	13
116	117	83	0,040205	0,02772	64	31
117	7	8	0,09503	0,06552	0,1	0
118	22	27	0,069445	0,04788	0,1	0
119	234	233	0,083334	0,057456	0,1	0
120	118	121	0,05117	0,03528	0,1	0
121	8	2	0,01462	0,01008	79	38

Continua ...

Ramo	De	Para	Resistência do Ramo (Ω)	Reatância do Ramo (Ω)	Potência Ativa Demanda (KW)	Potência Reativa Demanda (KVar)
122	32	54	0,04386	0,03024	247	119
123	234	235	0,0420325	0,02898	0,1	0
124	121	117	0,201025	0,1386	0,1	0
125	15	18	0,157165	0,10836	0,1	0
126	20	49	0,03655	0,0252	0,1	0
127	207	235	0,076755	0,05292	0,1	0
128	103	104	0,049657	0,041922	0,1	0
129	18	7	0,02193	0,01512	77	37
130	31	43	0,25585	0,1764	122	59
131	231	348	0,075946	0,064116	62	30
132	83	103	0,0731	0,0504	105	51
133	13	15	0,098685	0,06804	122	59
134	36	31	0,105995	0,07308	77	37
135	348	206	0,032131	0,027126	77	37
136	104	107	0,06579	0,04536	0,1	0
137	1	12	0,032131	0,027126	85	41
138	41	36	0,0676175	0,04662	8	4
139	379	228	0,0411861	0,0347706	122	59
140	108	107	0,049657	0,041922	35	17
141	3	11	0,067183	0,056718	55	27
142	45	41	0,025585	0,01764	153	74
143	228	227	0,0630936	0,0532656	316	153
144	83	108	0,047515	0,03276	105	51
145	11	14	0,105156	0,088776	20	10
146	45	49	0,03655	0,0252	95	46
147	231	230	0,0968575	0,06678	38	18
148	109	83	0,04386	0,03024	83	40
149	14	10	0,1329055	0,112203	50	24
150	20	48	0,135235	0,09324	77	37
151	231	292	0,0749275	0,05166	122	59
152	102	109	0,076755	0,05292	102	49
153	12	3	0,0452755	0,038223	60	29
154	38	29	0,11696	0,08064	77	37
155	292	235	0,069445	0,04788	194	94
156	106	102	0,054825	0,0378	56	27
157	10	85	0,035052	0,029592	122	59
158	48	38	0,08772	0,06048	0,1	0
159	220	343	0,02924	0,02016	3	1
160	83	106	0,06579	0,04536	1	0
161	85	90	0,09503	0,06552	52	25
162	52	21	0,040205	0,02772	194	94

Continua ...

Ramo	De	Para	Resistência do Ramo (Ω)	Reatância do Ramo (Ω)	Potência Ativa Demanda (KW)	Potência Reativa Demanda (KVar)
163	303	305	0,069445	0,04788	10	5
164	96	115	0,04386	0,03024	128	62
165	9	10	0,046736	0,039456	16	8
166	29	25	0,054825	0,0378	37	18
167	377	376	0,1114775	0,07686	154	75
168	83	98	0,13158	0,09072	0,1	0
169	2	9	0,1078225	0,07434	0,1	0
170	25	52	0,1005125	0,0693	78	38
171	303	377	0,0588455	0,040572	0,1	0
172	100	95	0,105995	0,07308	27	13
173	9	87	0,1095375	0,092475	103	50
174	21	32	0,04386	0,03024	122	59
175	308	306	0,098685	0,06804	72	35
176	99	100	0,05848	0,04032	0,1	0
177	87	88	0,08041	0,05544	122	59
178	20	56	0,215645	0,14868	194	94
179	313	316	0,0815065	0,056196	0,1	0
180	101	99	0,054825	0,0378	77	37
181	98	101	0,05117	0,03528	82	40
182	186	166	0,084709	0,071514	53	26
183	313	317	0,072369	0,049896	122	59
184	137	193	0,0127925	0,00882	64	31
185	95	116	0,0785825	0,05418	86	42
186	166	174	0,090551	0,076446	82	40
187	300	304	0,04386	0,03024	0,1	0
188	154	150	0,069445	0,04788	167	81
189	116	96	0,040205	0,02772	0,1	0
190	174	180	0,084709	0,071514	0,1	0
191	309	314	0,061404	0,042336	131	64
192	125	123	0,02924	0,02016	21	10
193	97	93	0,040205	0,02772	21	10
194	159	179	0,04386	0,03024	21	10
195	309	304	0,082603	0,056952	21	10
196	0	350	0,22661	0,15624	0,1	0
197	115	97	0,062135	0,04284	0,1	0
198	179	176	0,054825	0,0378	0,1	0
199	128	345	0,261698	0,180432	0,1	0
200	0	349	0,22661	0,15624	0,1	0
201	56	146	0,157165	0,10836	52	25
202	168	161	0,076755	0,05292	202	98
203	89	369	0,157896	0,108864	202	98

Continua ...

Ramo	De	Para	Resistência do Ramo (Ω)	Reatância do Ramo (Ω)	Potência Ativa Demanda (KW)	Potência Reativa Demanda (KVar)
204	349	202	0,023392	0,016128	73	35
205	152	140	0,073025	0,06165	81	39
206	161	182	0,084065	0,05796	115	56
207	381	382	0,1502205	0,103572	118	57
208	350	378	0,023392	0,016128	318	154
209	146	141	0,105995	0,07308	161	78
210	182	181	0,032895	0,02268	126	61
211	65	251	0,192984	0,133056	59	29
212	202	203	0,0511175	0,043155	24	12
213	141	135	0,08041	0,05544	24	12
214	159	180	0,091375	0,063	5	2
215	383	242	0,227341	0,156744	126	61
216	203	204	0,062135	0,04284	56	27
217	131	152	0,08772	0,06048	62	30
218	180	177	0,05848	0,04032	0,1	0
219	84	243	0,1399865	0,096516	32	15
220	202	205	0,1034034	0,0872964	158	77
221	135	131	0,149855	0,10332	126	61
222	170	162	0,064262	0,054252	202	98
223	351	413	0,0705415	0,048636	41	20
224	378	379	0,1034034	0,0872964	81	39
225	56	148	0,069445	0,04788	126	61
226	162	183	0,075946	0,064116	202	98
227	413	384	0,0720035	0,049644	18	9
228	205	206	0,0598805	0,050553	202	98
229	56	124	0,091375	0,063	106	51
230	159	128	0,227838	0,192348	175	85
231	413	400	0,0727345	0,050148	174	84
232	0	374	0,010965	0,00756	113	55
233	126	123	0,02924	0,02016	202	98
234	128	140	0,032131	0,027126	0,1	0
235	400	385	0,059211	0,040824	202	98
236	207	208	0,0383775	0,02646	403	195
237	127	126	0,27047	0,18648	202	98
238	130	156	0,03655	0,0252	126	61
239	400	401	0,070907	0,048888	0,1	0
240	208	209	0,11696	0,08064	29	14
241	124	127	0,02193	0,01512	9	4
242	129	130	0,054825	0,0378	5	2
243	401	386	0,0566525	0,03906	0,1	0
244	208	210	0,0559215	0,038556	18	9

Continua ...

Ramo	De	Para	Resistência do Ramo (Ω)	Reatância do Ramo (Ω)	Potência Ativa Demanda (KW)	Potência Reativa Demanda (KVar)
245	199	118	0,076755	0,05292	45	22
246	140	129	0,046736	0,039456	32	16
247	401	402	0,0595765	0,041076	61	30
248	210	0	0,056287	0,038808	81	39
249	199	200	0,00731	0,00504	126	61
250	156	132	0,113305	0,07812	23	11
251	402	387	0,083334	0,057456	14	7
252	374	201	0,149855	0,10332	18	9
253	157	199	0,02193	0,01512	126	61
254	132	139	0,105995	0,07308	5	3
255	402	403	0,0683485	0,047124	26	13
256	201	0	0,48246	0,33264	18	9
257	123	157	0,10234	0,07056	126	61
258	139	146	0,15351	0,10584	81	39
259	367	344	0,1151325	0,07938	0,1	0
260	372	351	0,1041675	0,07182	126	61
261	198	191	0,01462	0,01008	41	20
262	128	153	0,035052	0,029592	0,1	0
263	344	345	0,05848	0,04032	28	14
264	351	211	0,1136705	0,078372	30	14
265	198	196	0,069445	0,04788	81	39
266	136	143	0,09503	0,06552	202	98
267	344	368	0,0529975	0,03654	318	154
268	351	352	0,2138175	0,14742	176	85
269	158	198	0,27047	0,18648	126	61
270	143	147	0,09503	0,06552	6	3
271	399	403	0,047515	0,03276	31	15
272	352	212	0,201025	0,1386	60	29
273	196	190	0,010965	0,00756	56	27
274	153	155	0,032131	0,027126	126	61
275	403	404	0,040205	0,02772	118	57
276	352	213	0,0500735	0,034524	126	61
277	158	189	0,2359	0,2402	202	98
278	155	136	0,084065	0,05796	10	5
279	404	388	0,0588455	0,040572	126	61
280	0	214	0,3475905	0,239652	202	98
281	158	160	0,084065	0,05796	318	154
282	142	149	0,098685	0,06804	82	40
283	404	405	0,071638	0,049392	126	61
284	214	215	0,105995	0,07308	22	10
285	160	171	0,08772	0,06048	13	6

Continua ...

Ramo	De	Para	Resistência do Ramo (Ω)	Reatância do Ramo (Ω)	Potência Ativa Demanda (KW)	Potência Reativa Demanda (KVar)
286	149	147	0,02193	0,01512	71	34
287	405	389	0,045322	0,031248	101	49
288	215	216	0,099314	0,083844	113	54
289	171	187	0,091375	0,063	126	61
290	133	138	0,119761	0,101106	0,1	0
291	405	390	0,0731	0,0504	34	17
292	215	217	0,06579	0,04536	83	40
293	187	167	0,091375	0,063	59	29
294	138	142	0,062135	0,04284	126	61
295	403	406	0,083334	0,057456	145	70
296	217	218	0,002924	0,002016	202	98
297	175	178	0,06579	0,04536	50	24
298	153	133	0,078867	0,066582	41	20
299	406	391	0,0785825	0,05418	202	98
300	218	219	0,08041	0,05544	77	37
301	167	175	0,113305	0,07812	161	78
302	147	56	0,1462	0,1008	477	231
303	406	407	0,048977	0,033768	68	33
304	219	222	0,0709803	0,0599238	14	7
305	160	184	0,13158	0,09072	4	2
306	128	150	0,032895	0,02268	0,1	0
307	407	408	0,0668865	0,046116	66	32
308	222	236	0,081788	0,069048	0,1	0
309	184	163	0,091375	0,063	60	29
310	144	145	0,032895	0,02268	95	46
311	408	392	0,073831	0,050904	0,1	0
312	236	237	0,0622173	0,0525258	19	9
313	163	164	0,032895	0,02268	67	32
314	145	148	0,054825	0,0378	18	9
315	408	393	0,0690795	0,047628	33	16
316	236	371	0,0537464	0,0453744	21	10
317	164	172	0,13889	0,09576	33	16
318	151	134	0,076755	0,05292	42	20
319	407	409	0,0551905	0,038052	52	25
320	238	239	0,005842	0,004932	43	21
321	172	178	0,113305	0,07812	126	61
322	134	144	0,142545	0,09828	107	52
323	409	414	0,06579	0,04536	202	98
324	238	242	0,0835406	0,0705276	126	61
325	178	159	0,069445	0,04788	24	12
326	134	194	0,0091375	0,0063	101	49

Continua ...

Ramo	De	Para	Resistência do Ramo (Ω)	Reatância do Ramo (Ω)	Potência Ativa Demanda (KW)	Potência Reativa Demanda (KVar)
327	409	410	0,064328	0,044352	81	39
328	242	354	0,0054825	0,00378	155	75
329	158	181	0,054096	0,063812	23	11
330	150	151	0,054825	0,0378	31	15
331	410	394	0,0595765	0,041076	126	61
332	354	353	0,127925	0,0882	13	6
333	181	185	0,0483	0,056975	56	27
334	0	189	0,14154	0,14412	120	58
335	410	411	0,0676175	0,04662	126	61
336	353	241	0,018275	0,0126	403	195
337	185	165	0,037744	0,038432	81	39
338	189	188	0,0731	0,0504	177	86
339	411	398	0,0566525	0,03906	151	73
340	353	240	0,0731	0,0504	9	4
341	165	169	0,037744	0,038432	29	14
342	188	197	0,10965	0,0756	14	7
343	411	397	0,071638	0,049392	23	11
344	242	355	0,0091375	0,0063	45	22
345	169	173	0,02921	0,02466	0,1	0
346	197	195	0,03655	0,0252	36	17
347	411	412	0,0873545	0,060228	5	2
348	355	356	0,05117	0,03528	9	4
349	173	179	0,063693	0,064854	80	39
350	188	192	0,023392	0,016128	0,1	0
351	412	396	0,0705415	0,048636	0,1	0
352	356	243	0,0127925	0,00882	0,1	0
353	158	183	0,22661	0,15624	0,1	0
354	148	137	0,127925	0,0882	0,1	0
355	412	395	0,069445	0,04788	0,1	0
356	356	244	0,0054825	0,00378	0,1	0
357	183	186	0,035052	0,029592	0,1	0
358	137	154	0,105995	0,07308	0,1	0
359	289	288	0,062866	0,043344	0,1	0
360	242	245	0,0365125	0,030825	0,1	0
361	245	246	0,052632	0,036288	0,1	0
362	264	265	0,1078225	0,07434	0,1	0
363	288	287	0,046784	0,032256	0,1	0
364	305	309	0,126463	0,087192	0,1	0
365	246	247	0,0727345	0,050148	0,1	0
366	265	266	0,099416	0,068544	0,1	0
367	287	299	0,1867705	0,128772	0,1	0

Continua ...

Ramo	De	Para	Resistência do Ramo (Ω)	Reatância do Ramo (Ω)	Potência Ativa Demanda (KW)	Potência Reativa Demanda (KVar)
368	309	319	0,0127925	0,00882	0,1	0
369	242	248	0,0487807	0,0411822	0,1	0
370	266	267	0,156434	0,107856	0,1	0
371	299	285	0,10965	0,0756	0,1	0
372	309	313	0,072369	0,049896	0,1	0
373	248	357	0,043129	0,029736	0,1	0
374	267	268	0,0549647	0,0559666	0,1	0
375	0	372	0,027778	0,019152	0,1	0
376	313	308	0,0698105	0,048132	0,1	0
377	357	358	0,0054825	0,00378	86	41
378	268	364	0,07077	0,07206	86	41
379	299	284	0,081141	0,055944	0,1	0
380	308	312	0,0785825	0,05418	0,1	0
381	358	249	0,0201025	0,01386	0,1	0
382	364	365	0,025585	0,01764	0,1	0
383	299	300	0,0932025	0,06426	0,1	0
384	312	316	0,0683485	0,047124	0,1	0
385	358	250	0,1407175	0,09702	68	33
386	365	269	0,1005125	0,0693	15	7
387	300	301	0,055556	0,038304	56	27
388	316	318	0,123539	0,085176	12	6
389	250	251	0,1882325	0,12978	50	24
390	365	270	0,0164475	0,01134	115	56
391	301	302	0,045322	0,031248	14	7
392	318	317	0,066521	0,045864	5	2
393	250	359	0,098685	0,06804	19	9
394	364	362	0,0483595	0,049241	34	17
395	302	303	0,195177	0,134568	10	5
396	317	314	0,069445	0,04788	40	19
397	359	252	0,049708	0,034272	28	14
398	362	361	0,018872	0,019216	14	7
399	303	304	0,208335	0,14364	17	8
400	314	310	0,083334	0,057456	41	20
401	252	253	0,0458597	0,0387162	0,1	0
402	362	380	0,26316	0,18144	0,1	0
403	304	307	0,050439	0,034776	0,1	0
404	310	303	0,105264	0,072576	0,1	0
405	253	360	0,0588455	0,040572	0,1	0
406	361	271	0,0164475	0,01134	0,1	0
407	307	315	0,2218585	0,152964	0,1	0
408	295	259	0,0478805	0,033012	0,1	0

Continua ...

Ramo	De	Para	Resistência do Ramo (Ω)	Reatância do Ramo (Ω)	Potência Ativa Demanda (KW)	Potência Reativa Demanda (KVar)
409	360	255	0,040205	0,02772	0,1	0
410	361	0	0,02415	0,0284875	0,1	0
411	315	311	0,105264	0,072576	0,1	0
412	259	286	0,035819	0,024696	0,1	0
413	253	254	0,0274125	0,0189	0,1	0
414	0	363	0,28509	0,19656	0,1	0
415	311	306	0,072369	0,049896	19	9
416	259	323	0,1078225	0,07434		
417	253	256	0,078867	0,066582		
418	363	283	0,1041675	0,07182		
419	306	299	0,078217	0,053928		
420	323	325	0,0054825	0,00378		
421	256	257	0,105995	0,07308		
422	363	284	0,05848	0,04032		
423	333	335	0,0712725	0,04914		
424	323	265	0,103802	0,071568		
425	256	282	0,0537464	0,0453744		
426	380	267	0,3095785	0,213444		
427	335	322	0,054825	0,0378		
428	323	324	0,048246	0,033264		
429	282	281	0,0663067	0,0559782		
430	267	326	0,0383775	0,02646		
431	335	336	0,0646935	0,044604		
432	323	322	0,08772	0,06048		
433	281	233	0,055499	0,046854		
434	326	327	0,054825	0,0378		
435	336	337	0,02924	0,02016		
436	322	321	0,0676175	0,04662		
437	233	232	0,0277495	0,023427		
438	267	296	0,050439	0,034776		
439	337	338	0,0420325	0,02898		
440	321	320	0,09503	0,06552		
441	232	375	0,011684	0,009864		
442	296	295	0,050439	0,034776		
443	338	264	0,067983	0,046872		
444	320	298	0,070176	0,048384		
445	229	230	0,0455676	0,0384696		
446	295	294	0,0741965	0,051156		
447	264	366	0,008772	0,006048		
448	298	295	0,038012	0,026208		
449	229	227	0,026289	0,022194		

Continua ...

Ramo	De	Para	Resistência do Ramo (Ω)	Reatância do Ramo (Ω)	Potência Ativa Demanda (KW)	Potência Reativa Demanda (KVar)
450	295	297	0,0376465	0,025956		
451	366	339	0,0010965	0,000756		
452	321	328	0,031433	0,021672		
453	227	370	0,046736	0,039456		
454	294	293	0,022661	0,015624		
455	339	340	0,0274125	0,0189		
456	328	329	0,0266815	0,018396		
457	370	373	0,0394335	0,033291		
458	293	291	0,0917405	0,063252		
459	340	341	0,113305	0,07812		
460	329	330	0,041667	0,028728		
461	373	226	0,003655	0,00252		
462	267	291	0,098685	0,06804		
463	333	334	0,0559215	0,038556		
464	330	331	0,0274125	0,0189		
465	373	225	0,0023368	0,0019728		
466	291	289	0,016813	0,011592		
467	340	367	0,179095	0,12348		
468	328	332	0,05848	0,04032		
469	225	224	0,0274125	0,0189		
470	289	290	0,0054825	0,00378		
471	375	229	0,0277495	0,023427		
472	332	333	0,041667	0,028728		
473	367	342	0,0091375	0,0063		