



MODELAGEM DE TOPOLOGIA DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO COM  
ALGORITMOS GENÉTICOS EM AMBIENTE GIS (SISTEMAS DE  
INFORMAÇÕES GEORREFERENCIADAS)

Sérgio Roberto Ferreira Cordeiro de Melo

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Beatriz de Souza Leite Pires de Lima

Rio de Janeiro

Março de 2018

MODELAGEM DE TOPOLOGIA DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO COM  
ALGORITMOS GENÉTICOS EM AMBIENTE GIS (SISTEMAS DE  
INFORMAÇÕES GEORREFERENCIADAS)

Sérgio Roberto Ferreira Cordeiro de Melo

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO  
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)  
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

---

Profa. Beatriz de Souza Leite Pires de Lima, D.Sc.

---

Profa. Solange Guimarães, D.Sc.

---

Dr. Ricardo Marques Dutra, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2018

Melo, Sérgio Roberto Ferreira Cordeiro de

Modelagem de Topologia de Redes de Distribuição com Algoritmos Genéticos em Ambiente GIS (Sistemas de Informações Georreferenciadas)/ Sérgio Roberto Ferreira Cordeiro de Melo. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XVII, 165 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadora: Beatriz de Souza Leite Pires de Lima.

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 124-133.

1.Sistemas de energia. 2. Algoritmos genéticos. 3. Algoritmos evolucionários. 4. Sistemas de informação georreferenciadas (GIS). I. Lima, Beatriz de Souza Leite Pires de. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

## Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado saúde durante todo o período de desenvolvimento desse trabalho;

A toda a minha família. Em especial: aos meus pais, Pelópidas Cavalcanti Cordeiro de Melo e Vânia Maria Ferreira Cordeiro de Melo, ao meu Irmão Renato Ferreira Cordeiro de Melo e a minha Esposa Rayssa Guimarães Velloso que me ensinaram todos os melhores valores, demonstrando a prática do bem acima de qualquer outra questão;

Ao meu chefe, gerente do departamento de tecnologias especiais DME do Cepel e amigo Ary Vaz Pinto Junior, aos pesquisadores do Cepel, Dr. Ricardo Marques Dutra, Dra. Vanessa Gonçalves Guedes e Dr. Angelo Mustto, e aos Engenheiros Igor Jasmim e Daniel Ramos Agnese, que tiveram a enorme solidariedade de me ajudar na execução desse trabalho. Sou muito grato por terem acreditado em minha capacidade e ter me estendido a mão para a pesquisa, atividade com a qual me identifico e me aprimoro como pessoa todos os dias;

A minha orientadora e amiga Dra. Beatriz, agradeço por todos os ensinamentos e pela paciência que teve comigo ao longo dos últimos anos;

A professora e Dra. Solange que em parceria com minha orientadora professora e Dra. Beatriz, me auxiliou e me guiou na metodologia e formatação desta dissertação.

A todos os professores e funcionários do Programa de Engenharia Civil (PEC) da UFRJ. As condições proporcionadas pelos serviços prestados por toda equipe do PEC possibilitaram minha formação acadêmica de forma integral;

Ao Cepel, pelo apoio financeiro. Graças a este centro de pesquisa, tive a oportunidade de me desenvolver profissionalmente e contribuir de forma ativa com o desenvolvimento da nação.

*À memória de Pelópidas Cavalcanti Ferreira  
Cordeiro de Melo o melhor Pai deste mundo.*

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

MODELAGEM DE TOPOLOGIA DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO COM  
ALGORITMOS GENÉTICOS EM AMBIENTE GIS (SISTEMAS DE  
INFORMAÇÕES GEORREFERENCIADAS)

Sérgio Roberto Ferreira Cordeiro de Melo

Março/2018

Orientador: Beatriz de Souza Leite Pires de Lima

Programa: Engenharia Civil

Este trabalho apresenta uma metodologia para resolver o problema do planejamento de expansão do sistema de distribuição de energia elétrica (PSDEE), utilizando algoritmos genéticos integrados em um ambiente usando Sistemas de Informação Georeferenciadas (GIS). O objetivo é encontrar um plano de expansão do sistema de distribuição de energia elétrica com custos de investimentos e de operação mínimos sujeitos a restrições físicas. A função objetivo do modelo é o valor presente líquido dos custos com construção e/ou recondutoramento de circuitos, com construção e/ou ampliação de subestações, com perdas resistivas anuais e com operação das subestações. Foi desenvolvido um algoritmo genético especializado, adaptado da proposta de Chu & Beasley (1997) em conjunto com técnicas heurísticas especializadas integrados a um ambiente GIS.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

MODELING OF TOPOLOGY OF DISTRIBUTION NETWORKS USING GENETIC ALGORITHMS IMPLEMENTED IN A GIS ENVIRONMENT (GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEMS)

Sérgio Roberto Ferreira Cordeiro de Melo

March/2018

Advisor: Beatriz de Souza Leite Pires de Lima

Department: Civil Engineering

This work presents a methodology to solve the problem of expansion planning of the electric energy distribution system (PSDEE), using genetic algorithms integrated in an environment using Geographic Information Systems (GIS). The objective is to find a plan to expand the electricity distribution system with minimum investment and operating costs subject to physical constraints. The objective function of the model is equal to the net present value of the costs of building and / or re-conducting circuits, with construction and / or expansion of substations, with annual resistive losses and substation operation. A specialized genetic algorithm was developed, adapted from Chu & Beasley's (1997) proposal in conjunction with specialized heuristics integrated with a GIS environment.

|  |           |
|--|-----------|
| <b>CAPÍTULO I - Introdução .....</b>   | <b>1</b>  |
| I.1– MOTIVAÇÃO & OBJETIVOS .....   | 1         |
| <b>CAPÍTULO II -Planejamento da Expansão de Sistemas Elétricos de Distribuição. 6</b>      | <b>6</b>  |
| II.1– PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (PSDEE)..... | 6         |
| II.2– MODELOS DE PSDEE MAIS UTILIZADOS .....   | 7         |
| II.3– O USO DO GEOPROCESSAMENTO NO PLANEJAMENTO E GESTÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA. ....  | 9         |
| <b>CAPÍTULO III -Revisão Bibliográfica.....</b>  | <b>14</b> |
| III.1– O PSDEE (MODELOS MATEMÁTICOS) .....   | 14        |
| III.2– TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO .....  | 15        |
| <i>III.2.1– Otimização Clássica.....</i>   | <i>15</i> |
| <i>III.2.2– Heurísticas.....</i>   | <i>16</i> |
| <i>III.2.3– Meta-heurísticas.....</i>  | <i>19</i> |
| III.3– TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO NA SOLUÇÃO DO PSDEE.....                                     | 27        |
| <b>CAPÍTULO IV -Formulação Matemática para Solução do Problema do PSDEE.37</b>             | <b>37</b> |
| IV.1– FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PSDEE .....   | 37        |
| <i>IV.1.1– Modelagem Matemática aplicada ao PSDEE .....</i>                                | <i>38</i> |
| <i>IV.1.2– Estudo e Cálculo do Fluxo de Potência/Carga .....</i>                           | <i>41</i> |
| <i>IV.1.3– Estudo dos Índices de Confiabilidade .....</i>                                  | <i>51</i> |
| <b>CAPÍTULO V - Algoritmo Genético Especializado Aplicado ao PSDEE.....</b>                | <b>53</b> |
| V.1– O ALGORITMO GENÉTICO MODIFICADO POR CHU & BEASLEY .....                               | 53        |
| V.2– ALGORITMO GENÉTICO ESPECIALIZADO (AG ESPECIALIZADO).....                              | 54        |
| <i>V.2.2– Codificação do problema do PSDEE para o AG Especializado. ....</i>               | <i>56</i> |
| <i>V.2.3– População Inicial Melhorada .....</i>  | <i>59</i> |
| <i>V.2.4– Avaliação na População Inicial.....</i>  | <i>80</i> |
| <i>V.2.5– Operação de Seleção.....</i>   | <i>83</i> |
| <i>V.2.6– Etapa de Recombinação.....</i>   | <i>84</i> |
| <i>V.2.7– Etapa de Mutação .....</i>   | <i>88</i> |
| <i>V.2.8– Fase de Melhoria Local .....</i>   | <i>90</i> |

|  |            |
|--|------------|
| V.2.9– <i>Etapa de Substituição</i> .....                              | 95         |
| V.2.10 – <i>Interface do AG especializado com GIS</i> .....            | 98         |
| <b>CAPÍTULO VI - Testes e Resultados</b> .....                         | <b>103</b> |
| VI.1– RESULTADOS OBTIDOS NOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO PROPOSTOS; ..... | 103        |
| VI.1.1– <i>Sistema de 54 Barras</i> .....                              | 103        |
| VI.1.2– <i>Sistema de 23 Barras</i> .....                              | 110        |
| VI.1.3– <i>Sistema de 136 Barras</i> .....                             | 114        |
| VI.1.4– <i>Sistema de 417 Barras</i> .....                             | 116        |
| <b>CAPÍTULO VII - Considerações Finais e Conclusões</b> .....          | <b>119</b> |
| VII.1– CONSIDERAÇÕES: .....  | 119        |
| VII.1.1– <i>Conclusões nos Estudos dos Sistemas Propostos:</i> .....   | 121        |
| VII.1.2– <i>Propostas para Trabalhos Futuros:</i> .....                | 122        |
| <b>BIBLIOGRAFIA</b> .....  | <b>124</b> |
| <b>ANEXO I - Resumo dos Resultados do PSDEE</b> .....                  | <b>134</b> |
| <b>ANEXO II - Dados do Sistema de 54 Barras.</b> .....                 | <b>136</b> |
| <b>ANEXO III - Dados do Sistema de 23 Barras</b> .....                 | <b>140</b> |
| <b>ANEXO IV - Dados do Sistema de 136 Barras.</b> .....                | <b>142</b> |
| <b>ANEXO V - Dados do Sistema de 417 Barras</b> .....                  | <b>146</b> |
| <b>ANEXO VI - Dados do Sistema de 417 Barras.</b> .....                | <b>163</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Fluxo de trabalho entre o AG Especializado e o ambiente GIS (fonte: própria)    | 4  |
| Figura 2 - Rede de distribuição georreferenciada em ambiente GIS (Revista MundoGeo, 2017)  | 11 |
| Figura 3 - Fluxo de informações entre os ambientes GIS e AG Especializado (fonte: Própria) | 12 |
| Figura 4 - Fluxo de trabalho da Interface GIS e AG Especializado (fonte: Própria)          | 13 |
| Figura 5- Função hipotética com máximo local e global                                      | 22 |
| Figura 6 - Fluxograma de um algoritmo genético tradicional simplificado (fonte: Própria)   | 22 |
| Figura 7 - Rede de distribuição radial, (fonte: SANCA, 2013)                               | 43 |
| Figura 8 - Um trecho qualquer de um sistema de distribuição, (SANCA, 2013)                 | 44 |
| Figura 9 - Sistema de 14 barras antes da ordenação   | 48 |
| Figura 10 - Sistema de 14 barras ordenado  | 48 |
| Figura 11 - Sistema Radial, (SANCA, 2013)  | 49 |
| Figura 12 - Fluxo de tarefas do AG Especializado, (fonte: Própria)                         | 55 |
| Figura 13 - Codificação de genótipo, (fonte: Própria)                                      | 57 |
| Figura 14 - Exemplo de codificação para o planejamento multiestágio, (fonte: Própria)      | 59 |
| Figura 15 - Deslocamento das formigas na busca do alimento, (SANCA, 2013)                  | 61 |
| Figura 16 - Experimento ponte de comprimentos iguais, (fonte: Dorigo 2006)                 | 61 |
| Figura 17 - Experimento ponte de comprimentos diferenciados, (fonte: Dorigo 2006)          | 62 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 18 - Gráfico indicando o tráfego nos ramos nos dois experimentos, (fonte: Dorigo 2006).....                                 | 63 |
| Figura 19 - Construção de rota, (fonte: própria).....  | 64 |
| Figura 20 - Escolha da Rota, (DORIGO, BIRATTARI, & STÜTZLE, 2006). ....  | 65 |
| Figura 21 - Pseudocódigo do ACS utilizado para construção da população inicial, (CIVANLAR, GRAINGER, & YIN, 1988).....             | 70 |
| Figura 22 - Fluxograma do ACS para o problema de configuração, (fonte: Própria)....  | 71 |
| Figura 23 - Sistema de 5 barras, (CIVANLAR, GRAINGER, & YIN, 1988).....  | 72 |
| Figura 24 - 21 Topologias, (CIVANLAR, GRAINGER, & YIN, 1988). ....   | 74 |
| Figura 25 - Escolha da barra inicial (barra 2), (CIVANLAR, GRAINGER, & YIN, 1988).<br>.....  | 75 |
| Figura 26 - Deslocamento do agente deste a barra 2 até a barra 1, (CIVANLAR, GRAINGER, & YIN, 1988). ....                          | 76 |
| Figura 27 - Deslocamento do agente desde a barra 2 até a barra 3, (CIVANLAR, GRAINGER, & YIN, 1988). ....                          | 76 |
| Figura 28 - Deslocamento do agente desde a barra 2 até a barra 4, (CIVANLAR, GRAINGER, & YIN, 1988). ....                          | 77 |
| Figura 29 - Ciclo de geração de topologia: (1) passos do agente; (2) topologia resultante, (CIVANLAR, GRAINGER, & YIN, 1988). .... | 79 |
| Figura 30 - Topologias: (1) topologia 21; (2) topologia 17, (CIVANLAR, GRAINGER, & YIN, 1988).....                                 | 79 |
| Figura 31 – Grupo 1 com 3 indivíduos selecionados, (fonte: própria).....   | 84 |
| Figura 32 - Fluxograma da Heurística de recombinação dos filhos (CAMARGO, 2014).<br>.....  | 86 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 33 – Recombinação entre duas soluções, (fonte: Própria). .....  | 87  |
| Figura 34 - Resultado da recombinação, (fonte: própria).....   | 87  |
| Figura 35 - Filho 1, (fonte: própria). .....   | 88  |
| Figura 36 - Mutação, (fonte: própria).....   | 89  |
| Figura 37 - Diagrama de blocos, "Troca de ramos"(CAMARGO, 2014). .....   | 91  |
| Figura 38 - Diagrama de blocos, " Alinhamento de construção de ramos entre os estágios<br>"(CAMARGO, 2014). .....  | 92  |
| Figura 39 - Fase de Melhoria Local - Parte 1, (fonte: própria). .....  | 94  |
| Figura 40 - Fase de Melhoria Local - Parte 2, (fonte: própria). .....  | 95  |
| Figura 41 - Indivíduo codificado, (fonte: própria). .....  | 95  |
| Figura 42 - Solução Final após a fase de melhoria local, (CAMARGO, 2014).....  | 98  |
| Figura 43 - Fluxo de trabalho entre o AG Especializado e o Ambiente GIS ArcGIS, (fonte:<br>própria). .....   | 99  |
| Figura 44 - Visualização da rede inicial (1) e da solução após a aplicação do PSDDE<br>através do AG Especializado (2) no ambiente GIS - Sistema de 54 Barras, (Fonte: Autoria<br>própria) ..... | 102 |
| Figura 45 - Representação binária do indivíduo no sistema de distribuição de 56 barras,<br>(Fonte: Autoria própria).....   | 106 |
| Figura 46 - Sistema de 23 Barras, (GOMEZ, KHODR, OLIVEIRA, OCQUE, & YUSTA,<br>2004).....   | 111 |
| Figura 47 - Solução elaborada - Sistema de 23 barras, (Fonte: Autoria própria).....  | 113 |
| Figura 48 - Gráfico dos valores da incumbente ao longo das gerações - Sistema de 23<br>barras. ....  | 113 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 49 - Sistema de 136 Barras - Rede proposta e Solução após utilizar o AG Especializado, (Fonte: Autoria própria). ..... | 115 |
| Figura 50 - Gráfico dos valores da incumbente ao longo das gerações - Sistema de 136 barras, (Fonte: Autoria própria).....    | 116 |
| Figura 51 - Sistema de 417 barras,(BAQUERO, 2012). .....  | 118 |

## **LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS**

ACO - Otimização por Colônia de Formigas

ACT - Algoritmo Evolucionário de Colônia de Formigas

AIS – Algoritmo de Sistemas Imunológicos Artificiais

AG - Algoritmo Genético

AFC - Algoritmo de Fluxo de Carga

AGCB - Algoritmo Genético de Chu & Beasley

AG-ESP - Algoritmo Genético Especializado

AHC - Algoritmo Heurístico Construtivo

ArcGIS - Software da Cia. ESRI GIS utilizado na pesquisa deste trabalho

B&B - Branch and Bound

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

DEC - Duração equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora

DIC - Duração de Interrupção por Unidade Consumidora

EENS (*Expected Energy Not Served*) – Padrão de Confiabilidade do serviço de fornecimento de energia

GIS - Sistemas de Informação Georreferenciadas

FEC - Frequência equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora

FIC - Frequência de Interrupção por Unidade Consumidora

PSDEE - Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição de Energia Elétrica

PL - Programação Linear

PLIM - Programação Linear Inteira Mista

PNLIM - Programação não Linear Inteira Mista

PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

SAIDI - System Average Interruption Frequency Index

SHP - Formato de arquivo "shapefile" compatível ao sistema GIS

VNS - Meta-heurística de Busca em Vizinhança Variável

"Utilities" - Empresas do Setor de Eletricidade, Água e Gás

MSP – Método da soma de potências

TS – Busca Tabu

GAMS/CPLEX - Solver encontrado na literatura especializada, para resolver um modelo linear inteiro misto.

CIF - *Customer Interruption Frequency* (Semelhante a FIC)

CID - *Customer Interruption Duration* (Semelhante ao DIC)

SAIFI - *System Average Interruption Frequency Index* (Sistema de avaliação de frequência de interrupção por unidade consumidora)

SAIDI - *System Average Interruption Duration Index* (Sistema de avaliação de interrupção por unidade consumidora)

ASAI - *Average System Availability Index* (Sistema de avaliação dos índices de fornecimento de energia)

## LISTA DE NOTAÇÕES

|               |   |
|---------------|---|
| $b_{i,j,a}$   | Susceptância do ramo $i j$ de condutor do tipo $a$ .  |
| $B_{ij}$      | Elemento da matriz susceptância nodal.  |
| $c_{i,j,a}$   | Custo do circuito $i j$ com condutor do tipo $a$ que pode ser adicionado ou substituído em unidade monetária/km.      |
| $c_{op}$      | Custo de operação da subestação em (unidade monetária/kVA2h).   |
| $c_{si,b}$    | Custo de subestação adicionada ao sistema ou repotenciada em unidade monetária.                                       |
| $ce$          | Custo de perdas de energia em unidade monetária/kWh.  |
| $DEC_{k,t}$   | Duração equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora do condutor $k$ no estágio $t$ .                           |
| $DEC_p$       | Limite estipulado para o índice DEC no estágio $t$ .  |
| $DIC_{i,t}$   | Duração de Interrupção por Unidade Consumidora da barra $i$ no estágio $t$ .  |
| $DIC_p$       | Limite estipulado para o índice DIC no estágio $t$ .  |
| $FEC_{k,t}$   | Frequência equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora do condutor $k$ no estágio $t$ .                        |
| $FEC_p$       | Limite estipulado para o índice FEC no estágio $t$ .  |
| $FIC_p$       | Limite estipulado para o índice FIC no estágio $t$ .  |
| $FIC_{i,t}$   | Frequência de Interrupção por Unidade Consumidora da barra $i$ no estágio $t$ .                                       |
| $g_{i,j,a}$   | Condutância do ramo $i j$ do condutor do tipo $a$ .   |
| $G_{ij}$      | Elemento da matriz condutância nodal.   |
| $I$           | taxa de juro.   |
| $I_{maxa}$    | Corrente máxima permitida no condutor do tipo $a$ .   |
| $l_{ij}$      | Comprimento do ramo $i j$ em $km$ .   |
| $m_{i,b,t}$   | Variável binária que indica construção/repotenciação de subestação do tipo $b$ na barra $i$ no estágio $t$ .          |
| $np(t)$       | Duração em anos do estágio $t$ .  |
| $n_b$         | Número de barras do sistema.  |
| $n_{bs}$      | Número de barras com subestação (existentes e propostas).   |
| $n_{i,j,a,t}$ | variável binária que indica se o circuito $i j$ é construído ou reconduzido com condutor do tipo $a$ no estágio $t$ . |
| $n_r$         | Número de ramos (candidatos e propostos).   |
| $PD_{i,t}$    | Potência ativa demandada pela barra $i$ no estágio $t$ .  |
| $PS_{i,t}$    | Potência ativa fornecida pela subestação da barra $i$ no estágio $t$ .  |
| $P_{i,t}$     | Potência ativa calculada na barra $i$ no estágio $t$ .  |

|                    |  |
|--------------------|--|
| $P_{i,j,a,t}$      | Fluxo de potência ativa no condutor do tipo $a$ que sai da barra $i$ e vai para a barra $j$ no estágio $t$ .         |
| $p(t)$             | Ano de início do estágio $t$ a partir de um referencial adotado como base (ano zero).                                |
| $Q_{Di,t}$         | Potência reativa demandada pela barra $i$ no estágio $t$ .   |
| $Q_{Si,t}$         | Potência reativa fornecida pela subestação da barra $i$ no estágio $t$ .   |
| $Q_{i,t}$          | Potência reativa calculada na barra $i$ no estágio $t$ .   |
| $Q_{i,j,a,t}$      | Fluxo de potência reativa no condutor do tipo $a$ que sai da barra $i$ e vai para a barra $j$ no estágio $t$ .       |
| $S_{i,b}$          | Limite máximo da potência aparente da subestação da barra $i$ do tipo $b$ .  |
| $S_{i,j,a,t}$      | Fluxo de potência aparente no ramo $ij$ com condutor do tipo $a$ no estágio $t$ .                                    |
| $S_{i,j,a}$        | Fluxo de potência aparente máxima no ramo $ij$ com condutor do tipo $a$ .  |
| $V_{i,t}$          | Magnitude da tensão na barra $i$ no estágio $t$ .  |
| $V_{max}$          | Magnitude de tensão máxima permitida no sistema.   |
| $V_{min}$          | Magnitude de tensão mínima permitida no sistema.   |
| $T$                | Número de estágios do planejamento.  |
| $T'$               | $\{1,2, \dots, T\}$ .  |
| $\alpha_{i,b,t}$   | Variável binária que indica se a subestação do tipo $b$ da barra $i$ está ativa no estágio $t$ .                     |
| $\beta_{i,j,a,t}$  | Variável binária que indica se o ramo com condutor do tipo $a$ entre as barras $i$ e $j$ está ativo no estágio $t$ . |
| $\theta_{i,j,t}$   | Diferença angular entre as barras $i$ e $j$ no estágio $t$ .   |
| $\lambda_i$        | Estimativa da taxa de ocorrência de falha que provoca a interrupção $i$ .  |
| $\phi_l$           | Fator de perdas dos circuitos.   |
| $\phi_s$           | Fator de perdas das subestações.   |
| $\mathcal{Q}_l$    | Conjunto de ramos (existentes e propostos) do sistema.   |
| $\mathcal{Q}_a$    | Conjunto dos tipos de condutores.  |
| $\mathcal{Q}_{al}$ | Conjunto de condutores do sistema.   |
| $\mathcal{Q}_b$    | Conjunto de barras do sistema.   |

## **CAPÍTULO I - Introdução**

### **I.1 – Motivação & Objetivos**

O problema de planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica (PSDEE) é um problema clássico de otimização cujo modelo matemático é de Programação Não Linear Inteira Mista (PNLIM) de grande porte. Sendo assim, o objetivo é otimizar uma função não linear, sujeita a restrições lineares e não lineares, em que uma parcela das variáveis é inteira e as demais parcelas são contínuas (KAGAN, SCHMIDT, OLIVEIRA, & KAGAN, 2009). Este problema é de natureza combinatória, com vasto espaço de busca, estrutura multimodal, com uma infinidade de soluções ótimas locais (COSSI, 2008). Outro aspecto importante é que o modelo do PSDEE tem uma característica flexível que pode se adaptar às necessidades do planejamento que se pretenda desenvolver (OLIVEIRA, 2010).

A busca por soluções otimizadas para o problema de planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica (PSDEE), não é uma tarefa simples, uma vez que, matematicamente este problema é combinatorial e altamente complexo contendo variáveis reais e binárias. O PSDEE tem por objetivo determinar onde, quando e que tipos de componentes devem ser instalados e/ou construídos ao longo do período de planejamento de modo a satisfazer as necessidades do serviço de distribuição de energia elétrica, o qual está sujeito às especificações técnicas e operacionais referentes à qualidade e continuidade do serviço de fornecimento de energia.

Observa-se que na literatura especializada este assunto é objeto de muitas pesquisas onde são desenvolvidas novas metodologias no intuito de resolver o problema do planejamento da expansão do sistema de distribuição de energia elétrica (PSDEE). O objetivo clássico do PSDEE é o de minimizar custos de investimentos e de operação do sistema satisfazendo um conjunto de restrições físicas, operacionais e financeiras. A relevância de pesquisas nesta área se justifica à medida que é nesta parte do sistema que ocorre frequentemente o aumento de demanda de energia elétrica e se encontra a maior parte dos consumidores e uma parcela significativa de perdas técnicas.

Os estudos do problema de PSDEE tiveram início desde a década de 1960 com Knight (KNIGHT, 1960) e desde então vem sendo explorado e novas técnicas estão sendo desenvolvidas para solução deste problema até os dias atuais.

Desde o final da década de 1980, tem se intensificado o uso de "*metaheurísticas*" para resolver problemas complexos de sistema de energia elétrica, pela facilidade em considerar restrições e funções objetivo não lineares e inserir aspectos específicos de acordo com a natureza do problema, como por exemplo a confiabilidade, perdas, dentre outras, apesar de não haver garantias de que a solução ótima do problema seja obtida (HAFFNER & BARRETO, 2006).

Um fator muito importante relacionado à tomada de decisões no PSDEE é o tempo de estudo considerado, definido na literatura como horizonte de planejamento. Sendo assim, considerando o horizonte de planejamento o problema PSDEE pode ser dividido em duas categorias: médio prazo e longo prazo. No planejamento de médio prazo propõe-se realizar melhorias na rede existente sem realizar a expansão da mesma, e como estas melhorias são realizadas para a rápida adequação do fornecimento de energia aos padrões exigidos pelas agências reguladoras, normalmente, considera-se um período de estudo entre um e cinco anos. Já no planejamento de longo-prazo propõe-se a expansão da rede existente considerando os futuros cenários de demanda da rede. As propostas de expansão apresentam altos custos de investimentos, sendo necessário um maior período de estudo para verificar a viabilidade dessas propostas, desta maneira normalmente considera-se um período entre cinco e 15 anos neste tipo de planejamento.

Além de ser matematicamente complexo, o problema de PSDEE também apresenta natureza multiobjetivo a qual deve ser tratada corretamente a fim de evitar que elementos de tomada de decisão sejam implicitamente incorporados ao modelo, deixando a responsabilidade de escolha para o planejador. A utilização de técnicas multiobjetivo para a solução deste tipo de problema, não fornece uma única solução, mas sim um conjunto de soluções que possibilitam ver claramente a relação de compromisso entre os objetivos analisados, a qual pode auxiliar o planejador a escolher a melhor solução para problema sob estudo.

Diante da grande importância do problema PSDEE para as empresas de distribuição e da atualidade desse tema, o presente trabalho aborda o problema de otimização que envolve o sistema elétrico de distribuição de energia, tendo como principais motivadores: as eficiências comercial e energética e o aumento da confiabilidade de sistemas de distribuição de energia elétrica que culmina em uma necessidade de expansão dos sistemas com construção de novos circuitos, troca das

linhas existentes por outras de maior capacidade (recondutoramento), construção de subestações e ampliação das existentes.

Tendo em vista essas necessidades, propõem-se a modelagem de topologias de rede, utilizando um esquema de otimização através do uso e implementação de algoritmos genéticos especializados, com o objetivo de buscar o ponto ótimo entre garantir o atendimento à demanda e a resiliência do sistema de distribuição a ser projetado, visando o menor custo para estas garantias. Trata-se de um problema de otimização, cuja função objetivo envolve custos associados ao planejamento de sistemas de distribuição na modelagem de uma topologia de rede de distribuição, avaliando: custo de perdas, custos de fatores de confiabilidade e custo para manutenção da radialidade do sistema.

Outro fato importante é a utilização de dispositivos e sistemas que permitam uma melhor análise e interpretação dos dados dos sistemas elétricos aos operadores e desenvolvedores destes sistemas. Sendo assim, foi proposta e desenvolvida uma interface para auxiliar a troca de informação e interpretação de dados, entre o AG (Algoritmo Genético especializado) e o ambiente um GIS (Sistema de informações Georreferenciadas), neste trabalho foi utilizado o ArcGIS (Software da Cia. ESRI), tornando possível a utilização de dados reais de redes de distribuição de energia georreferenciada como dados de entrada na metodologia desenvolvida, ou seja, foi desenvolvida uma funcionalidade no ambiente GIS, para converter os dados da rede de distribuição (informações espaciais e elétricas da rede de distribuição de energia) em dados codificados e compatíveis ao código do AG especializado.

Uma das inovações implementadas neste trabalho é disponibilizar a visualização dos resultados da otimização do PSDEE (Planejamento de Sistemas de Distribuição de Energia) em um ambiente GIS. Na Figura 1 apresenta-se um esquema simples para entender o fluxo de dados entre o AG especializado e o ambiente GIS:

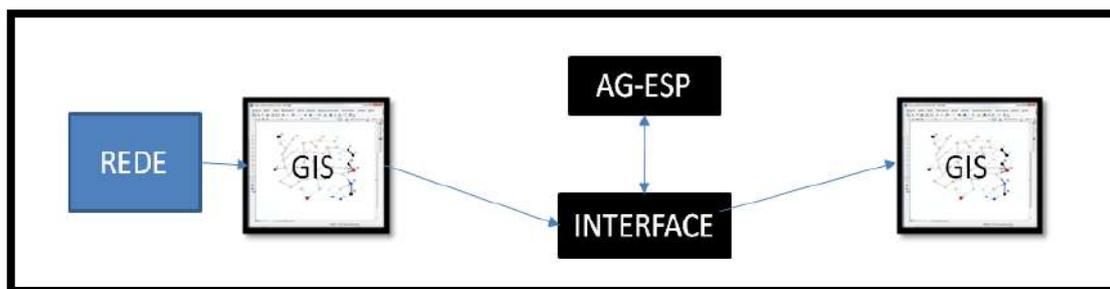


Figura 1 - Fluxo de trabalho entre o AG Especializado e o ambiente GIS (fonte: própria)

Descrevendo a Figura 1: A rede de distribuição é armazenada no Banco de dados do ambiente GIS, onde foi desenvolvida uma interface com o papel de converter os dados da rede de distribuição a um formato compatível a ser utilizado no algoritmo genético especializado para solução do PSDDE. O AG especializado disponibiliza o planejamento do novo sistema de distribuição de energia. O Ambiente GIS (Sistema de informação georreferenciada), faz a conversão dos dados de saída do AG especializado a um formato de dados georreferenciados compatível com este ambiente de trabalho, que vai facilitar o entendimento e análise dos resultados do PSDEE.

Este trabalho está dividido em sete capítulos, os quais são descritos a seguir:

No Capítulo I faremos uma breve descrição do trabalho, motivação e objetivos.

O Capítulo II faz uma introdução sobre particularidades do setor elétrico, abordando a importância dos estudos de planejamentos de sistemas de distribuição de energia, e quais os principais modelos utilizados nestes estudos de planejamento. Dando continuidade, e introduzindo o assunto de um dos diferenciais deste trabalho, é abordada a importância da utilização de ambientes GIS associados às técnicas de geoprocessamento no desenvolvimento de aplicações e implementações de metodologias no que tange os assuntos de Geração, Transmissão e Distribuição de energia elétrica. Sendo assim é abordada a importância da utilização de bases de dados georreferenciadas e o desenvolvimento dessas informações no ambiente GIS.

No Capítulo III, é realizada uma revisão bibliográfica sobre a utilização de métodos de otimização computacional no planejamento de sistemas de distribuição, e sua evolução desde a primeira pesquisa onde foi abordado este assunto.

No Capítulo IV, é apresentada a formulação matemática do PSDEE implementado neste trabalho, e quais estratégias foram desenvolvidas e adotadas na solução do problema. Dentre estas estratégias estão os estudos de fluxo de potência, os estudos para desenvolvimento de topologias de rede de distribuição e os estudos de índices de confiabilidade.

No Capítulo V, são abordadas as mudanças sugeridas em Chu & Beasley para transformar um AG tradicional, em um AG especializado na solução do PSDEE. Também são abordadas as mudanças sugeridas por outros autores da literatura especializada, para o mesmo objetivo, e quais mudanças foram implementadas no AG especializado desenvolvido neste trabalho. Entre as mudanças implementadas estão: a utilização de heurísticas melhoradas na fase de criação de uma população inicial e na fase de avaliação desta população, a utilização dos operadores de seleção, recombinação, mutação e substituição associados a heurísticas diferenciadas e melhoradas, assim como a implementação de uma fase de melhoria local nos indivíduos gerados.

No Capítulo VI, são apresentados os resultados na aplicação do PSDDE através do AG especializado em alguns casos de sistemas elétricos de distribuição da literatura especializada, onde é demonstrada a comparação e a avaliação destes resultados, nos sistemas de 54 barras, de 23 barras, de 144 barras e de 417 barras.

No Capítulo VII, são apresentadas as conclusões e considerações sobre a metodologia aplicada e sobre as melhoras implementadas no AG especializado, bem como são apontadas sugestões e perspectivas para os trabalhos futuros na continuidade desta pesquisa.

Na sessão de ANEXOS são apresentados os dados de entrada dos sistemas de distribuição referidos nos parágrafos anteriores, nos sistemas de 54 barras, de 23 barras, de 144 barras e de 417 barras.

## **CAPÍTULO II - Planejamento da Expansão de Sistemas Elétricos de Distribuição.**

O problema de planejamento da expansão de redes de distribuição consiste, em linhas gerais, na determinação do local, da capacidade e de quando os reforços da rede de distribuição de energia devem ser providenciados, tendo como contrapartida tanto a demanda, a confiabilidade e a robustez a serem atendidas, como dados geográficos, políticos e econômicos da região.

### **II.1 – Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição de Energia Elétrica (PSDEE).**

Visando um custo operacional baixo e a maximização das margens de lucro dos empreendimentos, o novo modelo do sistema elétrico brasileiro determina a desvinculação do serviço de distribuição de energia elétrica de qualquer outra atividade no contexto de mercado de energia elétrica (lei 10.848/2004). Assim, as empresas distribuidoras passam a operar num ambiente cada vez mais competitivo tendo de investir em equipamentos e sistemas de controle cada vez mais caros e sofisticados a fim de garantir confiabilidade, qualidade e segurança na operação de seus sistemas.

O universo dos consumidores alimentados pelo sistema de distribuição é bastante diversificado e em geral dois níveis de tensão de alimentação podem ser identificados, os quais são:

- (1) Consumidores industriais e comerciais de médio porte que são alimentados pela rede de distribuição primária (normalmente em 13,8kV)
- (2) Consumidores residenciais, pequenos comércios são alimentados pelas redes de distribuição secundária (normalmente em 127V e 220V). Por questões fundamentalmente ligadas a custo de investimento e operação, as redes primárias de distribuição operam normalmente em configuração radial, (GÖNEN & FOOTE, 1983).

Um dos principais estudos realizados para minimizar os custos de operação, diz respeito à minimização das perdas técnicas causadas pelo efeito Joule nos condutores do sistema de distribuição. São encontrados na literatura uma grande quantidade de estudos e experimentos realizados tentando minimizar este tipo de perda. Podemos destacar as metodologias de reconfiguração ótima de sistemas de distribuição de energia elétrica, (SARFI R. S., 1994).

Em termos gerais, o PSDEE tem como objetivo projetar um sistema confiável em contrapartida a uma crescente demanda de energia elétrica variável no tempo. Este projeto deve apresentar o custo mínimo de desenvolvimento possível, sendo obrigatório respeitar as condições físicas e operacionais, bem como algumas particularidades do contexto que o sistema está sendo planejado. Nesse sentido, a solução do PSDEE deve indicar: (1) onde, (2) quando e (3) quais modificações devem ser realizadas nos ramos e subestações de um sistema ao longo do horizonte de planejamento. Para atingir estes objetivos são desenvolvidas muitas pesquisas na área de planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica de forma a minimizar os custos de investimento e de operação para um determinado tempo satisfazendo um conjunto de restrições operacionais, físicas e financeiras, (OLIVEIRA, 2010).

## **II.2 – Modelos de PSDEE mais utilizados**

Como foi comentado anteriormente, os modelos mais frequentemente utilizados tem como objetivo minimizar os custos com investimentos e custos operacionais. Os custos com investimentos geralmente estão associados com a construção e/ou recondutoramento de circuitos e construção e/ou ampliação de subestações. Podem ser encontrados na literatura vários trabalhos que tem como foco principal somente a alocação e dimensionamento de circuitos, sendo conhecidas à priori a localização e a potência da subestação, como em Adams e Laughton (ADAMS & LAUGHTON, 1974). Outros trabalhos centram esforços na alocação e dimensionamento de subestações como em Crawford e Holt (CRAWFORD & HOLT, 1974). Na literatura especializada Oliveira (OLIVEIRA, 2010) e Souza (SOUZA, 2011) desenvolveram uma metodologia para tratar simultaneamente os custos relacionados à perdas bem como os custos relacionados à operação das subestações (proporcional ao quadrado da potência aparente fornecida pela subestação ao sistema), metodologia esta adotada neste trabalho.

Acompanhando a literatura especializada focada na metodologia para tratar simultaneamente os custos relacionados a perdas e custos relacionados a operação de subestações, um planejamento da expansão dos sistemas de distribuição pode ser avaliado, desenvolvido e planejado em duas modalidades distintas (GALLEGO, RIDER, LAVORATO, & PADILHA-FELTRIN, 2012):

- Planejamento estático ou estágio único: No planejamento estático é encontrado o plano otimizado de expansão em uma única etapa e a

previsão de demanda corresponde à do final do período de planejamento.

- Planejamento multiestágio: No planejamento multiestágio as ações do planejamento são realizadas em diferentes estágios ao longo do horizonte de planejamento, de acordo com a previsão de demanda para cada período considerado e pode ser dinâmico ou pseudodinâmico.

Reiterando, o planejamento dinâmico considera que as ações do planejamento ocorrem de forma coordenada entre os estágios, enquanto o planejamento pseudodinâmico, resolve o problema do planejamento para cada estágio como se fosse estático e o próximo estágio é inicializado com a solução do estágio anterior (COSSI, 2008). Outro fato importante é destacar que, como o planejamento é realizado para um horizonte de tempo que pode ser de vários anos, os valores da função objetivo que se pretende otimizar devem ser atualizados ao valor presente utilizando as taxas de juros do mercado atualizadas, (MIRANDA, RANITO, & PROENÇA, 1994).

Em Souza (SOUZA, 2011) e Lotero e Contreras (LOTERO & CONTRERAS, 2011) o problema é resolvido como um problema de programação linear inteira mista (PLIM) por um software comercial assim como na proposta elaborada em Hafner, (HAFFNER & BARRETO, 2006).

As restrições do problema de PSDEE, segundo Oliveira (OLIVEIRA, 2010), podem ser classificadas como físicas, operacionais e de investimento:

- Restrições físicas: Estas restrições estão relacionadas à capacidade dos componentes do sistema, como por exemplo, o limite de fluxo de potência aparente nos circuitos, a potência máxima fornecida pela subestação, dentre outras.
- Restrições operacionais: São determinadas pela operação do sistema, como o limite de tensão nos nós, a duplicidade de circuitos no mesmo ramo, a radialidade etc.
- Restrições de Investimento: Restrições impostas pela empresa em função do orçamento, capacidade de subestações, etc.

As restrições usualmente utilizadas no modelo do PSDEE são: balanço de potência ou de corrente nas barras, limite de tensão nas barras, capacidade de potência dos circuitos e das subestações, condições de radialidade, condições de escolha de uma única opção para as variáveis de decisão.

### **II.3 – O uso do Geoprocessamento no planejamento e gestão da distribuição de energia.**

Como mencionado no Capítulo I deste trabalho, foi desenvolvida uma interface do AG especializado com a ferramenta GIS (Sistema de Informação Georreferenciada), ArcGIS versão 10.3 na linguagem nativa Python 2.7. Esta interface tem o papel de decodificar a entrada dos dados de redes de distribuição de energia (formato "*shapefile*") a um formato compatível no AG Especializado, e da mesma forma interpretar os resultados do AG Especializado na solução do PSDEE de forma a viabilizar a entrada e interpretação destes resultados em um ambiente GIS.

As características de distribuição geográfica dos componentes da rede e dos consumidores tornam-se, atualmente, essenciais para subsidiar a tomada de decisão. Neste contexto, o geoprocessamento surge como tecnologia de elevado potencial para auxiliar nos processos de tomada de decisão relativos às redes de distribuição de energia. O geoprocessamento consiste num conjunto de tecnologias que reúne numerosos recursos para a coleta, o processamento e a análise de informações espaciais, ou seja, de informações cuja localização geográfica seja uma característica inerente.

Os Sistemas de Informação Geográfica (GIS), são um conjunto de técnicas de geoprocessamento associadas à programas computacionais, especializados no processamento e análise de dados contendo informações espaciais, que constituem em uma ferramenta diretamente manuseada pelos usuários, tornando mais simples a relação e utilização de dados espaciais com os operadores deste tipo de informação georreferenciada. A capacidade desses sistemas em integrar informações de origens e formatos diversos, mantendo tanto a expressão numérica quanto geográfica das variáveis, tem demonstrado potencial cada vez maior para avaliações e diagnósticos relacionados a dados de qualquer natureza.

As cidades garantem a estrutura física para a comunidade urbana, porém, o expressivo crescimento destas, nas últimas décadas, transformou tais estruturas em

sistemas muito complexos e difíceis de administrar. Dentre todas as estruturas de uma cidade, os sistemas de abastecimento de energia merecem atenção especial, pois destes dependem diretamente o desenvolvimento de cada região. As companhias de energia têm a tarefa de fornecer energia elétrica, atendendo a crescente demanda, que exige maior quantidade de ligações e manutenções em seus complexos sistemas de rede de distribuição de energia, que conseqüentemente acarretam em um aumento na extensão da rede e uma maior necessidade de planejamento e acompanhamento do sistema.

A operação eficiente desse sistema requer o uso de ferramentas de análise que sejam robustas e de fácil utilização, que permitam a leitura de grandes quantidades de dados e que forneçam resultados consistentes para subsidiar a resolução dos conflitos e para auxiliar a gestão integrada do sistema de abastecimento, para isso os Sistemas de Informações Geográficas (GIS) utilizam gerenciadores de banco de dados para manipulação de informações e integram modelos de otimização e de simulação que usam algoritmos matemáticos específicos.

Com a utilização de ferramentas computacionais, como modelos elétricos e Sistemas de Informações Geográficas (GIS), é possível padronizar os procedimentos, dar auxílio nos processos de análise, operação, planejamento e tomada de decisão em sistemas de distribuição de energia, dando assim suporte para a solução dos complexos problemas de planejamento

O emprego da tecnologia do geoprocessamento no gerenciamento energético de redes de distribuição possibilita sensíveis ganhos em tempo e qualidade dos resultados, permitindo a realização de avaliações complexas em grandes extensões territoriais. Torna-se possível integrar informações existentes em bancos de dados convencionais (relacionais) com dados mapeados, gerando resultados de elevado valor para racionalizar a aplicação de recursos financeiros e subsidiar a tomada de decisão na escolha de alternativas mais adequadas do ponto de vista técnico e econômico. O requisito básico para o uso de um GIS no gerenciamento de redes de distribuição é a disponibilidade de uma base cartográfica, neste caso de um mapa básico da rede contendo as informações mais importantes a serem armazenadas no Banco de Dados GIS, e em segundo plano, mas não menos importantes informações adicionais como por exemplo a infraestrutura da região a ser estudada (dados de cartografia básica, dados ambientais, etc.).

Na Figura 2 temos uma amostra real de uma rede de distribuição georreferenciada visualizada e interpretada em um ambiente GIS.

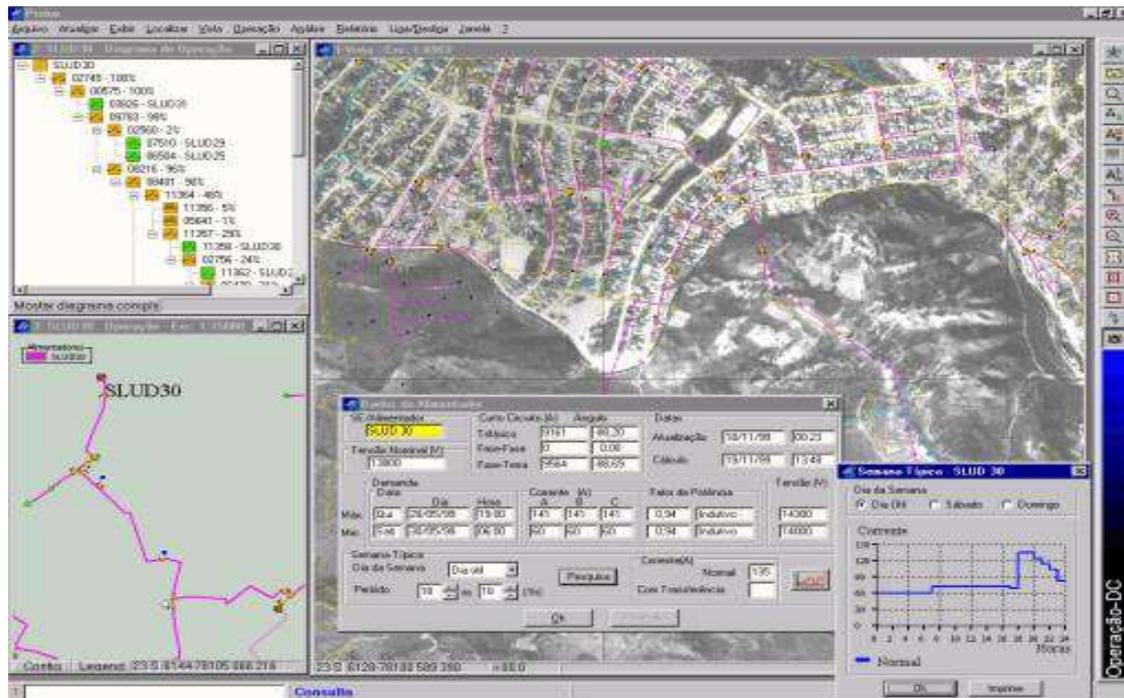


Figura 2 - Rede de distribuição georreferenciada em ambiente GIS (Revista MundoGeo, 2017)

Dando continuidade será apresentado na Figura 3 o fluxo de atividades desenvolvido neste trabalho evidenciando a troca de informações entre o ambiente GIS e o AG Especializado:

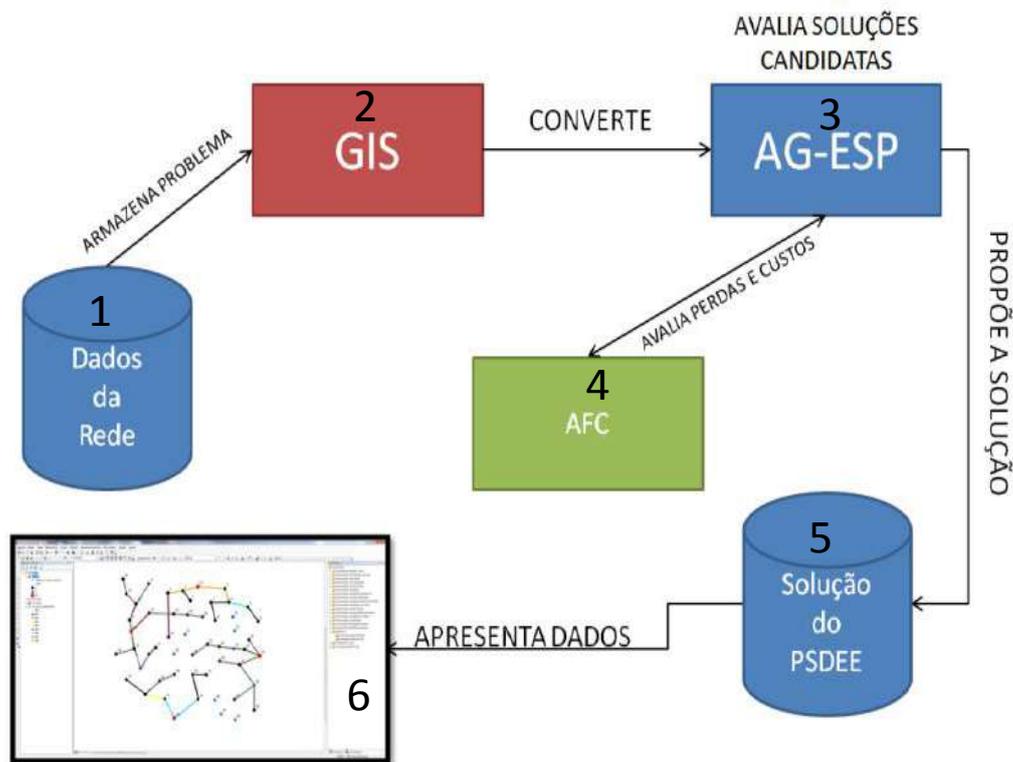


Figura 3 - Fluxo de informações entre os ambientes GIS e AG Especializado (fonte: Própria)

Na Figura 3, podemos observar que:

- (1) os dados da rede de distribuição são incorporados ao banco de dados GIS;
- (2) o mesmo os interpreta e mostra uma visão inicial antes do PSDEE;
- (3) O GIS realiza a conversão destes dados a um formato compatível com o AG especializado que recebe estes dados, e em conjunto com (4) um código de cálculos de perdas (AFC);
- (5) finalmente o AG especializado, planeja e otimiza a rede estudada (PSDEE);
- (6) Os dados são enviados ao GIS que os interpreta e permite a visualização do PSDEE no ambiente GIS.

Na Figura 4 estão apresentadas: a modelagem e a ferramenta desenvolvidas no ambiente GIS para conversão dos dados entre o Banco de Dados GIS e o AG Especializado:

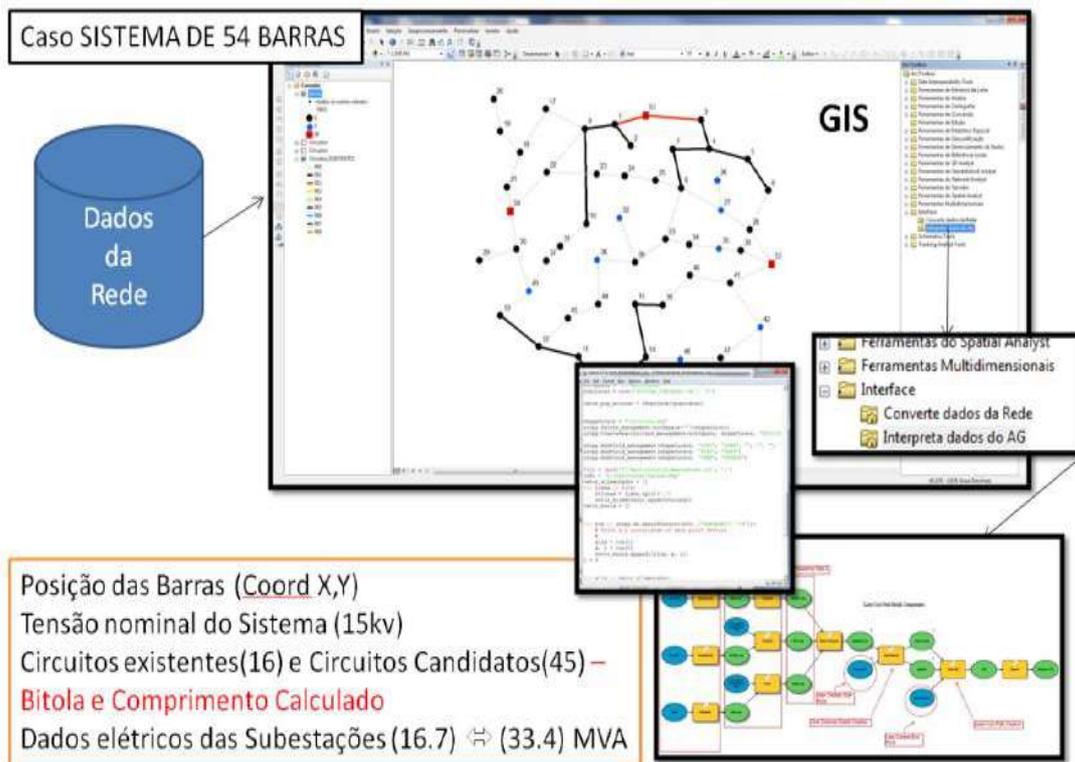


Figura 4 - Fluxo de trabalho da Interface GIS e AG Especializado  
 (fonte: Própria)

Podemos observar que na Figura 4, a esquerda e apresentado o banco de dados do ambiente GIS, onde serão armazenados os dados das redes de distribuição no formato GIS à serem planejadas. Ao Centro da figura, a interface homem máquina (IHM), ou a interface gráfica, onde são observados dados da rede identificados através de uma simbologia de cores representando o tipo de condutor de cada trecho de rede. A direita no canto inferior a modelagem e desenvolvimento em código em "python" (linguagem de programação), ambos idealizados para estabelecer um protocolo de comunicação (uma interface) entre o AG especializado e o Ambiente GIS.

## CAPÍTULO III - Revisão Bibliográfica

### III.1 – O PSDEE (Modelos Matemáticos)

As pesquisas mencionadas na literatura, disponibilizadas para a academia sobre PSDEE mostram um viés no desenvolvimento de modelos matemáticos e metodologias para projetar um plano de expansão otimizado com características de confiabilidade do sistema, ou seja, garantias que o fornecimento de energia necessária seja suprido.

Em Miranda, Ranito e Proença (MIRANDA, RANITO, & PROENÇA, 1994) e em Miguez, Cidras, Diaz e Dornelas (MIGUEZ, CIDRAS, DIAZ-DORADO, & GARCIA-DORNELAS, 2002) os custos associados ao grau de confiabilidade são implementados na função objetivo à otimizar.

Em Bernal (BERNAL-AGUSTÍN, 1998), Ramirez e Bernal (RAMIREZ-ROSADO & BERNAL-AGUSTIN, Feb. 2001), Cossi (COSSI, 2008), Pereira (PEREIRA-JUNIOR B. , 2014) e Pádua (PÁDUA, 2014) foram desenvolvidos modelos multiobjetivo que tratam o problema de planejamento em conjunto com a confiabilidade mensurada com base no custo de energia não suprida.

Em Radha e Rughooputh (RADHA, KING, & RUGHOOPUTH, 2003), propõe-se um modelo para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição, com o objetivo de minimizar as perdas ativas. Esta modelagem leva em conta as restrições de: as leis de "*Kirchhoff*" para corrente e para tensão, magnitude de tensão nas barras, limites de demanda, limite de fluxo de corrente, e restrição de radialidade.

Em Bueno, são elaboradas duas metodologias distintas. um utilizando a técnica denominada Busca Menor Energia, inspirada na técnica de Abertura sequencial de Chaves, e a outra, denominada Árvore de Aproximação, faz uso das ideias de árvore geradora de custo mínimo. Neste trabalho o problema é formulado como um problema de Programação Não Linear Inteiro Misto, e a radialidade é apresentada de forma implícita. O objetivo do método apresentado é reduzir as perdas ativas do sistema. (BUENO, 2005)

Em Carreno, Romero e Feltrin, que também propôs um modelo multiobjetivo as funções de custos com investimento e operação e custo com faltas são tratados paralelamente, (CARREÑO, ROMERO, & FELTRIN, 2008).

Em Rugtaicharoencheep e Sirisumarannukul, apresenta-se uma técnica de com base na Busca Tabu, uma Meta-heurística e um procedimento adaptativo auxiliar, que guia um algoritmo de busca local na exploração contínua dentro de um espaço de busca, ou seja, a partir de uma solução inicial, tenta-se avançar para uma outra solução (melhor que a anterior) na sua vizinhança até que se satisfaça um determinado critério de parada visando resolver o problema de reconfiguração de condutores trifásicos com carregamento desequilibrado, onde a função objetivo do problema é minimizar as perdas ativas do sistema elétrico, (RUGTAICHAROENCHEEP & SIRISUMRANNUKUL, 2010).

Em Lotero e Contreras, foi realizada uma avaliação dos índices de continuidade da rede de um conjunto de soluções encontradas na etapa de planejamento, adotando como conhecidas as taxas do número e duração de interrupções, (LOTERO & CONTRERAS, 2011).

Em Taylor, é proposto um modelo convexo quadrático para reconfiguração de sistemas de distribuição. A função objetivo é a minimização das perdas ativas e os modelos apresentam restrições quadráticas e cônicas de segunda ordem, (TAYLOR & HOVER, 2012).

Em Souza foi desenvolvida uma metodologia para a instalação de chaves de manobras no sistema de distribuição para realizar a restauração da rede em condições de contingências (SOUZA, 2011).

## **III.2 – Técnicas de Otimização**

### **III.2.1 – Otimização Clássica**

O problema de planejamento de sistemas de distribuição poder ser definido como um problema de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) após usarmos uma técnica de relaxação. Os poucos exemplos disponíveis na literatura que resolvem o problema de reconfiguração utilizando técnicas de programação matemática misturadas com heurísticas requerem maior tempo computacional, (SARFI, SALAMA, & CHIKHANIL, 1994), portanto não são muito utilizados.

Merlin e Back, apresentaram a uma solução do problema de reconfiguração para um sistema de 10 barras, utilizando a técnica de programação inteira de "*branch-and-*

*bound*" (Consiste em uma enumeração sistemática de todos os candidatos a solução, através da qual grandes subconjuntos de candidatos não aptos são descartados em massa utilizando os limites superior e inferior da quantia otimizada), encontrando uma proposta de topologia de boa qualidade em contrapartidas a com as perdas mínimas encontradas na solução do problema, (MERLIN & BACK, 1975).

No ano de 1990 o pesquisador Vlastimir Glamocanin resolveu o problema de reconfiguração de redes de distribuição, como um problema de transporte com custos quadráticos (GLAMOCANIN, 1990). Este método necessita de uma configuração inicial, que é obtida através da linearização das perdas. A partir desta configuração é utilizado o método "*Simplex*" para problemas quadráticos, a fim de melhorar a solução. Várias modificações foram inseridas no problema de transporte com custo quadrático como limites de tensão e correntes no sistema. Segundo o autor o método foi capaz de encontrar a solução ótima para o sistema de 10 barras (PEREIRA, 2010).

Abur apresentou uma formulação para o problema de reconfiguração como um problema de fluxo de custo mínimo do sistema de distribuição. Foram ignorados os limites de capacidade dos ramos, e o autor resolveu o problema utilizando o método de programação linear "*Simplex*" (A.ABUR, 1996); Este algoritmo fornece um sistema radial, que não viola os limites de capacidade das linhas e diminui as perdas ativas do sistema (A.ABUR, 1996) realizou testes com o sistema de 16 barras de Civanlar e Yin (CIVANLAR, GRAINGER, & YIN, 1988) e Abur (A.ABUR, 1996) realizou testes em um sistema de 10 barras.

### **III.2.2 – Heurísticas**

Uma das primeiras propostas de resolução do problema de reconfiguração utilizando métodos heurísticos foi apresentada no ano de 1975. Utilizou-se uma heurística desenvolvida pelos pesquisadores franceses Merlin e Back. Os autores apresentaram duas metodologias para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição, as quais foram: (1) metodologia desenvolvida como um algoritmo heurístico construtivo; (2) metodologia utilizando uma técnica de otimização clássica, (MERLIN & BACK, 1975).

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

malhado, ou seja, não existe radialidade no sistema. São estabelecidos os seguintes passos de resolução do problema:

(1). Resolve-se um problema de fluxo de carga e utiliza-se o ponto de operação encontrado;

(2). Calcula-se o fluxo de potência aparente nos ramos deste sistema;

(3). O ramo que possui o menor fluxo de potência aparente tem sua chave de interconexão aberta finalizando uma iteração do algoritmo heurístico construtivo;

(4). Um novo problema de fluxo de carga é resolvido, ou seja, novos fluxos de potência aparente são calculados, e então outra chave de interconexão do ramo que possui o menor fluxo de potência da configuração corrente é aberta.

O algoritmo heurístico construtivo finaliza quando encontra um sistema com topologia radial. Merlin e Back analisaram os resultados obtidos pela reconfiguração e observaram os seguintes aspectos positivos (MERLIN & BACK, 1975):

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

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

Em 1988 foi proposta por Civanlar (CIVANLAR, GRAINGER, & YIN, 1988) outra heurística conhecida como “troca de ramos” (*branch-exchange*). Neste método, o processo de busca proposto é o fechamento de uma chave de interconexão e a abertura

de outra, com o propósito de manter a radialidade do sistema. Sugere-se um mecanismo de filtragem para eliminar os chaveamentos que não reduzem as perdas ativas do sistema. Este mecanismo é a dedução de uma expressão matemática, utilizada para encontrar a redução da perda de potência através da transferência de carga. Este mecanismo fornece qual a melhor chave a ser fechada e qual será aberta em um sistema a fim de diminuir as perdas da rede. O método realiza uma busca a procura de um melhor chaveamento sem a necessidade de resolver problemas de fluxo de carga adicionais, utilizando apenas uma equação, (ZVIETCOVICH, 2006).

Na apresentação de Shirmohammadi (SHIRMOHAMMADI & HONG, 1989) o algoritmo dos autores Merlin e Back (MERLIN & BACK, 1975) foi modificado com a inserção do limite de tensão nos barramentos, limite de correntes nas linhas além de considerar no cálculo do fluxo de cargas as energias reativas. Mesmo com essas modificações o algoritmo calcula o fluxo de potência de uma rede com laços, o que não corresponde à condição normal de operação da rede.

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

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

O método heurístico para a resolução do problema de reconfiguração consiste em dois algoritmos, o de abertura sequencial de chaves e o de troca de ramos. A partir deles os pesquisadores desenvolveram diferentes métodos, uns com poucas diferenças, outros híbridos como em Gomes (GOMEZ, KHODR, OLIVEIRA, OCQUE, & YUSTA, 2004). Este algoritmo híbrido possui duas etapas. Na primeira todas as chaves de interconexão são fechadas. Partindo de um critério de abertura baseado no aumento da perda total do sistema, as chaves são sucessivamente abertas tornando-o radial. A segunda etapa é o refinamento da primeira através do algoritmo de troca de ramos. Este algoritmo híbrido foi comparado com o método de Shirmohammadi e Hong (SHIMOHAMMADI & HONG, 1989) e com o método de Goswami (GOSWAMI S. K., 1992) obtendo resultados compatíveis ou de melhor qualidade.

### **III.2.3 – Meta-Heurísticas**

As Meta-heurísticas são algoritmos que possuem estratégias que minimizam a convergência prematura em ótimos locais no processo de busca da melhor solução de um problema de otimização. Estas técnicas são utilizadas para resolver problemas combinatórios complexos e ganharam espaço nas pesquisas nas últimas décadas pela facilidade em tratar os problemas não lineares e inserir novas restrições ao modelo, embora não seja garantido encontrar o ponto ótimo da solução obtida.

A Meta-heurística teve seu início em 1951, com os trabalhos de Robbins e Monro (ROBBINS & MONRO, 1951) que apresentam métodos estocásticos de otimização, mas o termo Meta-heurística foi apresentado pela primeira vez em 1986 por Glover (GLOVER, 1986). A partir de então, surgiram várias propostas de procedimentos para resolver problemas que ampliam o campo de aplicação dos algoritmos heurísticos. As aplicações e a relevância das Meta-heurísticas vêm aumentando desde 1986, mas também se encontram trabalhos usando Meta-heurísticas realizados na década de setenta.

#### **III.2.3.1 – Algoritmo Genético**

O Algoritmo Genético (AG) se classifica entre as técnicas evolutivas propostas desde os anos de 1950 sendo originalmente idealizado por John Holland (Holland, 1975). Fundamenta-se na analogia com processos naturais de evolução, na qual, dada uma população inicial, os indivíduos com características genéticas melhor adaptadas têm mais chance de sobrevivência e de transmitirem seu código genético para os descendentes que

serão cada vez mais adaptados, enquanto os piores tendem a desaparecer, (RENDÓN, ZULUAGA, & OCAMPO, 2008).

Na aplicação do AG em problemas de otimização, o processo inicia gerando uma população inicial composta por um conjunto de indivíduos (possíveis soluções candidatas para o problema a ser otimizado), geralmente utilizando soluções aleatórias. Cada solução candidata da população inicial é mensurada por uma função de adaptação que indica o seu grau de qualidade para o problema a ser otimizado. A seguir, são selecionados os indivíduos que poderão reproduzir, sendo que os melhores (mais adaptados) têm maior chance de participarem desta etapa. Para a próxima etapa, os operadores genéticos, como a recombinação ("*crossover*") e a mutação, são aplicados, com o objetivo de que as características de adaptação adquirida pelas gerações anteriores sejam transmitidas e que os indivíduos gerados sejam diversificados para favorecer condições para uma eficiente exploração do espaço de busca, evitando assim convergência prematura. Assim, os algoritmos genéticos são estratégias que utilizam combinações e acumula um conhecimento histórico produzido pelos resultados que vão sendo obtidos ao longo do processo e que orienta a exploração do espaço de busca.

Resumidamente, o AG é composto das seguintes etapas:

- a) Especificar os parâmetros de controle (tamanho da população, taxas de recombinação e de mutação, dentre outras);
- b) Apresentar as especificidades do problema tais como: tipos de codificação e de seleção, maneira de estruturar a população inicial e manipular as restrições etc.;
- c) Obter uma população inicial que se torna a população corrente;
- d) Determinar o valor da função objetivo;
- e) Avaliar se o critério de parada foi satisfeito, caso positivo, parar, caso contrário, ir ao passo seguinte;
- f) Realizar a seleção;
- g) Realizar a recombinação;

- h) Realizar a mutação;
- i) Recompôr a população corrente para a próxima geração e voltar ao passo (d);

O AG é iniciado com a criação de uma população, composta por indivíduos ou cromossomos. Esses indivíduos são soluções candidatas para o problema. Cada indivíduo é avaliado quanto a sua aptidão. Após essa avaliação, a população é então submetida a uma série de operadores genéticos – seleção, reprodução e mutação – de forma gerar uma nova população onde, espera-se que, os mais aptos sobrevivem para compor a nova geração.

Os Algoritmos Genéticos (AG's) são técnicas heurísticas de otimização global. O termo heurístico se refere a sua característica de não necessariamente encontrar a solução ótima para o problema, mas tender a encontrá-la ou ficar próximo dela.

A primeira grande diferença entre os algoritmos genéticos (AG's) e os métodos tradicionais de busca e otimização: os AG's não se baseiam na técnica do gradiente, que segue a derivada de uma função objetivando encontrar seu máximo, como ocorre, por exemplo, na técnica *Hill Climbing*.

Na Figura 5 tem-se uma função hipotética, com dois máximos: um local e um global. Enquanto os algoritmos tradicionais partirão dos pontos iniciais e seguirão o gradiente da função até encontrar o primeiro máximo, podendo ficar retidos no máximo local, os AG's não tem essa dependência forte com o ponto inicial. Isso é resultado do fato dos AG's trabalharem com uma população, que não enxerga o gradiente. Ao encontrar um indivíduo mais apto de certo grupo, aplica o conceito de seleção natural e continua procurando uma solução mais apta.

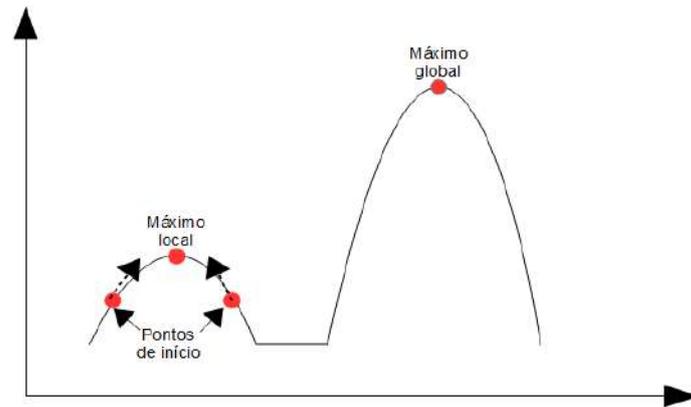


Figura 5– Função hipotética com máximo local e global

Os AG's operam sobre uma população de candidatos em paralelo. Dessa forma, podem realizar a busca em diferentes áreas do espaço de solução. Eles também se diferenciam dos métodos tradicionais ao utilizar regras de transição probabilísticas e não determinísticas. Apesar de sua característica probabilística, eles não aplicam a ideia de um caminho não direcionado. Suas buscas se baseiam em informações históricas do problema para encontrar a solução mais apta. Na Figura 6 está demonstrado o fluxograma básico de atividades de um AG tradicional simplificado apenas para ilustração.

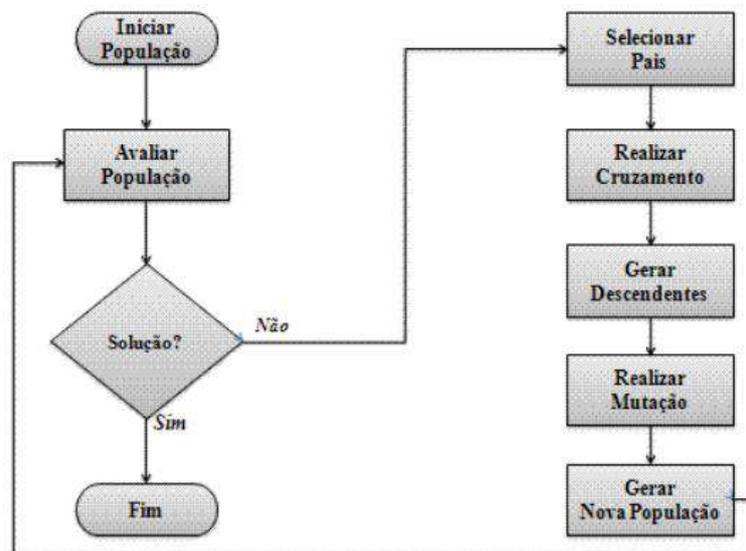


Figura 6 - Fluxograma de um algoritmo genético tradicional simplificado (fonte: Própria)

O algoritmo genético se inicia com a escolha da população inicial do problema. Geralmente a população inicial é definida aleatoriamente, permitindo assim, se obter uma boa distribuição de soluções por todo espaço de busca.

Dois aspectos são importantes para a implementação do algoritmo genético: as escolhas de uma representação dos indivíduos apropriada para o problema e de uma função avaliação (ou aptidão), que determine a qualidade de cada indivíduo como solução do problema e que também penalize as soluções inviáveis.

A codificação dos indivíduos em algoritmos genéticos pode ter qualquer formato que represente seu problema, em um vetor ou matriz., podendo conter símbolos, números reais ou inteiros. Como nas primeiras aplicações do método, um indivíduo pode ser representado por uma série de bits.

A função de avaliação determina a aptidão de cada indivíduo. Seria uma espécie de grau que fornece parâmetros de escolha para boas e más soluções do problema. É também denominada função custo, calculando um valor numérico que quantifica quão boa ou má é uma solução. Em muitos casos, é a única ligação do problema real com o algoritmo computacional.

Os operadores genéticos são aproximações computacionais que modificam o indivíduo, inspirados em eventos da natureza relacionados à seleção natural das espécies. A população é transformada ao longo de gerações até atingir um resultado satisfatório. No capítulo V os operadores implementados no algoritmo especializado desenvolvido neste trabalho serão detalhados.

### **III.2.3.2 – Recozimento Simulado**

A Meta-heurística Recozimento Simulado foi desenvolvida na década de 50 pelo pesquisador Metropolis para o processo de cristalização (N., 2009a). Mas apenas na década de 80 é que os pesquisadores, Kirpatrick, Gelatt e Vecchi (KIRKPATRICK, GELATT, & VECCHI, 1983) e Cerni (CERNY, 1985) independentemente notaram semelhanças entre o processo físico de cristalização e alguns problemas de otimização combinatória.

Recozimento é um tratamento térmico, utilizado pelos físicos na construção de cristais perfeitos. Aonde um material é exposto a altas temperaturas até o ponto de

liquefação e logo após é lentamente esfriado, mantendo durante o processo o chamado quase equilíbrio termodinâmico. O processo termina quando o material atinge um estado de energia mínimo, no qual se transforma em um cristal perfeito.

O algoritmo Recozimento Simulado simula um processo semelhante ao Recozimento, para encontrar a configuração ótima de um problema complexo. Os pesquisadores observaram que a mudança do estado físico do material, pode ser comparada ao espaço de solução de um problema de otimização. A energia livre do material é comparada com a função objetivo do problema e a temperatura do processo físico se torna simplesmente um parâmetro de controle a ser determinado para conseguir os resultados desejados.

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

### **III.2.3.3 – Colônia de Formigas**

Em 1992 surgiu uma nova meta-heurística chamada colônia de formigas ou ACO do inglês "*Ant Colony Optimization*". Esta Meta-heurística descreve o comportamento de uma colônia de formigas, utilizando este comportamento para resolver problemas complexos. As formigas são capazes de selecionar o menor caminho para uma determinada fonte de alimento de forma cooperativa, utilizando uma substância chamada feromônio. Esta técnica empregada pelas formigas foi que deu a origem a esta Meta-heurística.

Esta Meta-heurística surgiu em 1992, no Ph.D. de Marco Dorigo, mais somente no ano de 1996 foi publicada a Meta-heurística (DORIGO, MANIEZZO, & COLORNI,

1996). Nesta Meta-heurística são espalhadas formigas artificiais (chamadas de agentes) dentro do conjunto de soluções que cooperam entre si para encontrar soluções “ótimas” para problemas de otimização discretos e complexos. No trabalho de Dorigo para demonstrar a eficiência do método, os autores resolveram um problema clássico de otimização, o problema do caixeiro viajante, onde foi inserido uma população de agentes com orientações diversas, dirigidas por uma força gananciosa (feromônio). Os agentes escolhem o caminho que possui a maior quantidade de feromônio e quando o caminho é escolhido a quantidade de feromônio neste é reforçada. Desta forma os agentes interagem indicando o melhor tour possível para o problema. Os autores compararam o método com as Meta-heurísticas Recozimento Simulado e Busca Tabu para a resolução de problemas de otimização.

A metaheurística em questão será detalhada separadamente, pois faz parte da metodologia aqui desenvolvida para a solução do PSDEE.

#### **III.2.3.4 – Busca Tabu**

Na década de 80 surgiu o algoritmo busca tabu, uma nova Meta-heurística proposta pelo pesquisador Fred Glover (GLOVER, 1986). Este novo método possui conceitos de inteligência artificial, com conjuntos de funções que de forma integrada, permitem resolver um problema complexo de maneira inteligente. Este método se difere dos outros por não ter uma origem relacionada com processo de otimização biológico ou químico, (LUCERO, 2004).

Este método consiste em guiar e modificar outras heurísticas, de modo a produzir soluções além das que seriam geradas normalmente em uma busca local. Inicialmente o método parte de uma solução inicial e progride iterativamente de uma solução para outra até satisfazer algum critério de parada. Cada solução pertencente ao conjunto de soluções do problema tem associada uma vizinhança dentro do mesmo conjunto. Nesta vizinhança é realizada uma busca para encontrar uma solução de melhor qualidade, esta operação é chamada de movimento.

A solução final obtida utilizando este método é chamada de ótimo local por ser a melhor de todas as soluções dentro da vizinhança. Como consequência, na maioria dos casos não se encontra o ótimo global do conjunto solução. O algoritmo de busca tabu se distingue dos algoritmos de busca local por dois aspectos fundamentais (GUIMARÃES,

LORENZETI, & A., 2004c). O primeiro aspecto trata-se do processo de movimento, basicamente na passagem da solução corrente para a próxima solução. Esta nova solução pode ter a melhor configuração da vizinhança ou a melhor dentre as visitadas, o que indica que o método permite uma degradação de qualidade. Com isto o algoritmo pode sair de ótimos locais e continuar uma procura por um melhor resultado.

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

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

### **III.2.3.5 – GRASP**

GRASP do inglês, "*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*", é uma Meta-heurística baseada em um algoritmo heurístico construtivo do tipo guloso, porém que utiliza uma componente aleatória e adaptativa. Esta Meta-heurística é utilizada para resolver problemas complexos e de grande porte. Ela foi apresentada por Thomas, (THOMAS A. FEO, 1996).

A Meta-heurística GRASP é basicamente uma evolução dos algoritmos heurísticos construtivos. Um algoritmo heurístico construtivo tem como finalidade construir uma solução factível passo a passo utilizando um indicador de sensibilidade para indicar qual a melhor componente para ser introduzida na solução. A principal diferença destas metodologias GRASP e AHC (Algoritmo Heurístico Construtivo) é a aleatoriedade que o algoritmo GRASP possui para escolher uma componente que será adicionada à solução. A escolha aleatória dessa componente tem a finalidade de atender

o caráter guloso do algoritmo heurístico construtivo e a aplicação dessa metodologia permite encontrar muitas soluções factíveis e de boa qualidade

### **III.3 – Técnicas de Otimização na Solução do PSDEE**

Na literatura são encontrados muitos trabalhos utilizando técnicas Meta-heurísticas para solução do problema de PSDEE, abaixo estão relacionados alguns trabalhos e suas referências:

- Busca em Vizinhança Variável (VNS) (SOUZA, 2011);
- Algoritmos Genéticos (BERNAL-AGUSTÍN, 1998), (MIRANDA, RANITO, & PROENÇA, 1994), (CARREÑO, ROMERO, & FELTRIN, 2008) e (ROMERO & LAVORATO, 2012);
- Recozimento Simulado (JONNAVITHULA & BILLINTON, 1996), (PARADA, FERLAND, ARIAS, & DANIELS, 2004) E (NAHMAN & PERIC, 2008);
- Colonia de Formigas (GOMEZ, KHODR, OLIVEIRA, OCQUE, & YUSTA, 2004);
- Tabu Search (BAYKASOGLU, OWEN, & GINDY, 1999), (COSSI, 2008), (BAQUERO, 2012) e (PEREIRA-JUNIOR B. , 2014);
- Particle swarm optimization (PSO) (GANGULY & SAHOO, 2009);
- Busca Dispersa (PÁDUA, 2014).

O trabalho pioneiro sobre PSDEE encontrado na literatura foi o de Knight (KNIGHT, 1960) que propôs a utilização da programação inteira para resolver este problema de planejamento da distribuição.

Na literatura há vários trabalhos que tomam a subestação como elemento principal do PSDEE, como em Crawford e Holt (CRAWFORD & HOLT, 1974) que propôs um modelo mono-objetivo para obter a melhor localização, dimensão e a região de serviço das subestações. O trabalho em referência utilizou um modelo de programação inteira

para minimizar a soma dos produtos das distâncias das subestações até os pontos de carga pela respectiva potência fornecida para este ponto pela subestação.

A partir da década de 1990 são encontradas com bastante frequência na literatura especializada as heurísticas e Meta-heurísticas como técnica de solução para resolver o planejamento do sistema de distribuição de energia elétrica.

Em 1994, Miranda, Ranito e Proença, utiliza-se o algoritmo genético para resolver o problema do PSDEE modelado como um PNLIM mono-objetivo e multiestágio. O modelo visa minimizar os custos com investimentos, perdas e custos associados com o grau de confiabilidade e desvio de tensão das barras do sistema. O horizonte de planejamento foi dividido em três estágios de planejamento, sendo classificado pela literatura como pseudodinâmico. O modelo e o algoritmo são testados em um sistema de 54 barras, o qual foi posteriormente utilizado em várias pesquisas presentes na literatura, (MIRANDA, RANITO, & PROENÇA, 1994).

Em 1992, no trabalho de Goswami o problema de PSDEE foi modelado como um PNLIM cujo objetivo foi minimizar os custos com investimentos e com as perdas resistivas do sistema. Para resolver o problema foi utilizado uma técnica heurística denominada de "*Branch Exchange*" (BE). Inicialmente é gerada uma solução de topologia radial por meio de conexões uma a uma das barras às subestações previamente determinadas, seguindo critérios associados com a distância entre cada barra e as subestações, (GOSWAMI S. K., 1992).

A técnica de troca de ramos, consiste em adicionar um ramo não pertencente a uma topologia radial que resulta na formação de uma malha na configuração presente e a seguir é escolhido um ramo para ser retirado do sistema e produzir soluções de melhor qualidade. As trocas de ramos ocorrem em duas etapas: realizando troca de ramos entre ramos ligados na mesma subestação (intrazona) e entre ramos ligados em subestações adjacentes (interzona).

Em 1998, Bernal e Agustin utilizou o Algoritmo Genético para resolver o problema do PSDEE mono e multiobjetivo, numa formulação não linear, com o objetivo de minimizar os custos de investimentos e operação da rede e adicionalmente foram incluídos os custos com confiabilidade, por meio da avaliação da energia não suprida (EENS). A codificação deste trabalho é inteira, com duas sequências de caracteres, a

primeira se relaciona aos circuitos e a segunda às subestações, que permite a inserção de vários tipos de condutores e capacidades de subestações. Com este modelo apresentado, foi possível realizar tanto o planejamento estático como o multiestágio, (BERNAL-AGUSTÍN, 1998).

Em 2001, Ramirez e Bernal foi proposta uma metodologia de otimização multiobjetivo não linear inteiro misto, para minimizar os custos com investimentos (fixos e variáveis) e confiabilidade do sistema, simultaneamente. Para mensurar a confiabilidade do sistema foi utilizado o conceito de subestações e condutores fictícios que fornecem a energia não suprida no caso de falta no sistema. A técnica de solução utilizada para resolver o problema é um algoritmo evolutivo multiobjetivo, (RAMIREZ-ROSADO & BERNAL-AGUSTIN, Feb. 2001).

Em 2002, Miguez, Cidras, Dias e Garcia propôs uma versão melhorada da técnica heurística de "*Branch Exchange*", para obter uma configuração ideal dos condutores de média tensão e a potência instalada nas subestações, sendo conhecidas a localização geográfica dos pontos de carga e das subestações e a demanda de potência dos consumidores. O problema foi modelado como um PNLIM que teve como objetivo minimizar os custos de investimento com infraestrutura e com perdas de potência ativa, bem como os custos com a confiabilidade mensurado com base no somatório dos produtos entre o coeficiente do custo com confiabilidade, o fluxo de corrente em cada circuito e seus respectivos cumprimentos. Os cálculos de confiabilidade foram feitos considerando apenas o disjuntor colocado na saída da subestação. As restrições consideradas para o problema são: limite da queda de tensão ocorrida nos ramos, a radialidade e o número máximo anual de interrupções permitidas, (MIGUEZ, CIDRAS, DIAZ-DORADO, & GARCIA-DORNELAS, 2002).

Em 2004, Carpaneto e Chicco apresentaram um método de reconfiguração baseado na estrutura do AS. O método utiliza um procedimento construtivo durante o ciclo, que intrinsecamente garante que as topologias encontradas durante todo o processo são radiais. O algoritmo foi aplicado a dois sistemas de distribuição de 33 e 44 barras e seus resultados foram comparados com outros três métodos, sendo eles métodos de Melhoria Iterativa, Recozimento Simulado e Busca Tabu. Segundos os autores, todos os métodos convergiram à mesma resposta, mas o AS particularmente convergiu em menos tempo comparado aos outros métodos(CARPANETO & CHICCO, 2004).

Su, Chang e Chiou utilizaram o algoritmo ACS para reconfiguração de sistemas de distribuição. Junto com o feromônio, os autores utilizaram o tamanho das linhas como heurística para guiar a busca dos agentes. O método foi aplicado a dois sistemas de distribuição de 33 e 94 barras e seu desempenho foi comparado com o de dois métodos, um baseado em Algoritmos Genéticos e outro em Recozimento Simulado. Segundo os autores, o método baseado no ACS produziu as melhores respostas e em menor tempo, (SU, CHANG, & CHIOU, 2005).

Ainda em 2005, Khan e Ravichandran apresentaram um trabalho onde também utilizaram o algoritmo ACS para a reconfiguração. Os autores utilizaram na regra de transição o inverso das perdas nas linhas como heurística de busca. O cálculo destas perdas é realizado para todas as linhas do sistema no início de cada ciclo. O método foi aplicado a um sistema de transmissão de 14 barras e, segundo os autores, foi encontrada a topologia que apresenta o menor valor de perdas ativas, (L., KHAN, & RAVICHANDRAN, 2005).

Ainda em 2005, Ahuja e Pahwa utilizaram uma nova estrutura para utilização do AS no problema de reconfiguração, denominada Estrutura de Hiper-cubo. Esta nova estrutura, além de melhorar a qualidade das soluções encontradas durante o processo de busca, tornou o algoritmo mais robusto, (AHUJA & PAHWA, 2005).

No mesmo ano, Skok, Krajcar e Skrlec foi propuseram um planejamento multiestágio com malhas abertas estruturadas, incluindo geração distribuída conectada à rede sob condições de incerteza. Como técnicas de solução foram utilizados dois algoritmos evolucionários interdependentes (um mestre e outro escravo) para resolver simultaneamente o problema com custos usualmente utilizados no planejamento e com a confiabilidade alcançada. A confiabilidade foi tratada no modelo de forma explícita com base na avaliação econômica dos índices de confiabilidade EENS, FEC e DEC e de forma implícita na escolha da configuração que indica os locais ideais para se alocar os ramais de reserva para atingir o melhor grau de confiabilidade com menor custo de investimento e operação. A metodologia foi testada em um sistema baseado nos dados reais de distribuição de uma cidade, (SKOK, KRAJCAR, & SKRLEC, 2005).

Em 2005, Ahuja e Pahwa, propuseram um método híbrido combinando os conceitos de Sistemas Imunológicos Artificiais (AIS) e ACO. O algoritmo AIS gera uma

população de soluções candidatas, chamadas de anticorpos, enquanto o ACO reforça, através do feromônio, as melhores soluções, guiando o processo de geração de topologias para soluções ainda melhores. Utilizando-se de uma tabela de feromônio nas linhas, criada durante o processo de reconfiguração, o método foi aplicado ao problema de restabelecimento de energia, ou seja, a reconfiguração do sistema de distribuição após uma contingência, gerando boas configurações de forma rápida e eficaz, (AHUJA & PAHWA, 2005).

Em 2006, Carrano, Soares, Takahashi, Saldanha e Neto apresentaram um modelo matemático multiobjetivo para o problema de PSDEE, com duas funções objetivo, a primeira está relacionada com os custos monetários com investimentos com circuitos e subestações, manutenção e operação e a segunda com os custos com as interrupções (número e tempo de duração). Para resolver o problema foi utilizado um algoritmo genético multiobjetivo e os conceitos da fronteira ótima de Pareto, (CARRANO, SOARES, TAKAHASHI, SALDANHA, & NETO, 2006).

Em 2006, Khoa apresentou um algoritmo ACS híbrido para melhorar o desempenho do ACS. Neste algoritmo, os agentes fazem uso de duas regras de transição combinadas: (1) a regra de transição clássica, mas sendo função apenas da quantidade de feromônio das linhas e (2) uma regra baseada na lógica “fuzzy”, que atribui valores a cada chave do sistema de acordo com uma função trapezoidal, indicando o grau de pertinência que cada uma tem na escolha dos agentes. Esta função, baseada no conhecimento dos operadores de sistemas de distribuição, parte do seguinte princípio: chaves próximas das subestações têm pouca probabilidade de serem escolhidas pelos agentes, enquanto que as chaves mais distantes têm maior probabilidade. Foram feitas comparações com três métodos baseados no ACS clássico, Algoritmos Genéticos e Recozimento Simulado. Todos obtiveram as mesmas respostas (ótimos locais) para os testes, sendo que o ACS híbrido foi o mais rápido, (KHOA, 2006).

Carpaneto e Chicco associaram o algoritmo “*Hyper-cube framework-ACO*” com a técnica “*branchexchange*”(CIVANLAR, GRAINGER, & YIN, 1988), para obter respostas melhores e mais rápidas. Ambos os métodos foram testados em um sistema de 33 barras e comparados com outros métodos conhecidos da literatura, (CARPANETO & CHICCO, 2004).

Em 2008, Cossi foi propôs um planejamento integrado do sistema de distribuição primário (média tensão) e secundário (baixa tensão). O modelo de planejamento do sistema de distribuição primário foi abordado como um problema de programação não linear inteiro misto (PNLIM) estático multi-objetivo, com duas funções objetivo, uma relacionada com custos com construção/recondutoramento dos circuitos, ampliação/construção de subestações, alocação de chaves e ramais de interconexão entre os condutores e perdas resistivas e a outra com a confiabilidade do sistema por meio dos custos de energia não suprida. Como técnica de solução para o problema foi utilizado um algoritmo "Tabu Search" (TS) reativo em que os múltiplos objetivos são considerados utilizando os conceitos de soluções não dominadas para encontrar a fronteira ótima de Pareto, (COSSI, 2008).

Para o planejamento dos circuitos secundários o modelo é formulado também como um (PNLIM) resolvido por um algoritmo TS, em três etapas:

- A primeira refere-se ao balanceamento das cargas nas fases do circuito;
- A segunda está relacionada a alocação, capacidade e quantidade de transformadores que compõem a rede;
- A terceira define as rotas e o tipo dos condutores dos circuitos secundários.

Para integrar o planejamento dos sistemas de média e baixa tensão foi utilizada uma técnica heurística orientada por um conjunto de regras usualmente utilizadas para se realizar as conexões entre a rede primária e a secundária do sistema de distribuição de energia elétrica.

Em 2008, Ghorbani, Hosseinian e Vahidi propuseram uma nova estratégia de seleção de chaves para minimizar as perdas de um sistema de distribuição utilizando o ACS. Nesta estratégia, os agentes trabalham o número mínimo de chaves que devem ficar abertas para que o sistema de distribuição seja radial. Desta forma, o espaço de busca é diminuído, fazendo com que a geração de novas topologias para o sistema seja mais rápida. O método foi aplicado em três sistemas de distribuição de 16, 33 e 69 barras, obtendo boas soluções, (GHORBANI, HOSSEINIAN, & VAHIDI, 2008).

Hu introduziu em 2008, modificações nas regras de transição e atualização de feromônio do algoritmo ACS, baseadas nas características estruturais do sistema, simplificando e diminuindo o espaço de busca por configurações ótimas, evitando mínimos locais. O método foi aplicado a um sistema de 69 barras e comparado com o ACS básico, obtendo soluções melhores e em um número menor de ciclos, (HU, 2008).

No mesmo ano, Chang propôs o algoritmo ACS para resolver os problemas de reconfiguração e alocação de capacitores simultaneamente. Para isto, o espaço de busca foi composto por pontos que representam tanto as barras do sistema como os bancos de capacitores relativos a cada barra. A primeira parte da busca é feita para a escolha do banco de capacitores que deve ser adicionado a cada barra. Esta busca é baseada na concentração de feromônio de cada banco de capacitores e no custo de implantação deste banco. A segunda parte é feita para escolher quais chaves devem ser abertas para formar uma topologia radial, baseadas na concentração de feromônio de cada chave e no inverso do comprimento da linha que está chave está alocada. O método foi aplicado a dois sistemas de distribuição de 16 e 94 barras e comparado com os métodos de Algoritmos Genéticos e Recozimento Simulado, obtendo um melhor desempenho que estes dois métodos, (CHANG, 2008).

Em 2010, Oliveira apresentou um modelo de planejamento do sistema de distribuição de energia elétrica estático integrado com instalação de capacitores e reguladores de tensão, com o objetivo de minimizar os custos com: construção/repotenciação de subestações, construção/recondutoramento de circuitos, perdas ativas, operação das subestações, instalação de banco de capacitores fixos e de reguladores de tensão. O problema é modelado como um PNLIM e para resolvê-lo foram implementados um AHC e um Algoritmo "*Branch and Bound*" não linear (OLIVEIRA, 2010).

Em 2001, Lotero e Contreras apresentou uma formulação para o problema de PSDEE multiestágio. A função objetivo a ser minimizada é o valor presente líquido dos custos com adição/recondutoramento de circuitos e instalação/ampliação de subestações, operação associado as perdas resistivas nos circuitos e subestação e manutenção da rede. A função não linear foi aproximada em partes por uma função linear, resultando em um modelo linear inteiro misto que é resolvido usando o solver GAMS/CPLEX. O modelo encontra um conjunto de soluções para o PSDEE e em seguida são determinados os

índices de confiabilidade CIF (*Customer Interruption Frequency*), CID (*Customer Interruption Duration*), EENS (*Expected Energy Not Served*), SAIFI (*System Average Interruption Frequency Index*), SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*), ASAI (*Average System Availability Index*) para cada estágio do horizonte de planejamento das soluções encontradas. São calculados os custos associados à violação dos valores dos referidos indicadores tomando como referência os limites estabelecidos pelo órgão regulador, (LOTERO & CONTRERAS, 2011).

Em Souza, 2011, foi apresentado um modelo que visa minimizar os custos com investimento fixos (adição/recondutoramento de circuitos e ampliação/construção de subestações) e investimentos variáveis (perdas e operação da subestação) para o problema de PSDEE em uma única etapa no horizonte de planejamento, sujeito às restrições físicas e operacionais. Para obter o plano otimizado de expansão o processo de solução inicia com uma solução de boa qualidade obtida por um AHC e a seguir é aplicada a Meta-heurística de Busca em Vizinhança Variável (VNS). A metodologia foi testada para os sistemas de 23, 54, 136, 202 e 417 barras, (SOUZA, 2011).

Em 2012, Baquero propôs uma metodologia para resolver o problema de PSDEE baseada em uma estratégia de decomposição em subproblemas de seleção das subestações, solução de problemas de reconfiguração e seleção de condutores dependentes. O problema foi modelado como um PNLIM mono-objetivo que permite realizar tanto o planejamento estático como o multiestágio (pseudodinâmico e dinâmico). Para resolver o modelo foi utilizada a Meta-heurística Busca Tabu em conjunto com algoritmos heurísticos especializados desenvolvidos para cada subproblema. As ações previstas para o planejamento são: construção e/ou ampliação de capacidade das subestações, alocação e dimensionamento dos circuitos. O modelo utilizado teve como objetivo minimizar os custos com construção e/ou recondutoramento de circuitos, ampliação e/ou construção de subestações e custos anuais com perdas de energia resistiva atendendo as restrições físicas e operacionais. Foram testados os sistemas de 54 e 417 barras na perspectiva do planejamento estático, pseudodinâmico e dinâmico. A estratégia de decomposição em subproblemas permitiu o uso de programação paralela que reduziu significativamente o tempo computacional usualmente utilizado para resolver problemas desta natureza, (BAQUERO, 2012).

Em 2014, Pereira propôs modelos de planejamentos da expansão a curto e a longo prazo modelados como um PNLIM multiobjetivo. O modelo de curto prazo utilizado considera as ações usualmente utilizadas pelas concessionárias, isto é, a alocação de banco de capacitores, reguladores de tensão e recondutoramento dos circuitos existentes. Este modelo é composto por duas funções objetivo, a primeira busca manter o mais próximo possível os níveis de tensão das barras da tensão de referência e a segunda está relacionada com custos com instalação de banco de capacitores, reguladores de tensão, recondutoramento de circuitos existentes e custos com as perdas de energia.

Como técnica de solução foi utilizado o Algoritmo Genético multiobjetivo especializado. As ações ao longo prazo consideradas são: a reponteciação e/ou construção de subestações, construção e/ou recondutoramento de circuitos, possibilidade de reconfiguração da rede; alocação de chaves de manobras, construção de ramais de interconexão e alocação de geradores distribuídos. O horizonte de planejamento foi dividido em estágios, que foi resolvido na perspectiva do planejamento multiestágio dinâmico. Foram consideradas duas funções objetivo, a primeira está relacionada com os custos de investimento fixos e variáveis relacionada às ações ao longo prazo e a segunda se refere à confiabilidade do sistema com base no custo de energia não suprida. Este modelo foi resolvido por meio do algoritmo Busca Tabu multiobjetivo utilizando os conceitos de soluções não dominadas para encontrar a fronteira ótima de Pareto, (PEREIRA-JUNIOR B. , 2014).

No mesmo ano, Pádua (PÁDUA, 2014) utilizou o Algoritmo Busca Dispersa para resolver três modelos do PSDEE formulados como PNLIM. O primeiro modelo realiza o planejamento a curto prazo permitindo ações como construção e/ou recondutoramento dos circuitos e instalação e /ou ampliação de capacidade das subestações. Este modelo é estático mono-objetivo e visa definir quais circuitos serão construídos e/ou recondutorados e quais subestações serão construídas e/ou terão sua capacidade ampliada com menor custo sujeito a um conjunto de restrições físicas, operacionais e econômicas. O segundo modelo também é mono-objetivo e o planejamento realizado é multiestágio dinâmico sendo que as ações consideradas são as mesmas do primeiro modelo com o adicional que define quando estas ações serão realizadas. O terceiro modelo formulado é multiestágio (dinâmico) e multiobjetivo com o objetivo de inserir a confiabilidade no problema mensurada com base nos custos da energia não suprida. Os modelos propostos

são resolvidos por meio da Meta-heurística Busca Dispersa e foram testados os sistemas de 54 e 417 barras.

Neste capítulo foram apresentadas as principais referências pesquisadas durante o desenvolvimento deste trabalho. A revisão da literatura realizada permitiu caracterizar como as pesquisas realizadas até o momento vêm tratando os modelos e técnicas de solução para resolver o problema de PSDEE. No próximo capítulo será apresentado o modelo matemático utilizado neste trabalho.

## **CAPÍTULO IV - Formulação Matemática para Solução do Problema do PSDEE**

Neste capítulo serão apresentados o modelo matemático e os mecanismos que utilizados para resolver o PSDEE, abordando conceitos teóricos referentes ao conceito e adoção de sistemas radiais e aplicação dos estudos de fluxo de potência.

A formulação foi elaborada baseando-se nos trabalhos de (OLIVEIRA, 2010), (BAQUERO, 2012), (HAFFNER & BARRETO, 2006) e (BERNAL-AGUSTÍN, 1998) no que se refere a função objetivo e às restrições técnicas e operacionais.

### **IV.1 – Formulação Matemática do PSDEE**

O problema do PSDEE tem o objetivo principal de determinar quais mudanças serão necessárias em uma rede de distribuição, para forma atender a condições de demanda presente/futura em um cenário de consumo de energia ampliado, satisfazendo aos critérios técnicos de operação, segurança e confiabilidade, buscando minimizar custos de investimento e de operação. Portanto, o problema consiste em, dado um sistema elétrico de distribuição existente (uma topologia de rede de distribuição que contempla circuitos elétricos e subestações), determinar quais alterações devem ser realizadas neste sistema para atender condições demanda, presente e futura, predeterminadas. Sendo assim o Problema de PSDEE será modelado como um problema de PNLIM (Programação não Linear Inteira Mista), com o objetivo principal de minimizar custos de investimentos e de operação, submetido a restrições relacionadas às condições operacionais, físicas e de confiabilidade do sistema. Como já citado anteriormente, no Capítulo II, os modelos de planejamento propostos serão o planejamento estático e dinâmico em múltiplos estágios.

As variáveis inteiras avaliadas no PSDDE representam a construção/recondutoramento de circuitos e a construção/repotenciação de subestações e as variáveis contínuas estão associadas às variáveis relacionadas ao estado de operação da rede de energia elétrica. Como o processo é realizado ao longo de um horizonte de planejamento, os custos são atualizados em valores equivalentes a uma data de referência para que seja possível compará-los. As alterações nos ramos e subestações em qualquer um dos estágios do horizonte de planejamento consideradas neste trabalho são:

- Construção de novos circuitos;
- E/OU Recondutoramento de circuitos existentes;

- E/OU Desconexão de circuitos existentes;
- Ampliação de capacidade de subestações existentes;
- E/OU Construção de novas subestações;

Esta formulação foi elaborada baseando-se nos trabalhos de Camargo (2014), Oliveira (2010), Baquero (2012), Haffner et al. (2006) e Bernal-Agustín (1998) no que se refere a função objetivo e às restrições técnicas e operacionais.

#### IV.1.1 – Modelagem Matemática aplicada ao PSDEE

O modelo básico do problema de planejamento da expansão de redes de distribuição foi formulado pela minimização da função objetivo de custos apresentada na equação (1) e sujeitas às restrições representadas pelas equações (6) a (21):

$$\min f = \sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+i)^{p(t)}} \left[ \begin{aligned} & \sum_{ij \in \Omega_l} \sum_{a \in \Omega_a} (c_{ij,a,t} n_{ij,a,t} l_{ij}) + \sum_{i \in \Omega_{bs}} \sum_{a \in \Omega_{ts}} (c_{sib} m_{i,b,t}) + \\ & \delta_{l_t} \sum_{ij \in \Omega_l} \sum_{a \in \Omega_a} \beta_{ij,a,t} g_{ij,a} (V_{i,t}^2 + V_{j,t}^2 - 2 V_{i,t} V_{j,t} \cos \theta_{ij,t}) + \\ & \delta_{s_t} \sum_{ij \in \Omega_l} \alpha_{i,b,t} (P_{s_{i,t}}^2 + Q_{s_{i,t}}^2) \end{aligned} \right] \quad (1)$$

onde,

$$\sum_{ij \in \Omega_l} \sum_{a \in \Omega_a} (c_{ij,a,t} n_{ij,a,t} l_{ij}), \text{ são os custos de referente aos Circuitos (IC).} \quad (2)$$

$$\sum_{i \in \Omega_{bs}} \sum_{a \in \Omega_{ts}} (c_{sib} m_{i,b,t}), \text{ são os custos referentes as Subestações (IS).} \quad (3)$$

$$\sum_{ij \in \Omega_l} \sum_{a \in \Omega_a} \beta_{ij,a,t} g_{ij,a} (V_{i,t}^2 + V_{j,t}^2 - 2 V_{i,t} V_{j,t} \cos \theta_{ij,t}), \text{ são os custos das Perdas (CP).} \quad (4)$$

$$\delta_{s_t} \sum_{ij \in \Omega_l} \alpha_{i,b,t} (P_{s_{i,t}}^2 + Q_{s_{i,t}}^2), \text{ são os custos de Operação (CO).} \quad (5)$$

As restrições para a minimização dada pela equação (1) são:

$$P_{i,t} - P_{s_{i,t}} + P_{D_{i,t}} = 0 \quad \forall i \in \Omega_b, \forall t \in T' \quad (6)$$

$$Q_{i,t} - Q_{s_{i,t}} + Q_{D_{i,t}} = 0 \quad \forall i \in \Omega_b, \forall t \in T' \quad (7)$$

$$V_{min} \leq V_{i,t} \leq V_{max} = 0 \quad \forall i \in \Omega_b, \forall t \in T' \quad (8)$$

$$P_{s_{i,t}}^2 + Q_{s_{i,t}}^2 \leq (m_{i,b,t} \bar{S}_{i,b})^2 \quad \forall i \in \Omega_{bs}, \forall b \in \Omega_{ts}, \forall t \in T' \quad (9)$$

$$P_{ij,a,t}^2 + Q_{ij,a,t}^2 \leq (\beta_{ij,a,t} \bar{S}_{i,a})^2 \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall b \in \Omega_a, \forall t \in T' \quad (10)$$

$$\sum_{a \in \Omega_a} n_{i,j,a,t} \leq 1 \quad \forall i \in \Omega_l, \forall t \in T' \quad (11)$$

$$\sum_{b \in \Omega_b} m_{i,j,b,t} \leq 1 \quad \forall i \in \Omega_{bs}, \forall t \in T' \quad (12)$$

$$n_{i,j,a,t} \in \{0,1\} \quad \forall i,j \in \Omega_l, \forall a \in \Omega_a, \forall t \in T' \quad (13)$$

$$m_{i,j,a,t} \in \{0,1\} \quad \forall i \in \Omega_{bs}, \forall a \in \Omega_{ts}, \forall t \in T' \quad (14)$$

$$\sum_{i,j \in \Omega_l} \sum_{a \in \Omega_a} \beta_{i,j,a,t} = nb - nbs \quad \forall t \in T' \quad (15)$$

$$\beta_{i,j,a,t} \leq \sum_{h=1} m_{i,j,b,t} \quad \forall i,j \in \Omega_l, \forall a \in \Omega_a, \forall t \in T' \quad (16)$$

$$\alpha_{i,b,t} \leq \sum_{h=1} m_{i,j,b,t} \quad \forall i \in \Omega_{bs}, \forall a \in \Omega_{ts}, \forall t \in T' \quad (17)$$

$$FIC_{i,t} \leq FIC_p \quad \forall i \in \Omega_b, \forall t \in T' \quad (18)$$

$$DIC_{i,t} \leq DIC_p \quad \forall i \in \Omega_b, \forall t \in T' \quad (19)$$

$$FECK_{i,t} \leq FEC_p \quad \forall i \in \Omega_b, \forall t \in T' \quad (20)$$

$$DECK_{i,t} \leq DEC_p \quad \forall i \in \Omega_b, \forall t \in T' \quad (21)$$

Todas as notações das variáveis usadas neste capítulo foram listadas e descritas no início desta dissertação para facilitar e fazer fluir o texto, já que são inúmeras.

A equação (1) corresponde a minimização do valor presente líquido dos custos fixos referentes aos investimentos com construção e ampliação da capacidade de circuitos (*IC*) e construção e ampliação da capacidade das subestações (*IS*), mais os custos de operação que estão relacionados aos custos de perdas ativas nos ramos (*CP*) e de operação nas subestações (*CO*), considerando os *T* estágios do horizonte de planejamento.

O fator  $TVP = \sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+I)^{p(t)}}$  atualiza os custos de investimentos e de operação de cada estágio *t* ao valor presente, sendo *I* a taxa de juros e *p(t)* o ano de início do estágio *t* a partir de um referencial adotado como base.

As variáveis  $c_{ij,a,t}$  e  $c_{sib}$  representam o custo de construção das alternativas de ramos e subestações. As variáveis de decisão  $n_{ij,a,t}$  e  $m_{i,b,t}$  indicam respectivamente, as alterações ocorridas nos ramos do sistema (construção de novos ou recondutoramento de ramos pré-existentes) e nas barras do sistema (construção ou ampliação de capacidade de

subestações). As variáveis  $\alpha_{i,b,t}$  e  $\beta_{ij,a,t}$  são as variáveis que indicam respectivamente, se a subestação  $i$  e o ramo  $ij$  estão ativos no estágio  $t$ .

Os valores de  $\delta_{lt}$  e  $\delta_{st}$  são determinados respectivamente, pelas equações (22) e (23) apresentadas a seguir:

$$\delta_{lt} = c_e \phi_l 8760 \sum_{p=1}^{np(t)} \frac{1}{(1+I)^p} \quad (22)$$

$$\delta_{st} = c_{op} \phi_s 8760 \sum_{p=1}^{np(t)} \frac{1}{(1+I)^p} \quad (23)$$

Sendo  $c_e$  o custo do  $kWh$ ,  $np(t)$  a duração em anos do estágio  $T$ ,  $I$  a taxa de juros,  $c_{op}$  o custo do  $kVA/h$  e os fatores de perdas  $\phi_l$  e  $\phi_s$  são determinadas com a relação entre as perdas médias e as perdas máximas, em um determinado período de tempo, (OLIVEIRA, 2010).

Quanto às restrições de natureza técnica e operacionais do modelo, as restrições representam as equações de balanço de potência ativa  $P_{ij,t}$  e reativa  $Q_{ij,t}$ , que no estágio  $t$  são calculadas pelas equações (24) e (25), respectivamente.

$$P_{ij,t} = V_{i,t} \sum_{j \in \Omega_b} V_{j,t} \beta_{ij,a,t} (G_{ij} \cos \phi_{ij,t} + B_{ij} \text{sen} \phi_{ij,t}) \quad (24)$$

$$Q_{ij,t} = V_{i,t} \sum_{j \in \Omega_b} V_{j,t} \beta_{ij,a,t} (G_{ij} \text{sen} \phi_{ij,t} + B_{ij} \cos \phi_{ij,t}) \quad (25)$$

Sendo  $V_{i,t}$  a magnitude da tensão da barra  $i$  no estágio  $t$ ,  $\phi_{ij,t} = \phi_{i,t} - \phi_{j,t}$  representa a diferença do ângulo de fase entre as barras  $i$  e  $j$  no estágio  $t$  e  $G_{ij}$  e  $B_{ij}$  são respectivamente, os elementos de condutância e susceptância que formam a matriz de admitância nodal do sistema.

A restrição (8) representa os limites da magnitude de tensão das barras  $i$  permitidos. A restrição (9) representa o limite máximo da potência aparente fornecida ao sistema pela subestação do tipo  $b$  da barra  $i$  no estágio  $t$ . As restrições das Equações (26) e (27), representam o fluxo de potência aparente máximo no circuito  $ij$  em que os fluxos de potência ativa e reativa  $P_{ij,t}$  e  $Q_{ij,t}$  no circuito  $ij$  no estágio  $t$  são determinados:

$$P_{ij,t} = V_{i,t}^2 g_{ij,a} \beta_{ij,a,t} - V_{i,t} V_{j,t} \beta_{ij,a,t} (g_{ij,a} \cos \phi_{ij,t} + b_{ij,a} \text{sen} \phi_{ij,t}) \quad (26)$$

$$Q_{ij,t} = -V_{i,t}^2 b_{ij,a} \beta_{ij,a,t} - V_{i,t} V_{j,t} \beta_{ij,a,t} (g_{ij,a} \text{sen} \phi_{ij,t} + b_{ij,a} \cos \phi_{ij,t}) \quad (27)$$

sendo  $g_{ij,a}$  e  $b_{ij,a}$  a condutância e susceptância do ramo  $ij$  do condutor do tipo  $a$ , respectivamente. As restrições (11) e (12) garantem a escolha de somente uma alternativa de alteração para os ramos e subestações, respectivamente. As restrições (9) e (13) indicam a natureza binária das variáveis de decisão para cada estágio em análise. A restrição (14) é uma condição necessária para que o sistema possua uma topologia radial, isto é, permite que todas as barras com carga estejam conectadas e que não haja laços no sistema. A restrição (14) em conjunto com as restrições (6) e (7) asseguram a radialidade do sistema, (SOUZA, 2011).

As restrições (18), (19), (20) e (21) relacionadas com a confiabilidade do sistema de energia elétrica, garantem que os valores dos índices de continuidade  $FIC$  (Frequência de Interrupção por Unidade Consumidora),  $DIC$  (Duração de Interrupção por Unidade Consumidora) de cada barra  $i$  e o  $FEC$  (Frequência equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e  $DEC$  (Duração equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) do conjunto de consumidores  $k$  não tenham seus limites ultrapassados.

O problema de reconfiguração de condutores de sistemas de distribuição de energia elétrica é modelado como um problema de programação não linear inteira mista (PNLIM) e está sujeito a dois tipos de restrições, sendo físicas e operacionais.

As restrições físicas estão relacionadas à capacidade máxima dos componentes do sistema de distribuição de energia, como por exemplo, o limite de fluxo de potência aparente nos circuitos, a potência máxima fornecida pela subestação, dentre outros. Já as Restrições operacionais são determinadas pela operação do sistema de distribuição de energia, como, por exemplo, o limite de tensão nos nós, a duplicidade de circuitos no mesmo ramo, a radialidade etc.

#### **IV.1.2 – Estudo e Cálculo do Fluxo de Potência/Carga**

A maioria dos estudos realizados em áreas de planejamento e operação de sistemas elétricos de potência utiliza o cálculo de fluxo de potência, para que se consiga, de forma geral, obter o controle sobre a potência ativa e reativa do sistema, de modo que a demanda esteja atendida e que seja realizada uma análise estática da estabilidade da tensão. Este último ponto abordado vem se tornando um ponto crítico para a operação dos sistemas de potência.

Na literatura especializada encontramos diversos métodos propostos de algoritmos eficientes para solução de problemas de fluxo de carga em redes de distribuição radiais. Neste trabalho será utilizado para os cálculos de fluxo de carga em redes um algoritmo elaborado com o método de "*Newton Raphson*" baseado em varredura direta e inversa ("*Backward-Forward-Sweep*"), como em Cespedes (CESPEDES, 1990).

#### **IV.1.2.1 – Modelo das Redes de Distribuição**

Para realizar a formulação do modelo matemático dos sistemas de distribuição de energia elétrica, é considerado um sistema radial trifásico balanceado. É possível representar este modelo através de um equivalente monofásico com demonstrado na Figura 7.

Em redes de distribuição de energia em média tensão, em decorrência da sua natureza diversa (configuração radial e relações  $R/X$  mais elevadas) e para o modelo simplificado, as capacitâncias em derivação podem ser desprezadas em níveis típicos de tensões, (HAFFNER & BARRETO, 2006).

#### **IV.1.2.2 – Método da Soma de Potências – MSP**

Dentre os métodos mais eficientes para cálculo do fluxo de potência, em redes de distribuição, o Método da Soma de Potência proposto por Céspedes utiliza um processo iterativo nas variáveis: perdas de potência ativa; e reativa do tipo, "*Backward-Forward-Sweep*", tendo os seguintes objetivos básicos (CESPEDES, 1990):

- O módulo da tensão de cada barra deve ser a variável de maior interesse, prevalecendo sobre a sua fase. Isso, porque em sistemas de distribuição a diferença entre as fases das tensões de barra é pequena não excedendo alguns graus;
- O método deve permitir a definição do módulo de tensão em qualquer barra do sistema, para que as outras barras possam ser calculadas a partir desta;
- As cargas nas barras podem ser representadas como funções dos respectivos módulos das tensões nas barras;
- O método deve ser aplicado para fluxos radiais monofásicos e trifásicos;

- O algoritmo deve ter seu tempo de processamento e convergência compatíveis com outros métodos usualmente utilizados para a solução do problema de fluxo de potência.

Em uma rede com topologia radial, como pode ser visto da Figura 7, o algoritmo do MSP propõe que, inicialmente, as perdas em todos os trechos são nulas, e a cada iteração as estimativas dessas perdas melhoram. Quando a tensão da subestação é fornecida e as perdas são consideradas nulas, podem-se calcular as tensões das barras conectadas diretamente à subestação (SE). Esse processo permanece até que todas as tensões das barras sejam calculadas.

Após concluir a primeira parte ("*forward*"), obtêm-se valores aproximados de todas as tensões das barras. Estes valores são ditos aproximados devido às perdas iniciais serem consideradas nulas. Conhecidos os valores de tensão, é possível calcular uma estimativa para as perdas em todos os trechos e, em seguida, corrigir os fluxos no processo ("*backward*"). O processo completo ("*forward – backward*") permanece até que a variação, nas perdas totais, seja menor que uma tolerância pré-estabelecida, ou quando o limite de iterações for excedido.

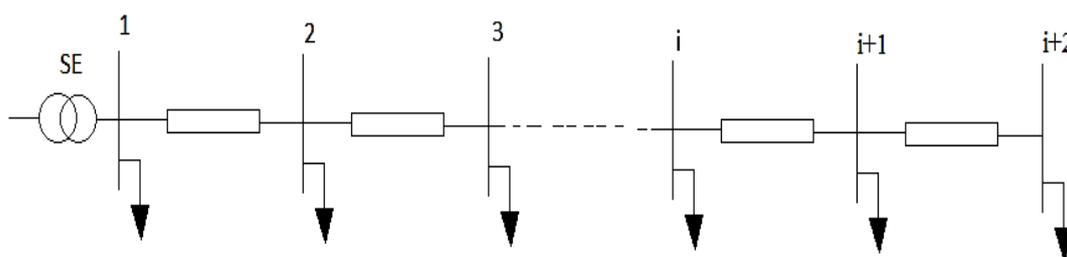


Figura 7 - Rede de distribuição radial, (fonte: SANCA, 2013).

A solução do problema do fluxo de carga em um sistema radial utilizando o método da soma de potências consiste em resolver para cada trecho do alimentador, uma equação biquadrada em termos da tensão nodal. O processo para o cálculo da potência consiste basicamente em somar os valores das potências que faz menção às cargas e as perdas relativas aos trechos que estão após o trecho de estudo, incluindo a própria carga.

Para a modelagem da rede de distribuição, o sistema é dividido em diversos ramos, os quais são limitados por barras ou nós. Cada nó representa um ponto onde está instalado

um transformador de distribuição. Na Figura 8 é apresentada a representação de circuitos elétricos de um trecho do sistema.

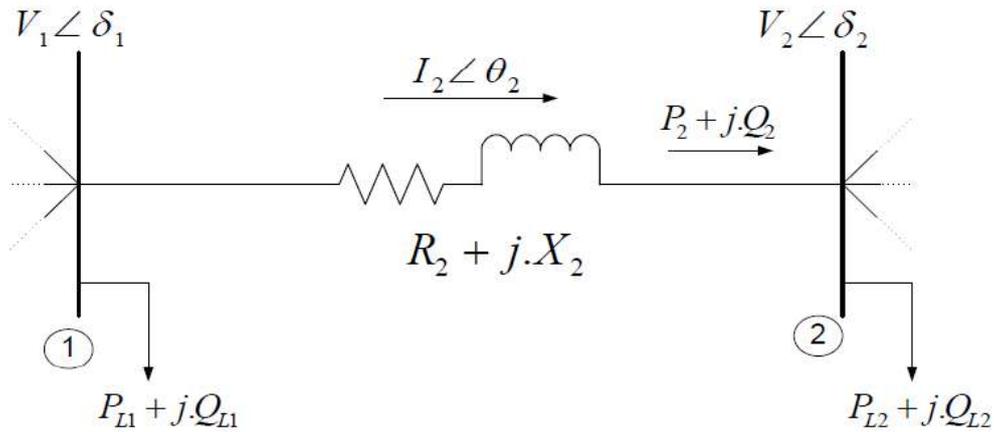


Figura 8 - Um trecho qualquer de um sistema de distribuição, (SANCA, 2013).

Onde  $V_1 \angle \delta_1$  e  $V_2 \angle \delta_2$  são as tensões de cada barra;  $I_2 \angle \theta_2$  é a corrente que atravessa o "trecho 2";  $R_2$  e  $j.X_2$  representam, respectivamente, a resistência e reatância série do "trecho 2"; enquanto que a carga, tipo potência constante, existente em cada barra, é representada por suas parcelas ativa e reativa ( $P_{L1} + j.Q_{L1}$ ,  $P_{L2} + j.Q_{L2}$ ). O fluxo de potência num trecho ( $P_2 + j.Q_2$ ) é definido como aquele que flui no final do mesmo, antes de seu nó terminal, desconsiderando as perdas do trecho ( $\Delta P_2$  e  $\Delta Q_2$ ). Esse fluxo é o que chega ao final do trecho, já descontadas as perdas do fluxo de potência no início do trecho.

#### IV.1.2.2.2 – Modelagem Matemática do MSP

Na análise da Figura 8, demonstrada anteriormente, pode-se extrair as seguintes equações (28) e (29).

$$I_2 = \frac{V_1 \angle \delta_1 - V_2 \angle \delta_2}{R_2 + j.X_2} \quad (28)$$

$$S_2 = V_2 I_2^* \Rightarrow S_2^* = V_2^* I_2 \Rightarrow P_2 - j.Q_2 = V_2^* I_2 \quad (29)$$

Igualando  $I_2$  nas equações (30) e (31), obtém-se o seguinte desenvolvimento:

$$V_2 I_2 [\cos(\delta_1 - \delta_2) + j \text{sen}(\delta_1 - \delta_2)] = V_2^2 + R_2 P_2 + X_2 Q_2 + j(X_2 P_2 - R_2 Q_2) \quad (30)$$

Separando a parte real da imaginária tem-se:

$$\left. \begin{aligned} V_2 I_2 \cos(\delta_1 - \delta_2) &= V_2^2 + R_2 P_2 + X_2 Q_2 \\ V_1 V_2 \sin(\delta_1 - \delta_2) &= X_2 Q_2 - R_2 P_2 \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

Elevando-se ao quadrado e somando-se as equações (32) e (33), obtém-se:

$$V_2^4 - 2 \left[ \frac{1}{2} V_2^2 - (R_2 Q_2 + X_2 P_2) \right] V_2^2 + (R_2^2 + X_2^2)(P_2^2 + Q_2^2) \quad (32)$$

Que pode ser vista da seguinte maneira:

$$V_2^4 - 2AV_2^2 + B \quad (33)$$

Onde,

$$A = \frac{1}{2} V_2^2 - (R_2Q_2 + X_2Q_2) \quad (34)$$

$$B = (R_2^2 + X_2^2)(P_2^2 + Q_2^2) \quad (35)$$

Em sistemas de distribuição, as fases das tensões não são de grande importância, pois a diferença de fase entre a barra da subestação e a última barra do alimentador geralmente é de apenas alguns graus. É importante observar que, a equação (36) é uma equação biquadrada e possui quatro raízes. Logo, das duas soluções para  $V_2^2$ , apenas a solução que considera o sinal positivo da raiz quadrada da solução fornece um valor de tensão possível de se calcular, o mesmo se aplica à raiz quadrada da solução para  $V_2$  (CESPEDES, 1990).

Resolvendo a equação, temos:

$$V_i = \sqrt{A + \sqrt{A^2 - B}} \quad (36)$$

$$A = \frac{1}{2} V_{i-1}^2 - (R_iQ_i + X_iQ_i) \quad (37)$$

$$B = (R_i^2 + X_i^2)(P_i^2 + Q_i^2) \quad (38)$$

Tendo sido calculada as tensões em todos os nós do sistema, é possível calcular as perdas ativa e reativa em cada trecho. Desse modo, as perdas de potência ativa e reativa em um trecho genérico  $i$  são fornecidas pelas seguintes equações:

$$\Delta P_i = R_i \left[ \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \right] \quad (39)$$

$$\Delta Q_i = X_i \left[ \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \right] \quad (40)$$

Através da Figura 8 é possível determinar os fluxos de potência ativa e reativa utilizando-se as expressões:

$$P_i = P_{Li} + \sum_{k \in \Psi} (P_i + \Delta P_k) \quad (41)$$

$$Q_i = Q_{Li} + \sum_{k \in \Psi} (Q_i + \Delta Q_k) \quad (42)$$

Em que  $P_{Li}$  e  $Q_{Li}$  são as potências da carga instalada no trecho  $i$ ;  $P_i$  e  $Q_i$  são os fluxos de potência ativa e reativa do trecho  $i$ ; e  $\Delta P_k$  e  $\Delta Q_k$  são as perdas ativa e reativa no trecho  $k$ ;  $\Psi$  é o conjunto de todos os trechos que derivam do trecho  $i$ . Quando a diferença entre duas perdas consecutivas for menor que uma tolerância pré-estabelecida, o algoritmo chegará ao fim.

Retomando a segunda parcela da equação (43), é possível desenvolver uma expressão para o cálculo das fases das tensões nas barras, que de forma genérica será:

$$\delta_i = \delta_{i-1} - \arcsen\left(\frac{X_i P_i + R_i Q_i}{V_{i-1} V_i}\right) \quad (43)$$

A fase na subestação é considerada nula e este é o ponto de partida para o cálculo das demais fases das tensões nas barras.

#### IV.1.2.2.3 – Renumeração dos Ramos dos Sistemas de Distribuição

Considerando que a topologia do sistema de distribuição é radial e que a relação reatância/resistência depende do tipo de condutor de cada ramo, optou-se no desenvolvimento deste trabalho, utilizar o fluxo de carga de varredura similar ao utilizado em (SHIMOHAMMADI & HONG, 1989), uma aplicação das leis de “Kirchhoff” de tensões e correntes. Este algoritmo é simples e eficaz, pois apresenta bom comportamento em relação à convergência e não requer muita memória computacional para a solução do problema, (BAQUERO, 2012).

No algoritmo, o processo é iniciado escolhendo-se um valor de tensão para as barras, normalmente o mesmo valor de tensão da subestação. O método consiste em duas etapas, a “backward” e a “forward”. No processo “backward” são calculadas as correntes nas barras e nos ramos, partindo das barras finais em direção à subestação. No processo “forward” as tensões são atualizadas com as correntes calculadas na etapa “backward”, partindo da subestação em direção às barras mais distantes. Estes passos são repetidos até que se obtenha a convergência do método.

Como o método de fluxo de carga de varredura percorre da barra mais distante da subestação para as mais próximas na etapa "*backward*" e vice-versa na etapa "*forward*", então torna-se necessário enumerar os ramos por camadas à medida que vão se afastando da barra principal.

A Figura 9 (representação padrão de um sistema de distribuição de energia) ilustra a disposição das barras (nós) de ligação um sistema de distribuição de 14 barras de cargas. A partir da subestação (nó 14) interligando as outras barras de cargas do sistema (nó 1 ao nó 13). As conexões são os ramos/circuitos de ligação do sistema (no exemplo a Subestação nó 14 esta ligada ao nó 4 através de um ramo " $r_{14-4}$ "). A Figura 10 apresenta as barras de cargas renumeradas após a utilização do método de renumeração de ramos.

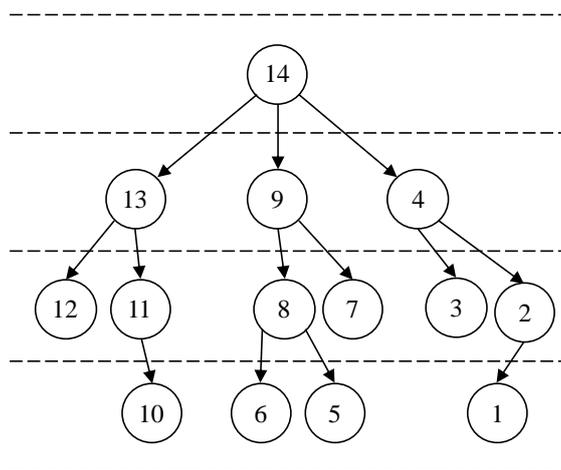


Figura 9 - Sistema de 14 barras antes da ordenação.

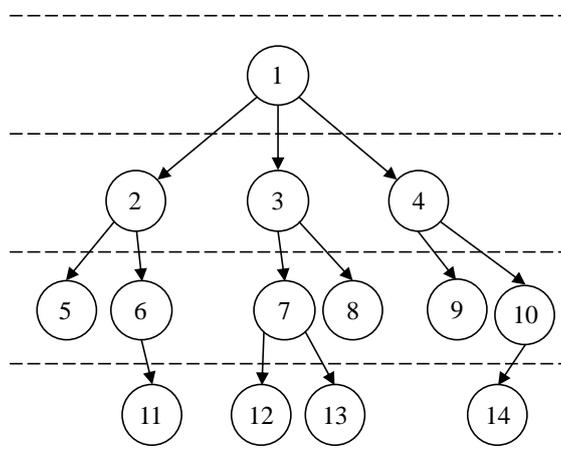


Figura 10 - Sistema de 14 barras ordenado.

#### IV.1.2.2.4 – Etapa "Backward" (varredura das correntes)

Nesta etapa são determinadas as injeções de corrente nas barras e a corrente nos ramos. Seja a tensão  $\dot{V}_j$  e a potência aparente da carga  $\dot{S}_j$  da barra  $j$ , as injeções de corrente  $i_j$  em cada "barra  $j$ " podem ser determinadas por:

$$I_j = \left( \frac{\dot{S}_j}{\dot{V}_j} \right)^* \quad (44)$$

Calculadas as injeções de corrente em cada barra, os fluxos de corrente nos "ramos  $km$ " podem ser determinados pela equação (3):

$$I_{km} = I_{dm} + \sum_{j \in \Omega_m} I_{jm} \quad (45)$$

Sendo  $I_{km}$  o fasor da corrente no "ramo  $km$ ";  $I_{dm}$  o fasor da corrente demandada na "barra  $m$ " e o  $\Omega_m$  o conjunto de barras ligadas à barra  $m$  a sua jusante.

#### IV.1.2.2.5 – Etapa "Forward" (varredura de tensões)

Seja o "ramo  $km$ " ( $r_{km}$ ) de um sistema de distribuição radial ilustrado pela Figura 11:

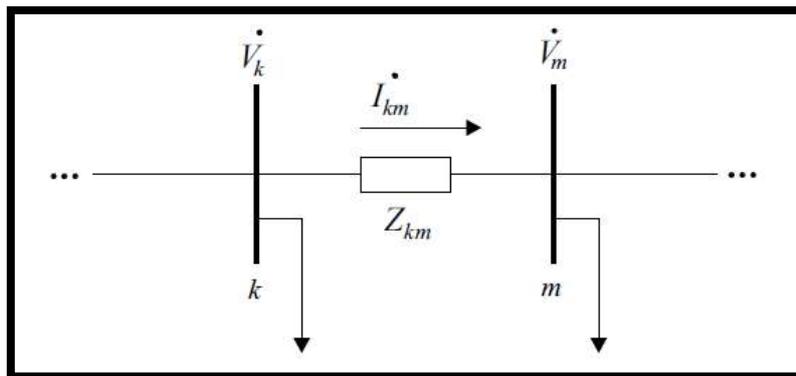


Figura 11 - Sistema Radial, (SANCA, 2013)

Sendo conhecida a tensão na "barra  $k$ ", a tensão da "barra  $m$ " pode ser determinada pela equação a seguir:

$$\dot{V}_m = \dot{V}_k - \dot{I}_{km} (r_{km} + j \cdot x_{km}) \quad (46)$$

Sendo  $\dot{V}_k$  o fasor da tensão na barra inicial do "ramo  $km$ ";  $\dot{V}_m$  o fasor da tensão na barra final do "ramo  $km$ ".

#### IV.1.2.2.6– Cálculo das Perdas

Sendo  $\dot{S}_{km_p}$  as perdas no "ramo  $km$ " da Figura 11, as perdas ativa e reativa do sistema podem ser obtidas da seguinte forma:

$$\dot{S}_{km_p} = \Delta \dot{V}_{km} (\dot{I}_{km})^* = \dot{Z}_{km} (\dot{I}_{km}) (\dot{I}_{km})^* \quad (47)$$

Sendo assim fazendo as substituições abaixo temos:

$$\dot{Z}_{km} = (r_{km} + j \cdot x_{km}) \quad (48)$$

$$\dot{S}_{km_p} = (r_{km} + j \cdot x_{km}) (\dot{I}_{km}) (\dot{I}_{km})^* \quad (49)$$

$$\dot{S}_{km_p} = (r_{km} + j \cdot x_{km}) (\dot{I}_{km})^2 \quad (50)$$

$$\dot{S}_{km_p} = r_{km} (\dot{I}_{km})^2 + j \cdot x_{km} (\dot{I}_{km})^2 \quad (51)$$

Sabemos que as perdas ativas no "ramo  $km$ " podem ser representadas pela equação básica  $\dot{S}_{km_p} = P_{km} + j \cdot Q_{km}$ . Sendo assim as perdas ativas e reativas no sistema podem ser calculadas utilizando as equações abaixo relacionadas:

$$P_t = \sum_{(k,m) \in \Omega_b} r_{km} I_{km}^2 \quad (52)$$

$$Q_t = \sum_{(k,m) \in \Omega_b} x_{km} I_{km}^2 \quad (53)$$

Sendo  $P_{km_p}$  as perdas ativas do "ramo  $km$ ";  $Q_{km_p}$  as perdas reativas no "ramo  $km$ ";  $P_t$  as perdas ativas totais do sistema e  $Q_t$  as perdas reativas totais do sistema.

Apresentada a formulação matemática que são utilizadas pelo método, após realizada a ordenação das barras, o Algoritmo de Fluxo de Carga Radial de Varredura, pode ser resumido nos seguintes passos:

1. Fixar as tensões nas barras como sendo a tensão da barra de referência e assumir  $P_{per1} = 0$  e escolher a tolerância  $\varepsilon$ .
2. Iniciando das barras extremas, calcular as correntes das barras e dos ramos respectivamente (etapa "*Backward*").
3. Se  $|P_{per2} - P_{per1}| \leq \varepsilon$ , pare porque foi atingida a convergência. Caso contrário,  $P_{per2} = P_{per1}$  e passe para o passo seguinte.
4. Partindo da subestação, atualizar os valores das tensões usando os valores das correntes dos ramos determinados anteriormente (etapa "*Forward*"). Volte ao passo 2.

### IV.1.3 – Estudo dos Índices de Confiabilidade

As equações para o estudo dos índices de confiabilidade foram definidas nas subseções anteriores, para utilizá-las é necessário conhecer o histórico do número e tempo de falhas da concessionária que administra o sistema de distribuição a ser planejado em um PSDEE. Por outro lado, quando estes valores são desconhecidos, devemos obter estimativas destes valores por meio de taxas, o qual não é uma tarefa simples, pois estas grandezas dependem das características dos componentes e de eventos independentes do sistema. Os modelos que tratam o comportamento das falhas são complexos, uma vez que as variáveis envolvidas são de natureza aleatória e, conseqüentemente, não são previstas de forma exata, remetendo a um tratamento probabilístico do fenômeno. A Simulação de Monte Carlo e Cadeias de Markov, dentre outros, são alguns dos modelos utilizados para a determinação destas estimativas (ZAPATA, 2011).

As taxas que indicam a expectativa para o número de falhas ( $\lambda$ ), para o tempo de reparo ( $T_R$ ) e para o tempo de reconfiguração ( $T_r$ ) foram adotadas como conhecidas e são as mesmas utilizadas em Lotero e Contreras (LOTERO & CONTRERAS, 2011). Para o cálculo dos índices foi considerado que cada alimentador do sistema tem um disjuntor na saída da subestação e que cada ramo entre os pontos de carga possui uma chave de manobra, normalmente fechada, que atua em condições de falha para isolar trechos do alimentador com defeito, e possibilitar que alguns consumidores possam ser restaurados.

Vamos adotar também que na ocorrência de uma falha, o equipamento de proteção localizado na saída da subestação interrompe todos os consumidores ligados no respectivo alimentador, e que o equipamento de proteção mais próximo, localizado à

montante (em direção à subestação) da falta, isolará o trecho defeituoso para que seja reparado. Depois disto, o dispositivo de proteção na saída da subestação é religado para restabelecer a energia aos consumidores que estão a montante do local da interrupção, caso seja possível.

Como em Dias, foi considerado que cada alimentador da rede de distribuição pode ser dividido em blocos delimitados por dispositivos de proteção e/ou seccionamento, composto por trechos com seus respectivos cabos e transformadores de distribuição. Na ocorrência de uma falha em um bloco B os demais blocos podem ser: não atingidos, passível de restabelecimento ou permanentemente interrompido. Os blocos não atingidos são aqueles que não são afetados pela falha, enquanto o passível de restabelecimento são os que restabelecem o fornecimento por meio de um dispositivo de seccionamento localizado a montante do bloco B e os permanentemente interrompidos somente serão reenergizados após o reparo do bloco B (DIAS, 2002).

Sendo assim, cada bloco está sujeito a um determinado tempo de indisponibilidade de fornecimento de energia elétrica quando ocorre uma interrupção e, desta forma, foi necessário considerar o tempo de reconfiguração ( $TT$ ) para os blocos que estão a montante do local da falha (blocos passíveis de restabelecimento) e tempo de reparo para os blocos que estão localizadas a jusante (se afastando da subestação) da falha (blocos permanentemente interrompidos). A metodologia de cálculo dos índices foi totalmente baseada em Dias (2002) onde são calculados os índices  $FIC$ ,  $FEC$ ,  $DIC$  e  $DEC$ .

## **CAPÍTULO V - Algoritmo Genético Especializado Aplicado ao PSDEE**

Neste capítulo são abordados os aspectos teóricos do Algoritmo Genético Modificado de Chu & Beasley (AGCB) base para o trabalho desenvolvido nesta dissertação. A metodologia utilizada na implementação do Algoritmo Genético Especializado será apresentada a seguir, como parte das melhorias desenvolvidas neste trabalho e corroboradas através dos resultados apresentados.

O Algoritmo Genético (AG) faz parte das técnicas evolutivas propostas nos anos de 1950 sendo originalmente idealizado por Holland na década de 1970 (Holland, 1975). Fundamenta-se na analogia com processos naturais de evolução, na qual, dada uma população inicial, os indivíduos com características genéticas melhor adaptadas têm mais chance de sobrevivência e de transmitirem seu código genético para os descendentes que serão cada vez mais adaptados, enquanto os piores tendem a desaparecer, (RENDÓN, ZULUAGA, & OCAMPO, 2008).

O PSDDE será realizado com o auxílio de um Algoritmo Genético Especializado baseado na metodologia implementada em Chu & Beasley, em conjunto com um Algoritmo de Fluxo de Carga desenvolvido para Sistemas de Distribuição Radiais (AFC) apresentado nas sessões anteriores.

Utilizando o AG especializado buscaremos uma solução para a solução do PSDEE, que será avaliada pela função custo apresentada na equação (1) sujeita às restrições operacionais descritas na seção anterior (IV.1.1). O algoritmo AFC se encarregará de determinar o estado da rede, os valores das correntes nos ramos e o valor fornecido pelas subestações do sistema. Através destes resultados poderemos avaliar o valor das perdas resistivas para os cálculos de seus custos na topologia final proposta pelo AG especializado na solução do PSDEE.

### **V.1 – O Algoritmo Genético modificado por Chu & Beasley**

Uma modificação estratégica do AG tradicional foi proposta no trabalho de Chu & Beasley para resolver o problema de alocação de  $n$  tarefas para  $m$  agentes denominado de "*Generalized Assignment Problem*", com geralmente  $n \gg m$ . Trata-se de um problema linear inteiro binário multirrestrito que gera muitas soluções inviáveis em função dos operadores genéticos e da geração da população inicial (CHU & BEASLEY,

1997). O fluxo de trabalho do algoritmo de Chu & Bealey (AGCB) segue as seguintes etapas:

1. Especificar os parâmetros de controle (tamanho da população, taxas de recombinação e de mutação, dentre outras);
2. Apresentar as especificidades do problema tais como: tipos de codificação e de seleção, maneira de estruturar a população inicial e manipular os casos onde os indivíduos são inviáveis como solução do problema etc.;
3. Obter uma população inicial aleatoriamente;
4. Determinar os valores da função objetivo e restrições dos indivíduos da população corrente;
5. Atualizar a solução;
6. Realizar a seleção e escolher somente duas soluções geradoras;
7. Realizar a recombinação das soluções do passo anterior, e preservar somente um descendente;
8. Realizar a mutação do descendente preservado;
9. Implementar uma fase de melhoria local;
10. Verificar se o descendente melhorado pode ser inserido na população, caso positivo, substituir um elemento da população corrente menos viável por este, no caso em que o indivíduo gerado é uma solução inviável, descartar e continuar;
11. Avaliar se o critério de parada definido na implementação do algoritmo foi satisfeito, caso positivo, parar, caso contrário, ir para o passo 6.

## **V.2 – Algoritmo Genético Especializado (AG Especializado).**

Foram sugeridas mudanças na metodologia apresentada por Chu & Beasley (CHU & BEASLEY, 1997) na solução do PSDEE, que foram implementadas neste trabalho por meio de heurísticas desenvolvidas e adotadas nas etapas do AG especializado. A seguir a o Figura 12 descreve fluxo de tarefas do AG especializado:

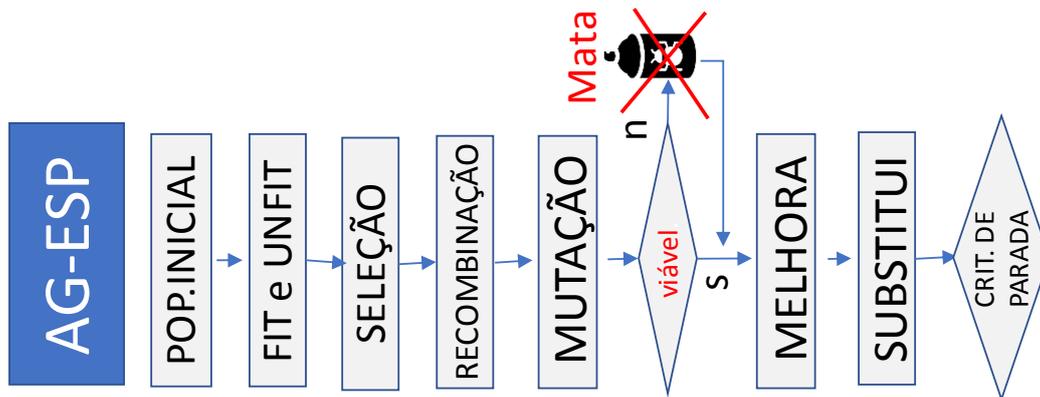


Figura 12 - Fluxo de tarefas do AG Especializado, (fonte: Própria).

1. Gera-se uma População Inicial diferenciada contendo indivíduos melhorados. Nesta etapa foi utilizada uma heurística baseada no comportamento das formigas desenvolvida especificamente para esta pesquisa;
2. São criados dois Vetores distintos para armazenar indivíduos viáveis (pois respeitam os critérios e restrições) e inviáveis (pois de alguma forma violam as restrições adotadas no problema, como por exemplo restrições de fluxo de potência máxima);
3. Etapa de Seleção, por torneio descrita na sessão V.2.5;
4. Etapa de Recombinação, descrita na sessão V.2.6;
5. Etapa de Mutação. Descrita na sessão V.2.7;
6. Etapa de Fase de Melhora Local, descrita na sessão V.2.8:
  - a. Se o descendente for inviável, faz-se um reparo para tentar torna-lo viável;
  - b. Se o descendente for viável tenta-se otimizar seus parâmetros elétricos e minimizar ao máximo os custos finais decorrentes na implementação desta topologia;
7. Etapa de Substituição, descrita na sessão V.2.9:
  - i. Qualquer solução viável substitui uma solução inviável;
  - ii. Entre duas soluções viáveis escolhe-se a de melhor valor da função objetivo;
  - iii. Entre duas soluções inviáveis escolhe-se a opção que tenha violação de restrição menor;
8. Critérios de Parada (serão adotados critérios de paradas distintos para cada sistema de distribuição estudado no Capítulo VI., como por exemplo, no

sistema de 56 barras o critério de parada foi o número máximo de iterações do AG especializado).

O AG Especializado apresenta algumas características específicas que resultam em um bom desempenho do algoritmo quando comparado à um AG tradicional, as quais são:

- Todas as soluções armazenadas na população corrente são distintas, evitando assim convergência prematura, o que é muito comum em algoritmos genéticos tradicionais;
- A etapa de busca local foi desenvolvida para que um descendente gerado seja modificado geneticamente e melhorado quanto a sua viabilidade e custo de implementação;
- A lógica de substituição da população corrente preserva as topologias mais viáveis, assim estas soluções não estão sujeitas a eliminação por decisões de caráter aleatório. Sendo assim as topologias encontradas, serão descartadas apenas quando encontradas soluções mais viáveis, quanto aos parâmetros elétricos e função custo da topologia final.

A seguir serão apresentados os operadores desenvolvidos no AG especializado.

### **V.2.2 – Codificação do problema do PSDEE para o AG Especializado.**

Abordaremos nesta sessão a codificação dos indivíduos do AG Especializado onde, inicialmente será detalhada a codificação da solução do PSDEE em estágio único de desenvolvimento, e a seguir a codificação em multiestágios em um horizonte de planejamento de “ $T$ ” anos.

Neste trabalho foi usado o AG especializado para avaliar 5 (cinco) casos de sistemas de distribuição distintos utilizados como "benchmark" na literatura especializada por vários autores. Estes casos foram submetidos a um PSDEE através do AG especializado, e para viabilizar a comparação dos resultados do AG especializado com os outros casos da literatura especializada, foram utilizados dois tipos de codificação distintos, uma binária e outra com números inteiros.

Nas sessões V.2.2.1 e V.2.2.2 serão detalhadas as codificação para planejamento estático e dinâmico utilizando números inteiros, codificação esta sugerida pelos autores

Chu & Beasley (CHU & BEASLEY, 1997). Na sessão seguinte, VI.1.1 , o AG especializado, utilizado na solução do PSDEE do sistema elétrico de distribuição 54 barras, utilizou a codificação binária detalhada na sessão VI.1.1, para viabilizar a comparação, deste estudo específico, com outros autores da literatura especializada.

### V.2.2.1 – Planejamento Estático ou Estágio Único.

Seguindo a codificação sugerida em Chu & Beasley (CHU & BEASLEY, 1997), foi utilizada a codificação de números inteiros, para definir os tipos de condutores associados a cada ligação e as características das subestações de energia dos sistemas de distribuição de energia. A proposta de codificação do Figura 13, cuja sua composição é:

- a primeira parte denominada  $n_r$ , representa os ramos de uma rede de distribuição que vão do número “1” que representa o “ramo 1” ao “ $N$ ” que representa o “ramo  $N$ ” e os tipos de condutores associados em cada ramo;
- a segunda parte denominada  $n_{bs}$ , representa as subestações (SE’s) que poderão ser ou não ser incluídas no planejamento, com ou sem alterações quanto a sua capacidade de fornecimento de energia, no sistema de distribuição de energia.

A codificação do genótipo de uma solução do PSDEE, corresponde a segunda linha do vetor, que contém as informações de quando os ramos são ou não construídos, e que se são construídos com qual o tipo de condutor utilizado em sua implementação. Também são codificadas as informações das subestações candidatas a fazerem parte da solução, seja por ampliação de sua capacidade, seja por utilização de uma alternativa outrora não utilizada. A primeira linha, apresentada na Figura 13, serve apenas para referenciar os ramos do sistema, ou seja, não fazem parte do vetor solução.

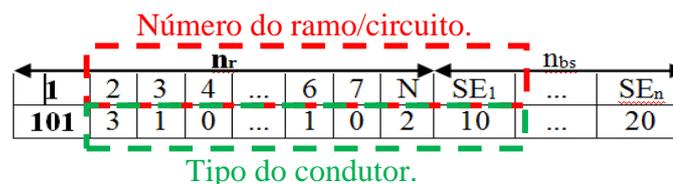


Figura 13 - Codificação de genótipo, (fonte: Própria).

Na primeira parte da representação do genótipo, ou seja, a porção  $n_r$ , os números inteiros maiores que zero são utilizados para indicar o tipo de condutor a ser instalado no respectivo ramo. O valor “0” indica que o circuito/ramo não foi implementado na solução

do PSDEE. Exemplificando na Figura 13, acima demonstrada, o “ramo 4” não foi implementado na solução do PSDEE do sistema de distribuição.

Os ramos/circuitos adicionados a rede de distribuição são formados por condutores numerados de “1” ao número de alternativas de condutores disponíveis na solução do PSDEE. O número de cada alternativa de condutor, está relacionado com os parâmetros elétricos do condutor utilizado (“condutor 1”, e do “tipo 1” que tem uma resistividade específica  $\rho_1$ , suporta uma corrente máxima específica  $I_L$ , etc.). Exemplificando, vamos observar que o “ramo 2” foi adicionado na solução do PSDEE com um condutor do “tipo 3”. Cabe ressaltar, que o número de tipos de condutores vai variar de acordo com as necessidades de cada projeto, que podemos ou não variar o tipo de condutor em ramos existentes na topologia da rede de distribuição.

Quando a solução apresentar um ramo obrigatoriamente existente, ou seja, parte da solução original, este ramo será representado com o número do tipo de condutor, acrescido de 100. Esta configuração será importante para fazer a distinção entre os ramos pré-existentes e os ramos candidatos, ao decorrer do planejamento. Exemplificando vamos supor que o “ramo 1” seja um ramo obrigatório na solução do PSDEE, e que este ramo foi projetado com um condutor do “tipo 1”, como podemos observar na Figura 13, o “ramo 1”, esta representado pelo numero “101”. Cabe ressaltar que um ramo obrigatório não pode ser descartado da solução original, mas pode ser projetado com um outro tipo de condutor de acordo com as necessidades do projeto.

Dando continuidade ao entendimento da codificação, temos outro exemplo onde os “ramos 3 e 6” foram incluídos na solução candidata com condutor do “tipo 1”; o “ramo 2” foi construído com condutor do “tipo 2”; os ramos “ramo 4” e “ramo 7” não foram considerados como parte da solução, sendo assim, foram representados pelo número “0”.

Na segunda parte do genótipo, o número inteiro maior que zero indica que a subestação é considerada parte da solução do PSDEE. As subestações existentes sem alteração de capacidade/projeto são representadas pelo número “10”, e as subestações ampliadas quanto a sua capacidade de transmissão serão identificadas por múltiplos de 10: “20”, “30”, “40”, “50”, ... ,  $(n \times 10)$  e assim por diante, conforme o número de alternativas de ampliação da capacidade do sistema.

### V.2.2.2 – Planejamento Dinâmico ou Multiestágios.

No planejamento da expansão em multiestágio ou planejamento dinâmico, a solução sugerida é representada por uma matriz de dimensão  $(n_{est} \times n_t)$ , sendo  $n_{est}$  o número de estágios e  $n_t = n_r + n_{bs}$ , sendo  $n_r$  o número de ramos e  $n_{bs}$  o número de barras com subestações. A Figura 14 ilustra uma proposta de solução de três estágios de planejamento, sendo que o “ramo 1” preexistente e obrigatório, permaneceu com o condutor do “tipo 1” nos três estágios, já o "Ramo 2" foi construído nos três estágios porém o tipo de condutor sofreu variações do estágio 1 para os estágios 2 e 3. A subestação  $SE_1$  existente não sofreu alterações quando a sua capacidade nos três estágios, O mesmo ocorreu na  $SE_n$ .

|           | $n_r$ |   |   |     |     |   |   | $n_{bs}$ |        |     |        |
|-----------|-------|---|---|-----|-----|---|---|----------|--------|-----|--------|
|           | 1     | 2 | 3 | 4   | ... | 6 | 7 | N        | $SE_1$ | ... | $SE_n$ |
| Estágio 1 | 3     | 1 | 0 | ... | 1   | 0 | 2 | 10       | ...    | 20  |        |
| Estágio 2 | 1     | 1 | 1 | 1   | 1   | 0 | 2 | 10       |        | 20  |        |
| Estágio 3 | 1     | 0 | 5 | 1   | 1   | 2 | 8 | 10       |        | 20  |        |

Figura 14 - Exemplo de codificação para o planejamento multiestágio, (fonte: Própria).

### V.2.3 – População Inicial Melhorada

Inicialmente o AG Tradicional e o AG proposto por Chu & Beasley (CHU & BEASLEY, 1997) utilizam uma população inicial aleatória. A utilização de populações aleatórias no desenvolvimento de uma solução dentro do Algoritmo Genético, pode ocasionar um aumento na quantidade de soluções inviáveis e soluções duplicadas à serem incorporadas na população inicial. Para minimizar este problema, foi proposta uma implementação de um algoritmo baseado na técnica de busca de alimentos nas colônias de formigas. Esta implementação utiliza técnica de grafos e a metaheurística "Ant Colony" para gerar indivíduos da população inicial viáveis levando em consideração as restrições do problema do PSDEE.

O algoritmo implementado inicialmente retrata o fluxo de atividades e condicionantes para seleção da/s subestação/ões que fará/ão parte da solução (Fluxos de trabalho para de seleção de Subestações) e a seguir, o retrata o fluxo de atividades e cálculos para acrescentar gradativamente novos ramos/circuitos ao sistema até

desenvolver uma solução inicial viável, para ser adicionada a população inicial do AG Especializado.

Resumidamente o fluxo de trabalho nesta heurística e descrito da seguinte forma:

- Para a escolha/teste de cada ramo/circuito do sistema a ser inserido, é selecionada uma subestação, e qual ramo/circuito será conectado a mesma, usando como critério de seleção a subestação que possuir o maior valor de potência aparente disponível (em percentuais);
- A seguir, são identificados quais outros ramos serão candidatos a conexão no ramo recentemente adicionado; um destes ramos/circuitos é escolhido, faz-se uma avaliação da conexão do ramo ao sistema. Se a conexão é viável e apresenta melhoras nos cálculos dos parâmetros do sistema conecta-se este ramo e consolida-se esta etapa, caso contrário analisa-se outras opções de conexões;
- O processo se repete até que todas as barras/cargas do sistema estudado estejam conectadas.

### **V.2.3.1 Algoritmo Colônia de Formigas (ACS) - Introdução**

Os comportamentos coletivos agregados ao alto padrão de organização das formigas na natureza chamaram a atenção dos pesquisadores. Isso porque, em seu habitat natural, as formigas sempre conseguem descobrir boas soluções para o menor caminho entre o formigueiro e uma fonte de alimento. As formigas ao andarem do formigueiro até o local da comida depositam no chão uma substância denominada feromônio. Outras formigas percebem a presença do feromônio e tendem a seguir caminhos onde a concentração de feromônio é mais elevada. Através deste mecanismo, as formigas são capazes de transportar os alimentos para o seu ninho de maneira extraordinariamente eficaz conforme mostra a Figura 15:

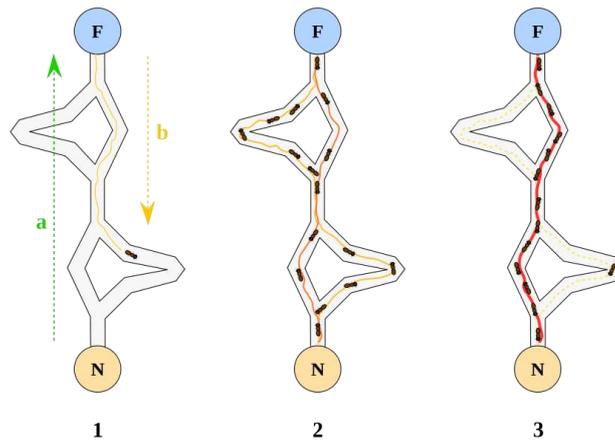


Figura 15 - Deslocamento das formigas na busca do alimento, (SANCA, 2013).

### V.2.3.1.2 Experimento da ponte dupla - Introdução a Heurística

Em um estudo feito por Dorigo, Birattari e Stuzle (DORIGO, BIRATTARI, & STÜTZLE, 2006) , investigou-se o comportamento das formigas seguindo o feromônio por elas depositados. Em uma experiência denominada “experiência de dupla ponte”, de forma que o ninho de uma colônia de formigas argentinas foi ligado a uma fonte de alimento por duas pontes de comprimentos iguais, de acordo com a Figura 16. Inicialmente, as formigas têm movimento aleatório entre o formigueiro e a fonte de comida, visto que não há presença do feromônio nos caminhos, possuindo desta forma, a mesma probabilidade de serem escolhidos. Posteriormente com o deslocamento aleatório das formigas, um caminho será escolhido por um número maior de formigas, fazendo com que a quantidade de feromônio neste caminho seja maior, desta forma, com o passar do tempo toda a colônia converge para a mesma ponte.

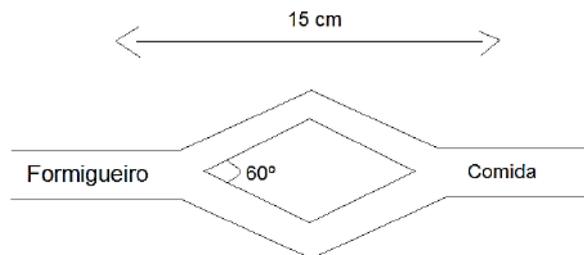


Figura 16 - Experimento ponte de comprimentos iguais, (fonte: Dorigo 2006).

Em um segundo experimento Dorigo, Birattari e Stutzle (DORIGO, BIRATTARI, & STÜTZLE, 2006) considera uma variante da experiência de ponte dupla, de tal forma que, uma ponte oferece o caminho mais curto quando comparada à outra. Nesta situação, as flutuações estocásticas na escolha inicial de uma ponte são muito reduzidas e um segundo mecanismo desempenha um papel importante: as formigas que por acaso escolheram a ponte curta, são as primeiras a chegar ao ninho. Portanto, a ponte curta recebe primeiramente uma maior quantidade de feromônio, estimulando mais formigas a seguirem pela mesma trilha. Desta forma, quanto mais formigas seguem uma trilha, mais atrativa é a mesma. A probabilidade de um caminho ser escolhido aumenta com o número de formigas que, previamente, escolheram este mesmo caminho.

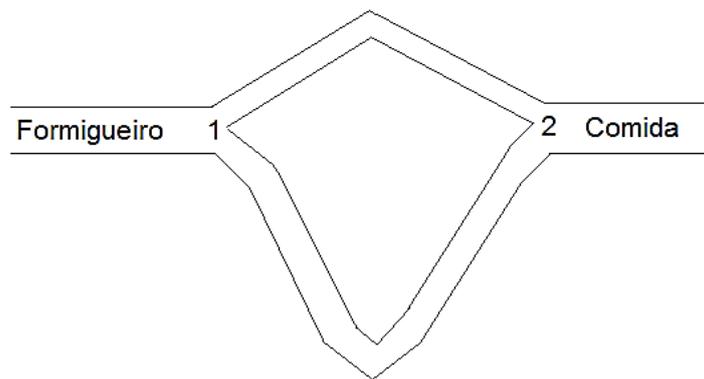


Figura 17 - Experimento ponte de comprimentos diferenciados, (fonte: Dorigo 2006).

O experimento de ponte dupla mostra claramente nos gráficos da Figura 18 que as colônias têm incorporadas a capacidade de otimização, uma vez que, através do uso de regras probabilísticas com base em informações locais, elas podem encontrar o menor caminho entre dois pontos do ambiente. Vale ressaltar que, com o decorrer do tempo, o feromônio sofre o processo de evaporação, pois a substância é volátil e a concentração em caminhos menos visitados vai diminuindo, reduzindo também a influência desses caminhos nas decisões das formigas. Portanto, a partir da inspiração do experimento, é possível desenvolver formigas artificiais, tendo como modelo formigas reais, que conseguem encontrar o menor caminho entre a fonte de comida e o formigueiro, obtendo assim um processo de otimização eficiente, (DORIGO, BIRATTARI, & STÜTZLE, 2006).

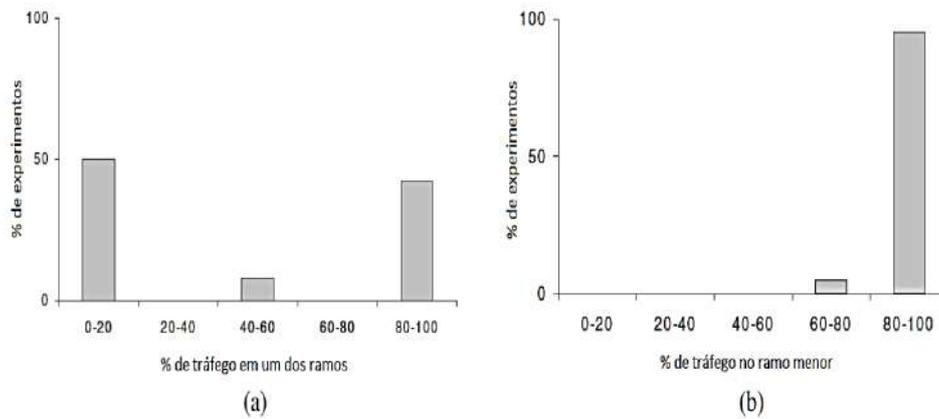


Figura 18 - Gráfico indicando o tráfego nos ramos nos dois experimentos, (fonte: Dorigo 2006).

### V.2.3.1.3 Formigas Reais X Artificiais

As formigas “artificiais”, criadas para solucionar problemas de otimização via ACO, possuem muitas semelhanças e algumas diferenças com relação às formigas “reais” encontradas na natureza (DORIGO J. F., 1997). As formigas reais ou artificiais buscam o caminho mais curto. As formigas reais escolhem o menor caminho entre o ninho e uma dada fonte de alimento, enquanto que as formigas artificiais, buscam menores caminhos a depender do problema a ser otimizado;

- Colônia de agentes cooperativos: tanto na natureza como no mundo virtual, as formigas agem de maneira cooperativa por meio da deposição e evaporação do feromônio, a qual se trata de uma substância química quando envolve formigas reais, já no caso das formigas artificiais, é utilizada como uma variável matemática que conectará o processo;
- Trilhas de feromônio: o feromônio depositado pelas formigas atua nas duas realidades, modificando o meio ambiente e, conseqüentemente, ratificando o aprendizado gerado pelas formigas;
- Inteligência coletiva: tanto na realidade como no ACO, a inteligência é obtida através da coletividade, visto que, o comportamento individual é insuficiente ou aleatório;
- Comportamento estocástico: a forma probabilística é característica das duas realidades.

Não obstante, existem algumas características que são próprias das formigas “artificiais”:

- Natureza do movimento: as formigas artificiais se deslocam de maneira discreta, enquanto nas formigas reais os movimentos são contínuos;
- Feromônio: o depósito de feromônio no ACO ocorre baseado na qualidade da solução encontrada;
- Memória: as formigas reais não possuem uma estrutura de memória como no caso das virtuais, que as impeça de realizar movimentos.

#### V.2.3.1.4 Algoritmos inspirados no ACO

#### V.2.3.1.5 "Ant System" - AS

Para um melhor entendimento sobre o método ACO, a seguir é apresentada a formulação do algoritmo AS. Esta metodologia foi aplicada para resolver o problema clássico do caixeiro viajante (TSP). O TSP consiste em, por exemplo, dado um conjunto de cidades e dada também a distância entre elas, tem-se que determinar a menor rota para que contemple todas as cidades, passando uma única vez por cada cidade e retorne ao local de partida. A Figura 19 exemplifica a construção da rota.

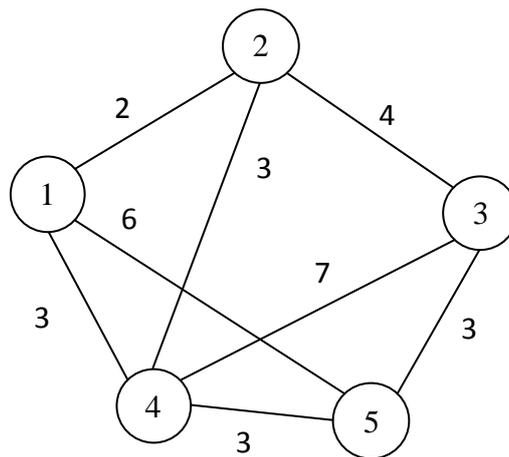


Figura 19 - Construção de rota, (fonte: própria).

Durante a etapa de construção, a formiga deve escolher um caminho, dentre as possibilidades de trilhas, tendo como base o seu conhecimento individual (distâncias entre as cidades) e coletivo (quantidade de feromônio depositado nas ligações) conforme a Figura 20. A cada iteração o conhecimento coletivo é atualizado.

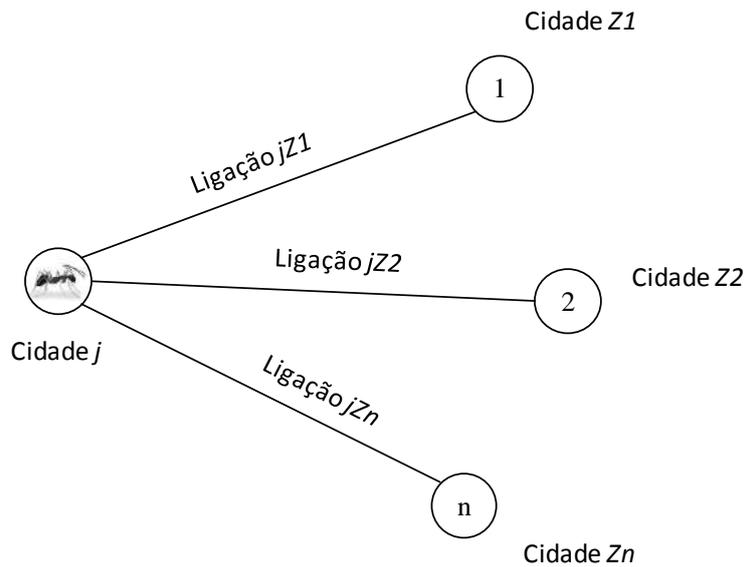


Figura 20 - Escolha da Rota, (DORIGO, BIRATTARI, & STÜTZLE, 2006).

Na busca por alimento, as formigas inicialmente se movimentam sem direção preferencial. Mais tarde, as formigas que escolheram caminhos mais curtos entre o formigueiro e a fonte de alimento, completarão as expedições de forma mais rápida, isto faz com que haja reforço na trilha de feromônio. Portanto, as formigas tendem a escolher esta rota. Para evitar a estagnação do algoritmo e as formigas ficarem presas a soluções locais, Stutzle e Hoos apresentaram o algoritmo MMAS. (STUTZLE & HOOS, 2000).

No ano 2000, De acordo com Stutzle e Hoos, a utilização da melhor solução de uma iteração, aumenta o efeito de exploração das melhores soluções durante o processo e ao mesmo tempo, contribui para o efeito de intensificação do processo, utilizando sempre as melhores soluções em cada iteração para a atualização do feromônios (STUTZLE & HOOS, 2000).

Neste trabalho o algoritmo ACO utilizado para criação da população inicial ser o ACS que segundo Dorigo, Maniezzo e Colorni, quando comprado a um algoritmo “*Ant System*” inicialmente desenvolvido, diferencia-se em dois pontos principais:

1. Primeiramente, o feromônio é atualizado apenas para as trilhas (arcos) pertencentes à melhor rota.
2. Em segundo lugar, cada vez que uma formiga se desloca de uma cidade  $i$  para uma cidade  $j$ , ela remove certa quantidade de feromônio do arco, com

o objetivo de aumentar a exploração de caminhos alternativos (DORIGO, MANIEZZO, & COLORNI, 1996).

Basicamente o ACS funciona da seguinte forma: as formigas são inicialmente posicionadas em algum local de acordo com uma regra de inicialização (por exemplo, as formigas podem ser posicionadas de forma aleatória em subestações de um sistema de distribuição). Posteriormente, cada formiga segue um caminho aplicando uma regra de transição de estados. Durante a construção do caminho de cada formiga, ela pode modificar a quantidade de feromônio nas bordas visitadas através de uma regra de atualização local a ser determinada e especificada. Uma vez que todas as formigas tenham concluído o seu caminho, a quantidade de feromônio das bordas é atualizada novamente aplicando a regra de atualização global.

O algoritmo ACS para construção topologia de redes pode ser descrito de forma simplificada como:

$$P_k = \begin{cases} \operatorname{argmax}_{j \in J_k(i)} \{[\tau(i, j)]^\alpha [\eta(i, j)]^\beta\} & , se q \geq q_0 \\ 0 & , se q \leq q_0 \end{cases} \quad (54)$$

Onde  $P_k$  é a probabilidade da formiga  $k$  optar pela aresta  $(i, j)$ ;  $J_k$  é a lista de vértices ainda não visitados pela formiga  $k$ ; A variável  $\tau(i, j)$  é a representação das trilhas de feromônio, a quantidade de feromônio no ramo  $(i, j)$ , que serão atualizadas pelo acréscimo e evaporação do feromônio do ramo  $(i, j)$ , representada pela equação (55), conhecida como regra de atualização global (DORIGO, MANIEZZO, & COLORNI, 1996).

O conjunto  $J_k$  é um conjunto dos ramos da rede de distribuição que ainda não foram avaliadas pela formiga  $k$ . A parcela  $\eta(i, j)$  representa a resistência elétrica no ramo  $i, j$ , conhecida no ACS como informação heurística. O parâmetro  $q$  é um número aleatório dentro do intervalo  $[0, 1]$  sendo assim quando os valores de  $q_0$  estão mais próximos de 1, tem-se uma priorização da intensificação, enquanto que, quando os valores de  $q_0$  mais próximos de 0, prioriza-se a diversificação, por conta da regra de decisão do ACO a ser utilizada com maior frequência). O parâmetro  $\alpha$  (*alpha*), associado ao feromônio elevado à potência *alpha*, indica a relevância do feromônio no trecho estudado. O parâmetro  $\beta$  (*beta*), associado também a potenciação da resistência elétrica, indica a

relevância da informação heurística, do custo de um caminho entre duas cargas de um sistema distribuição comparado a outros caminhos realizados por outras formigas.

$$\tau_{i,j} \leftarrow \begin{cases} (1 - \rho) \tau_{ij} + \rho \Delta \tau_{i,j} & , \text{ se } (i,j) \in \text{a melhor rota.} \\ \tau_{i,j} & , \text{ se } (i,j) \notin \text{a melhor rota.} \end{cases} \quad (55)$$

Onde  $\Delta \tau_{i,j}$ , representa o depósito de feromônios de todas as formigas no caminho  $(i,j)$ ; e  $\rho$  a evaporação do feromônio durante o processo;

### V.2.3.2 Formulação matemática para utilização do ACO na criação da população inicial melhorada

Basicamente a função objetivo e as restrições adotadas serão utilizadas nesta etapa do trabalho para gerar uma população inicial melhorada, ou seja, minimizar uma função objetivo representando os custos fixos correspondente ao investimento em linhas e subestações e os custos associados ao funcionamento do sistema, expressos pela Equação (56), sujeitas as restrições de balanço de energia, capacidades dos condutores, capacidades das subestações, limites de tensão nos nós e radialidade do sistema, são dadas por:

$$\min f = \left[ \begin{array}{l} \sum_{ij \in \Omega_l} \sum_{a \in \Omega_a} (c_{ij,a,t} n_{ij,a,t} l_{ij}) + \sum_{i \in \Omega_{b_s}} \sum_{a \in \Omega_{t_s}} (c_{sib} m_{i,b,t}) + \\ \delta_{l_t} \sum_{ij \in \Omega_l} \sum_{a \in \Omega_a} \beta_{ij,a,t} g_{ij,a} (V_{i,t}^2 + V_{j,t}^2 - 2 V_{i,t} V_{j,t} \cos \theta_{ij,t}) + \\ \delta_{s_t} \sum_{ij \in \Omega_l} \alpha_{i,b,t} (P_{s_{i,t}}^2 + Q_{s_{i,t}}^2) \end{array} \right] \quad (56)$$

Sujeito as mesmas restrições da equação Equacao (1) detalhadas nas sessões anteriores. Cabe ressaltar que a Equação (56), difere da Equação (1), na utilização da variável TVP (taxa de valor presente), utilizada no cálculo da função de custo de uma alternativa em múltiplos estágios de planejamento sujeita as mesmas restrições anteriormente explicadas. Sendo assim utilizamos a função objetivo e as restrições no intuito de encontrar uma população inicial mais apta, e não a solução final do problema do PSDEE.

Para realizar a composição da topologia do sistema de distribuição, é necessário conhecer muito bem o problema. A primeira coisa que deve ser feita no problema em questão, é identificar as cargas e verificar quais as barras serão conectadas no PSDEE. Durante o processo, também é importante verificar se, no fechamento de uma ligação, ou

seja, na criação ou redimensionamento de um ramo, há a formação de laços, o que por sua vez, viola a restrição de radialidade do sistema.

### **V.2.3.3 Detalhamento do Algoritmo Colônia de Formigas na geração da população melhorada.**

Nesta etapa do trabalho foi utilizada a meta-heurística ACO para gerar uma população inicial mais viável.

A descrição do ACS para criação da população inicial segue os seguintes passos:

Passo 1: Inicialmente, cada linha da rede/condutor possui a mesma concentração de feromônio ( $\tau$ ); o número de agentes ( $N_a$ ) é definido, juntamente com o número de ciclos ( $N_c$ ) e os parâmetros que determinam os pesos da resistência ( $\alpha$ ) dos ramos e a concentração de feromônios ( $\beta$ ) nos mesmos;

Passo 2: Após todos os condutores serem identificados, os agentes são posicionados aleatoriamente sobre as barras de carga da rede. Neste passo será criada uma lista de barras ( $J_k$ ) onde serão definidas quais barras serão visitadas e avaliadas por cada agente  $k$ ;

Passo 3: Quando um agente  $k$  se encontra sobre a barra  $i$ , ele seleciona a barra vizinha  $j$  (barra contida em  $J_k$  e que está diretamente conectada a barra  $i$ ) a ser visitada, baseado na concentração de feromônio ( $\tau_{i,j}$ ) sobre a linha  $(i,j)$ , e no inverso da resistência ( $\eta_{i,j}$ ) desta linha;

Passo 4: Após um dado número de passos (completando um ciclo), cada agente terá percorrido um caminho completo definido para cada agente conforme descrito no Passo 2, gerando a topologia da rede de distribuição de energia. Se o agente  $k$  não conseguir percorrer um caminho completo após um ciclo, sua rota é descartada e ele retorna no próximo ciclo. A seguir, estima-se o valor da função objetivo equação (1) para cada uma destas topologias, que corresponde à soma das perdas ativas em cada ramo da rede de distribuição estudada.

Passo 5: Em seguida, atualiza-se o feromônio sobre a topologia mais viável, ou seja, a topologia que conteve o menor valor de perdas ativas nos ramos da rede de distribuição projetada;

Passo 6: Se o número máximo de ciclos não for atingido, voltar ao passo 2.

Passo 7: Se o número máximo de ciclos definido no Passo 2, na avaliação inicial da rede, for atingido, fim do algoritmo. Neste ponto, saberemos qual foi a melhor topologia encontrada pela colônia de formigas.

A Figura 21 mostra o pseudocódigo do algoritmo ACS aplicado à construção de topologias de sistemas de distribuição.

```

/*INICIALIZAÇÃO*/
PARA cada linha (i,j) FAZER
     $\tau_{i,j}(0) = \tau_0$ 
FIM
PARA  $k = 1$  até  $N_a$  FAZER
    Distribuir aleatoriamente os agentes sobre as barras dos sistema.
FIM
Seta  $T^+$  a melhor topologia encontrada no inicio e  $P^+$  o valor de perdas ativas desta.
/*Laço principal*/
PARA  $t = 1$  até  $N_c$  FAZER
    PARA  $k = 1$  até  $N_a$  FAZER
        Construir a topologia  $T^k(t)$  aplicando  $n - 1$  vezes os seguintes
passos:
        Escolher a próxima barra  $j$ ,  $j \in J_i^k$ , como segue
        
$$j = \begin{cases} \operatorname{argmax}_{j \in J_{k(i)}} \{ [\tau(i,j)]^\alpha [\eta(i,j)]^\beta \}, & \text{se } q \geq q_0 \\ 0 & J, \text{ se } q \leq q_0 \end{cases}$$

        Após cada transição do agente  $k$  aplicar a atualização local do
feromônio
        
$$\tau_{ij}(t) \leftarrow (1 - \rho) \tau_{ij} + \rho \Delta \tau_{i,j}$$

FIM
PARA  $k = 1$  até  $N_a$  FAZER
        Calcular as perdas ativas  $P^k(t)$  produzidas pela topologia  $T^k(t)$ 
encontrada pelo agente  $k$ 
FIM
SE uma topologia com menores perdas foi encontrada ENTÃO
        Atualizar  $T^+$  e  $P^+$ 
FIM
SE uma topologia com menores perdas foi encontrada ENTÃO
        
$$\tau_{ij}(t) \leftarrow (1 - \rho) \tau_{ij}(t) + \rho \Delta \tau_{i,j}(t), \text{ onde } \Delta \tau_{i,j}(t) = 1/P^+$$

FIM
FIM
imprimir a melhor topologia  $T^+$  e seu valor de perdas ativas  $P^+$ 
PARAR

```

Figura 21 - Pseudocódigo do ACS utilizado para construção da população inicial, (CIVANLAR, GRAINGER, & YIN, 1988).

A Figura 22 mostra o fluxograma de atividades do algoritmo de colônia de formigas para definir uma população inicial de um problema que está sendo submetido ao PSDEE através do Ag especializado.

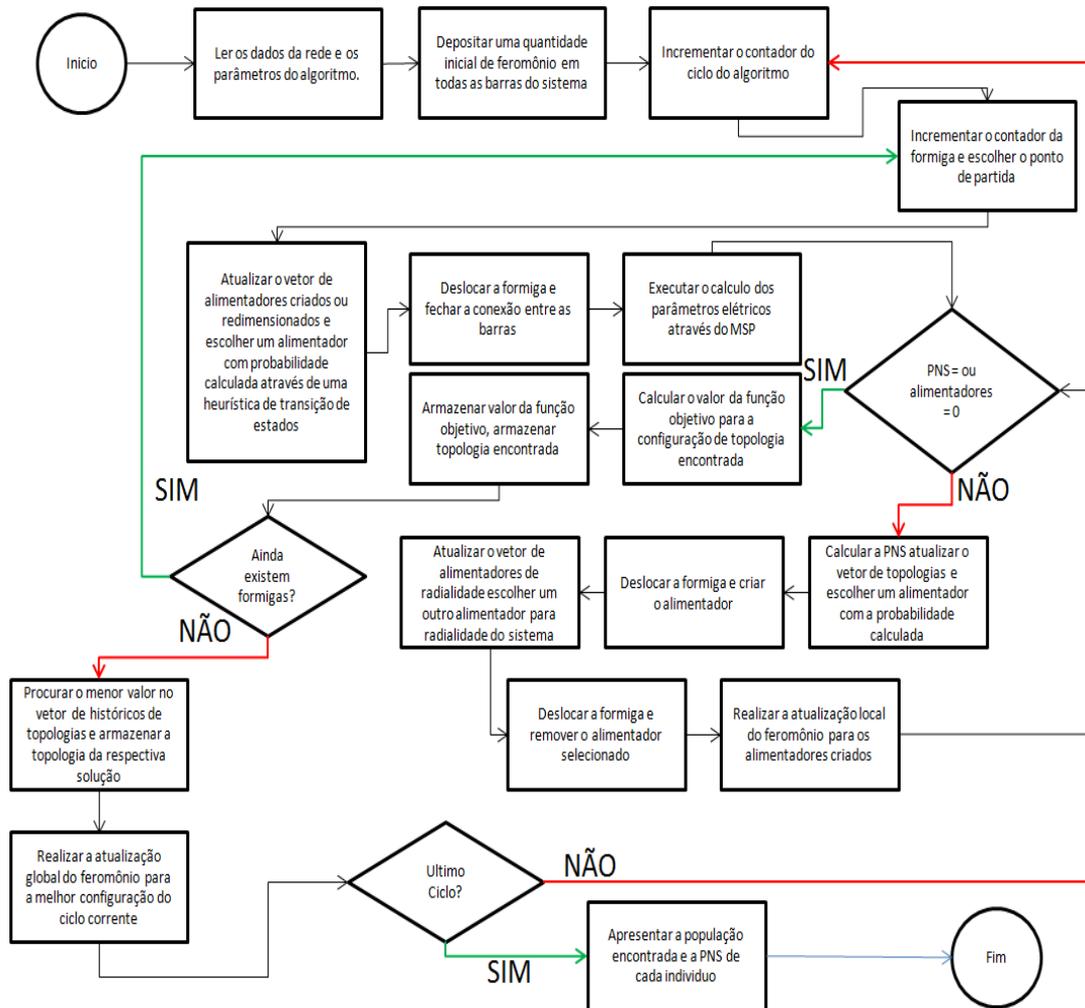


Figura 22 - Fluxograma do ACS para o problema de configuração, (fonte: Própria).

### V.2.3.3.2 – Geração da população inicial

Para entendermos melhor a criação da população inicial através do algoritmo de colônia de formigas vamos aplicar a metodologia em um sistema de 5 barras.

A Figura 23 representa um sistema distribuição de 5 barras submetido ao algoritmo de colônia de formigas:

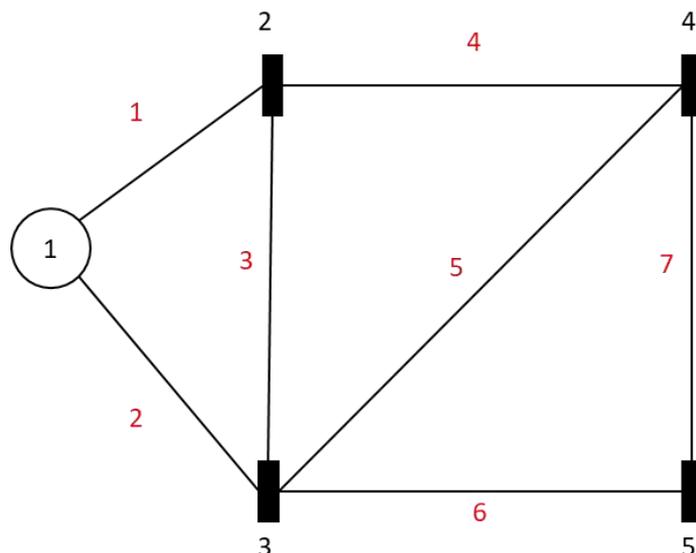


Figura 23 - Sistema de 5 barras, (CIVANLAR, GRAINGER, & YIN, 1988)

Os dados elétricos do sistema são:

- A barra 1 é a subestação do sistema (SE), e o valor da tensão de referência é  $V_0 = 1.05 + j0.0$  p.u.;
- Os dados da barra e das conexões das mesmas no sistema são apresentados nas tabelas 1 e 2 abaixo demonstradas:

Tabela 1 - Dados elétricos do sistema de 5 barras, (CIVANLAR, GRAINGER, & YIN, 1988)

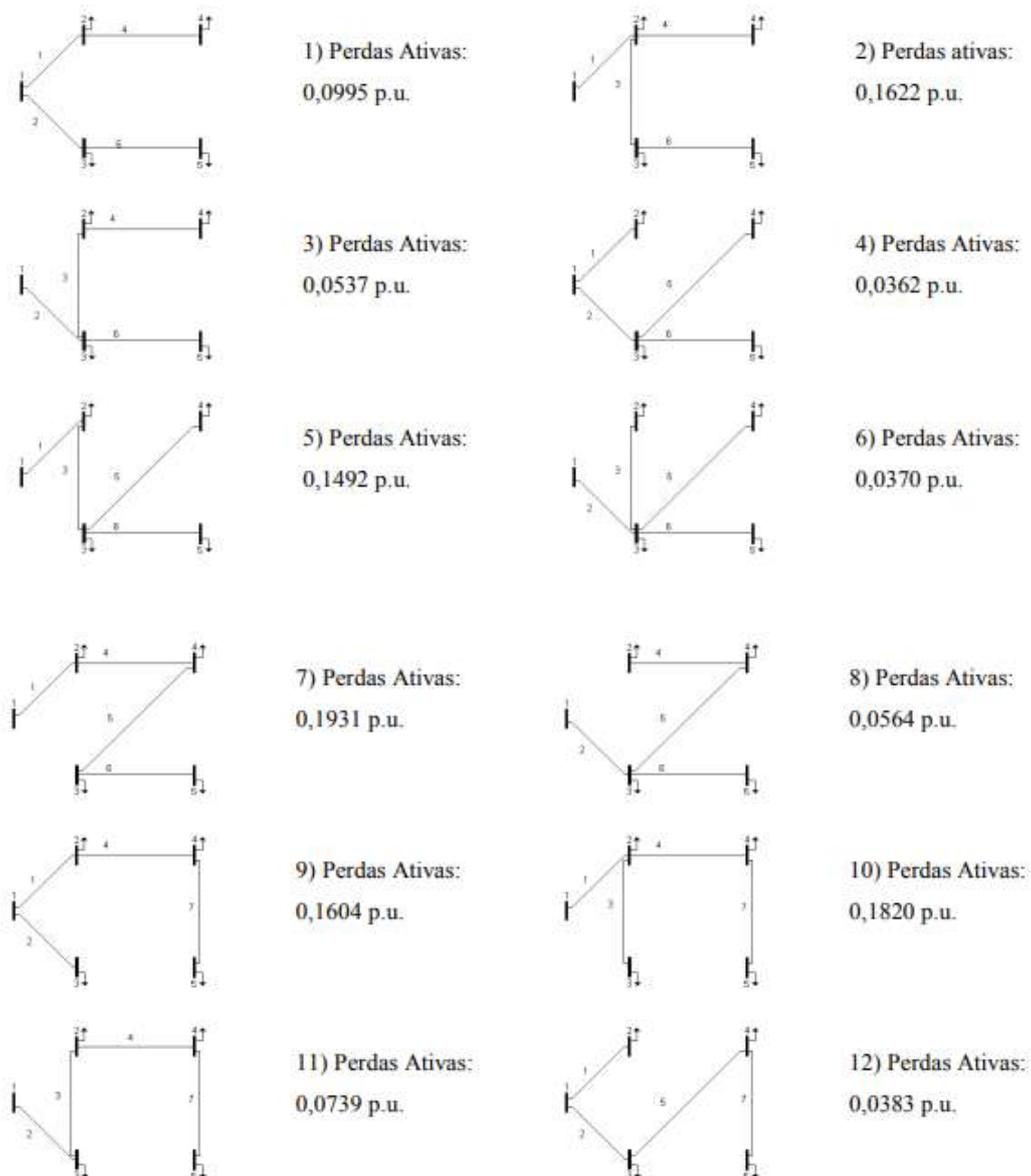
| Barra | Potência ativa (p.u.) | Potência reativa (p.u.) |
|-------|-----------------------|-------------------------|
| 1     | 0                     | 0                       |
| 2     | 1,28                  | 1,28                    |
| 3     | 0,32                  | 0,16                    |
| 4     | 1,6                   | 0,8                     |
| 5     | 0,74                  | 0,37                    |

Tabela 2 - Dados do sistema de 5 barras, (CIVANLAR, GRAINGER, & YIN, 1988)

| Ramo | Barra Inicial - DE | Barra Final - PARA | R(p.u.) | X (p.u.) |
|------|--------------------|--------------------|---------|----------|
| 1    | 1                  | 2                  | 0,0066  | 0,0033   |
| 2    | 1                  | 3                  | 0,0016  | 0,0006   |
| 3    | 2                  | 3                  | 0,0003  | 0,0002   |

|   |   |   |        |        |
|---|---|---|--------|--------|
| 4 | 2 | 4 | 0,0051 | 0,0005 |
| 5 | 2 | 4 | 0,0005 | 0,0005 |
| 6 | 3 | 5 | 0,0027 | 0,0012 |
| 7 | 4 | 5 | 0,0033 | 0,0015 |

Considerando a “barra 1”, a subestação (SE) e o número de linhas  $n_l = 7$ , existem 128 configurações possíveis entre as viáveis e inviáveis (configurações:  $2^{nc} = 2^7 = 128$ ). Restringindo o universo de soluções candidatas, vamos aplicar o critério de radialidade. Com isso reduzimos o universo para 21 configurações de topologias de rede viáveis. As 21 (vinte e uma) topologias radiais possíveis estão demonstradas a seguir com suas respectivas perdas (em p.u.) na Figura 24 :



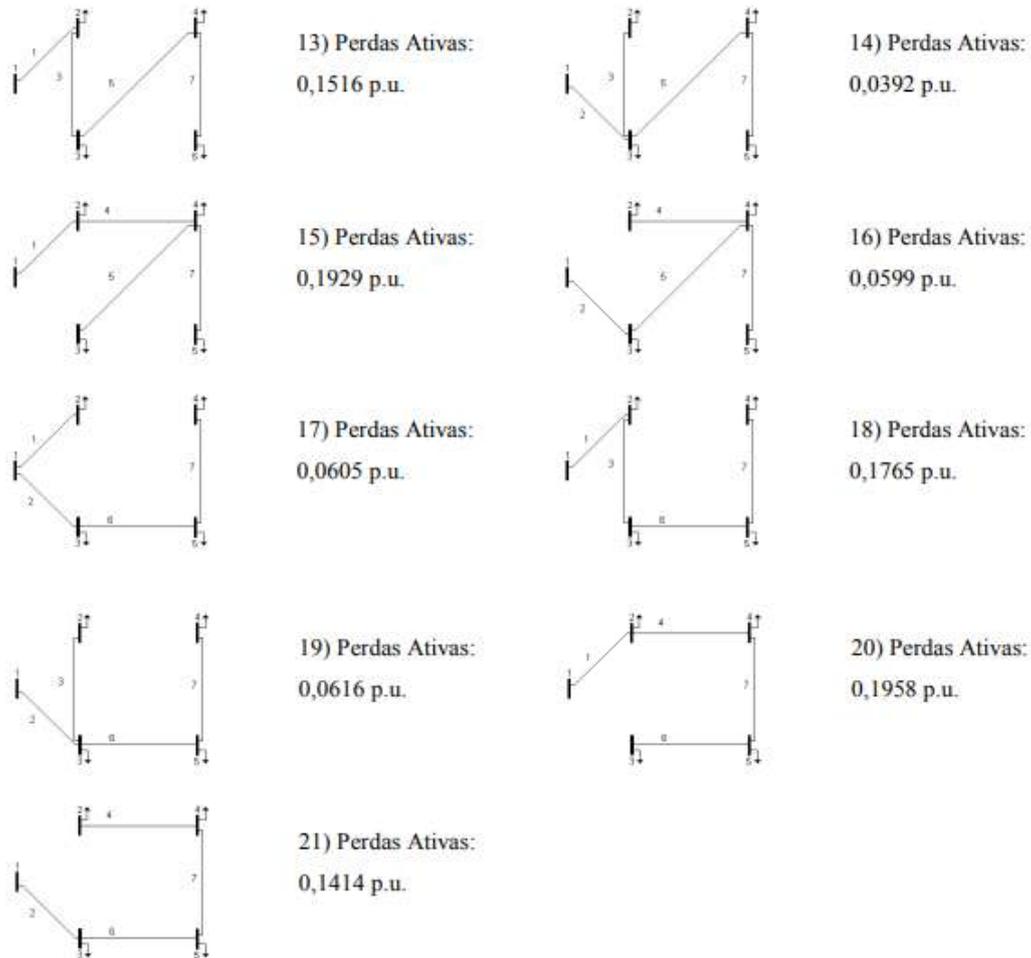


Figura 24 - 21 Topologias, (CIVANLAR, GRAINGER, & YIN, 1988).

Para mostrar um ciclo completo do algoritmo, vamos gerar apenas uma topologia de rede viável respeitando o critério de radialidade. Uma vez definidos os parâmetros iniciais do algoritmo, sorteia-se uma barra aleatória do sistema. Os parâmetros foram definidos da seguinte forma: Número de agentes ( $N_a$ ) = 1; Feromônio Inicial ( $\tau_0$ ) = 1,0; Peso ( $\beta$ ) = 2,0; Decaimento ( $\rho$ ) = 0,1; Parâmetro ( $q_0$ ) = 0,9;

Supondo que a “barra 2” seja sorteada como ponto de partida do agente. Cria-se a lista de barras a serem visitadas por este agente:  $[J^1] = 1\ 3\ 4\ 5$ ; da figura abaixo sabe-se que as “barras 1, 3 e 4” estão ligadas diretamente à “barra 2”.

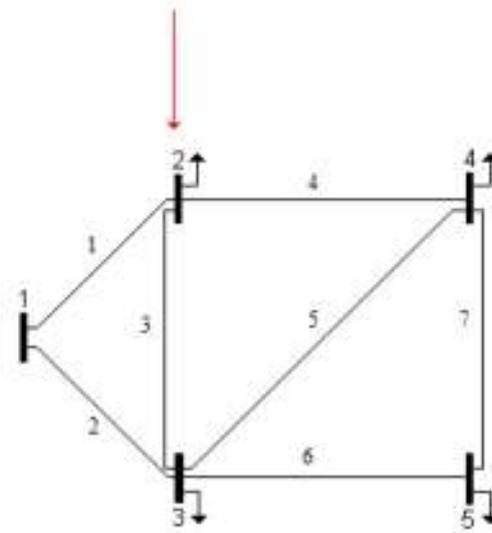


Figura 25 - Escolha da barra inicial (barra 2), (CIVANLAR, GRAINGER, & YIN, 1988).

O próximo passo é sortear aleatoriamente a variável  $q \in [0,1]$  para determinar qual a próxima barra será a escolhida. Supondo que  $q = 0,94 \rightarrow q > q_0$ , passa-se da equação (54) para a equação (55) e calculam-se as probabilidades de cada barra ser visitada pelo agente, ou seja,  $P_{21}$  (probabilidade do agente visitar a “barra 1” a partir da “barra 2”),  $P_{23}$  (probabilidade do agente visitar a “barra 3” a partir da “barra 2”) e  $P_{24}$  (probabilidade do agente visitar a “barra 4” a partir da “barra 2”).

Neste ponto, deve-se observar que a equação (55) representa a “probabilidade”, e não a “certeza”, de escolha de um agente. Se fosse ao contrário, a barra com maior probabilidade sempre seria escolhida e esta equação perderia seu significado.

Então é feito um sorteio aleatório, agora entre as barras a serem visitadas, utilizando um gerador aleatório de números inteiros. Supondo que a barra 1 seja a sorteada, ela é retirada de  $J^l$  e o feromônio sobre a linha 1 que interliga as “barras 2 e 1” é atualizado:

$$\left\{ \begin{array}{l} J_1 = [3 \ 4 \ 5] \\ \tau_{21} = (1 - \rho)\tau_{21} + \rho \tau_0 = (1 - 0,1)(1) + (0,1)(1) = 1 \end{array} \right.$$

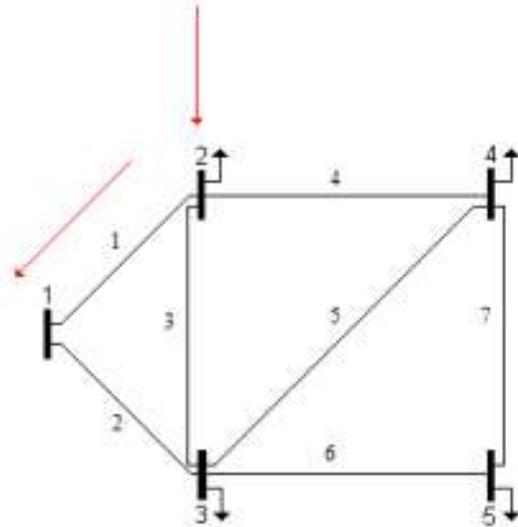


Figura 26 - Deslocamento do agente deste a barra 2 até a barra 1,  
(CIVANLAR, GRAINGER, & YIN, 1988).

Agora, têm-se que a única barra da lista  $J^I$  que está ligada à “barra 1” é a “barra 3”. Neste caso, não há escolha de barra a ser visitada. O agente passa da “barra 1” direto para “barra 3”.

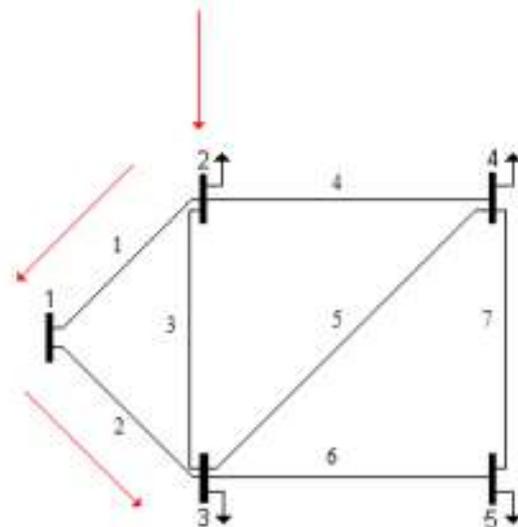


Figura 27 - Deslocamento do agente desde a barra 2 até a barra 3,  
(CIVANLAR, GRAINGER, & YIN, 1988).

Atualiza-se  $J^I$  e o feromônio da linha 2 que interliga as barras 1 e 3:

$$\left\{ \begin{array}{l} J_l = [4 \ 5] \\ \tau_{13} = (1 - \rho)\tau_{13} + \rho \tau_0 = (1 - 0,1)(1) + (0,1)(1) = 1 \end{array} \right.$$

Verifica-se que as “barras 4 e 5” estão ligadas à “barra 3”. Sorteia-se aleatoriamente a variável  $q \in [0,1]$ . Supondo agora que  $q \leq q_0$ , escolhe-se a barra que tem o maior argumento, neste caso a “barra 4”, como pode ser visto:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{34} = \tau_{35} = \tau_0 = 1; \\ \eta_{34} = 2000; \\ \eta_{35} = 370,37; \\ \beta = 2. \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} arg_{34} = \{[\tau_{34}][\eta_{34}]^\beta\}1 (2000)^2 = 4.000.000 \\ arg_{35} = \{[\tau_{35}][\eta_{35}]^\beta\}1 (370,73)^2 = 137.174 \end{array} \right.$$

$$arg_{34} > arg_{35}$$

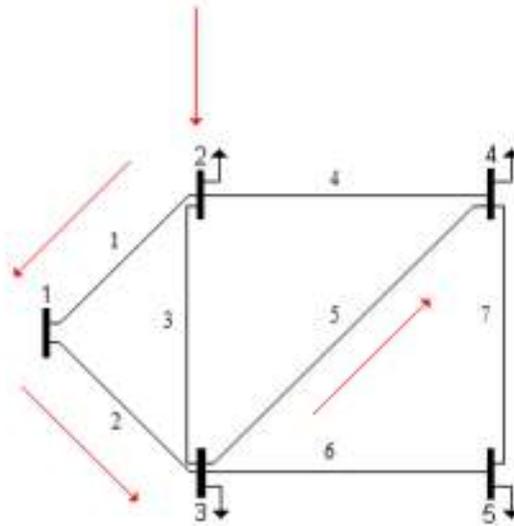


Figura 28 - Deslocamento do agente desde a barra 2 até a barra 4, (CIVANLAR, GRAINGER, & YIN, 1988).

Atualiza-se o feromônio do “ramo 5” que interliga as “barras 3 e 4” e retira-se a “barra 4” de  $J^l$ .

$$\begin{cases} J_l = [5] \\ \tau_{34} = (1 - \rho)\tau_{34} + \rho \tau_0 = (1 - 0,1)(1) + (0,1)(1) = 1 \end{cases}$$

Neste ponto, restou apenas a “barra 5” a ser escolhida e, como ela está ligada diretamente com a “barra 4”, o agente passa através do “ramo 7” para a “barra 5” finalizando o ciclo ( $J_1$  está vazia). Atualiza-se o feromônio sobre o “ramo 7” que interliga as “barras 4 e 5”:

$$\begin{cases} J_l = [\emptyset] \\ \tau_{45} = (1 - \rho)\tau_{45} + \rho \tau_0 = (1 - 0,1)(1) + (0,1)(1) = 1 \end{cases}$$

A topologia encontrada refere-se à topologia de número 12, dentre as 21 topologias possíveis mostradas anteriormente na Figura 24. Neste momento, executa-se o algoritmo de fluxo de carga e calcula-se a função objetivo através da equação

(1), determinando o valor das perdas para esta topologia (perdas iguais a  $0,0383$  p.u.). Faz-se a atualização global do feromônio sobre os ramos: “1” (que interliga as “barras 2 e 1”), “2” (que interliga as “barras 1 e 3”), “5” (que interliga as “barras 3 e 4”) e “7” (que interliga as “barras 4 e 5”).

$$\begin{cases} \Delta_{ij} = \frac{1}{0,0383} = 26,1 \\ \tau_{ij} = (1 - \rho) \tau_{ij} + \rho \Delta_{ij} = (1 - 0,1)(1) + (0,1)(1) = 1 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \tau_{21} = (1 - 0,1)(1) + (0,1)(26,1) = 3,5 \\ \tau_{13} = (1 - 0,1)(1) + (0,1)(26,1) = 3,5 \\ \tau_{34} = (1 - 0,1)(1) + (0,1)(26,1) = 3,5 \\ \tau_{45} = (1 - 0,1)(1) + (0,1)(26,1) = 3,5 \end{cases}$$

O resumo dos passos executados pelo agente e a topologia resultante podem ser vistos na figura a seguir:

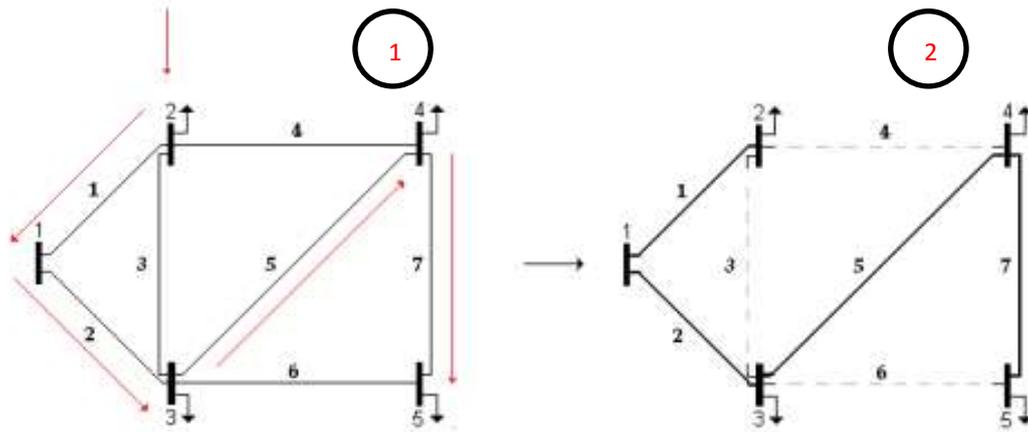


Figura 29 - Ciclo de geração de topologia: (1) passos do agente; (2) topologia resultante, (CIVANLAR, GRAINGER, & YIN, 1988).

O mesmo agente saindo da “barra 2”, em ciclos futuros, também poderia encontrar outras opções de topologia, como as topologias 17 e 21 a seguir:

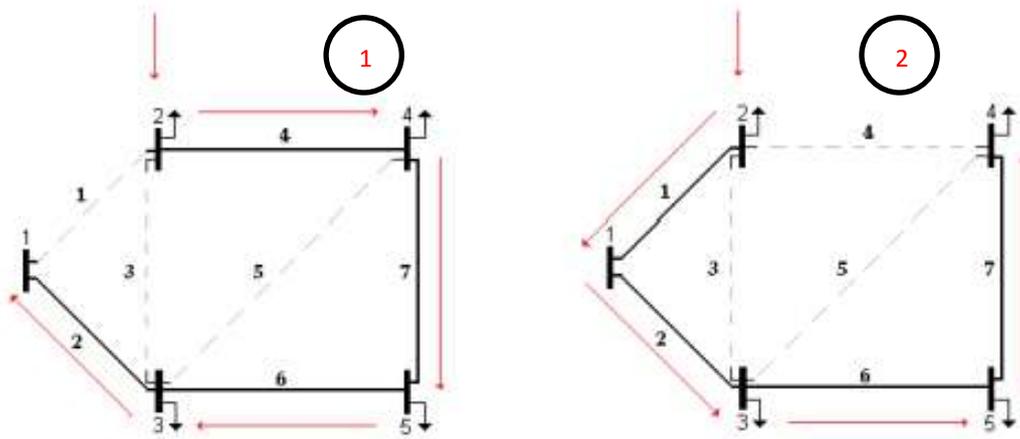


Figura 30 - Topologias: (1) topologia 21; (2) topologia 17, (CIVANLAR, GRAINGER, & YIN, 1988).

#### V.2.4 – Avaliação na População Inicial

Após a criação da população inicial pela heurística do algoritmo de colônia de formigas, o AG especializado passa a tarefa de avaliação desta população. Uma solução é considerada inviável quando uma ou mais restrições expressas no modelo matemático do PSDEE da Seção IV.1 são violadas. A viabilidade ou inviabilidade das soluções geradas estão relacionadas às restrições definidas nas listas de equações compreendidas da equação (6) até a equação (21) do referido modelo, pois a avaliação das demais restrições serão avaliadas durante o processo. A variável que vai armazenar o nível de violação de cada solução será a variável  $G$ .

A seguir será apresentada a metodologia para classificar as violações das restrições nas soluções geradas pelo ACS (População Inicial).

Violação I: Se a capacidade da potência aparente fornecida pela subestação da barra  $i$  é menor que a potência demandada pelas cargas dos nós de consumo mais as perdas então, o valor da inaptidão  $G_s$  é calculada pela equação (57):

$$G_s = \sum_{t=1}^T \sum_{i \in \Omega_{bs}} g_{i,t} \quad (57)$$

Sendo:

$$g_{i,t} = \begin{cases} 0 & \text{se } ||S_{i,j}^{dem}|| \leq S_{i,j}^{max} \\ \frac{||S_{i,j}^{dem}||}{S_{i,j}^{max}} & \text{se } ||S_{i,j}^{dem}|| > S_{i,j}^{max} \end{cases} \quad (58)$$

Onde,  $||S_{i,j}^{dem}||$  é a potência aparente demanda da subestação da “barra  $i$ ” no “estagio  $t$ ”; e  $S_{i,j}^{max}$  a potência aparente máxima da subestação da “barra  $i$ ” no “estagio  $t$ ”.

Violação II: Se a corrente que passa pelo “ramo  $ij$ ” é superior à permitida pelo condutor do “tipo  $a$ ” então, o valor da inaptidão  $G_i$  é determinado pela equação (59):

$$G_i = \sum_{t=1}^T \sum_{ij \in \Omega_l} \sum_{a \in \Omega_a} y_{ij,a,t} \quad (59)$$

Sendo:

$$y_{ij,a,t} = \begin{cases} 0 & \text{se } ||I_{ij,t}|| \leq I_{ij,a}^{max} \\ \frac{||I_{ij,t}||}{I_{ij,a}^{max}} & \text{se } ||I_{ij,t}|| > I_{ij,a}^{max} \end{cases} \quad (60)$$

Onde,  $||I_{ij,t}||$  é a magnitude da corrente que passa no “ramo  $ij$ ”;  $I_{ij,a}^{max}$  a corrente máxima permitida pelo condutor do “tipo  $a$ ” instalado no “ramo  $ij$ ”.

Violação III: Se a corrente que passa pelo ramo  $ij$  é superior à permitida pelo condutor a então, o valor da inaptidão  $G_v$  é determinado pela equação (61):

$$G_v = \sum_{t=1}^T \sum_{j \in \Omega_b} w_{i,t} \quad (61)$$

Sendo:

$$w_{i,t} = \begin{cases} 0 & \text{se } ||V_{i,t}|| \leq V_{min} \\ \frac{V_{min}}{||V_{i,t}||} & \text{se } ||V_{i,t}|| > V_{min} \end{cases} \quad (62)$$

Onde,  $||V_{i,t}||$  define a magnitude de tensão na “barra  $i$ ” no “estágio  $t$ ”; e  $V_{min}$  define a magnitude de tensão mínima permitida do sistema.

Violação IV: Refere-se a violação de uma ou mais das restrições expressas pelas equações (14) a (17) relacionadas com os limites superiores dos índices de continuidade de uma solução em relação aos valores estipulados pela agência reguladora. O valor da inaptidão de uma proposta de solução  $G_c$  é calculado pela equação (63):

$$G_c = \sum_{t=1}^T \sum_{i \in \Omega_b} (z_{i,t} + u_{i,t}) + \sum_{t=1}^T \sum_{al \in \Omega_{al}} (v_{al,t} + r_{al,t}) \quad (63)$$

Onde,  $\Omega_{al}$  é o conjunto de ramos;  $\Omega_b$  o conjunto de barras;  $z_{i,t}$  a impedância da “barra  $b$ ” no “estágio  $t$ ”;  $r_{al,t}$  a resistência do “ramo  $al$ ” no “estágio  $t$ ”; e  $v_{al,t}$  a tensão do ramo  $al$  no “estágio  $t$ ”;

Sendo:

$$z_{i,t} = \begin{cases} 0 & \text{se } DIC_{i,t} \leq DIC_p \\ \frac{DIC_{i,t}}{DIC_p} & \text{se } DIC_{i,t} > DIC_p \end{cases} \quad (64)$$

Onde,  $DIC_{i,t}$  é a duração da Interrupção do ponto de “conexão  $i$ ” no “estágio  $t$ ”.

$$u_{i,t} = \begin{cases} 0 & \text{se } FIC_{i,t} \leq FIC_p \\ \frac{FIC_{i,t}}{FIC_p} & \text{se } FIC_{i,t} > FIC_p \end{cases} \quad (65)$$

Onde,  $FIC_{i,t}$  é a frequência de Interrupção do ponto de “conexão  $i$ ” no “estágio  $t$ ”.

$$v_{al,t} = \begin{cases} 0 & \text{se } FEC_{k,t} \leq FEC_p \\ \frac{FEC_{k,t}}{FEC_p} & \text{se } FEC_{k,t} > FEC_p \end{cases} \quad (66)$$

Onde,  $FEC_{k,t}$  é a frequência equivalente de interrupção do “ramo  $k$ ” no “estágio  $t$ ”.

$$r_{al,t} = \begin{cases} 0 & \text{se } DEC_{k,t} \leq DEC_p \\ \frac{DEC_{k,t}}{DEC_p} & \text{se } DEC_{k,t} > DEC_p \end{cases} \quad (67)$$

Onde,  $DEC_{k,t}$  é a duração equivalente de interrupção do “ramo  $k$ ” no “estágio  $t$ ”.

O valor total das violações  $G$  da solução candidata é calculado pela equação (68).

$$G = G_s + G_i + G_v + G_c \quad (68)$$

Em estudos de caso onde as restrições de confiabilidade são desprezadas,  $G_c = 0$ .

Assim como no Algoritmo Genético proposto em Chu & Beasley (AGCB), o algoritmo especializado desenvolvido vai armazenar os valores da função objetivo, ou seja, equação (1) e os valores das violações avaliadas pela equação (68) em dois vetores distintos. O primeiro vetor (vetor da função objetivo) será utilizado no processo de seleção do AG, enquanto que, o segundo vetor (vetor de violações) será utilizado no processo de substituição de um elemento na população corrente quando este elemento for menos viável que algum da população corrente.

### V.2.5 – Operação de Seleção

A seleção permite escolher os indivíduos da população corrente que irão participar das próximas gerações. A seleção do algoritmo genético especializado segue a mesma metodologia adotada em Rendón, Zuluaga e Ocampo (RENDÓN, ZULUAGA, & OCAMPO, 2008), onde os descendentes são escolhidos por meio da realização de jogos, e em cada jogo são selecionados aleatoriamente um número determinado de indivíduos. O vencedor de cada jogo é o indivíduo considerado de maior viabilidade. Optou-se por realizar “dois jogos”, e em cada um destes jogos são selecionados “três indivíduos da população corrente”. O vencedor de cada jogo, será o indivíduo que tiver o melhor valor da função de avaliação. Os dois ganhadores, um de cada jogo, “*PAI1*” e “*PAI2*”, passam para a fase de recombinação

Exemplificando, dada uma população inicial de  $n$  indivíduos, são selecionados 2 grupos com 3 indivíduos para os dois jogos da etapa de seleção, onde o “grupo 1” corresponde aos indivíduos  $P_{11}$ ,  $P_{12}$ ,  $P_{13}$ , e o grupo 2, os indivíduos  $P_{21}$ ,  $P_{22}$ ,  $P_{23}$  conforme indicado na Figura 31. Os indivíduos do “grupo 2” serão selecionados aleatoriamente após a avaliação do “grupo 1”, sendo assim não será impossível o “grupo 2” conter indivíduos que fizeram parte do “grupo 1” na etapa de seleção do “grupo 2”. Porém na metodologia adotada foi aplicada uma restrição, onde o vencedor do “torneio 1” nunca poderá ser selecionado no “grupo 2” para participar do “torneio 2”.

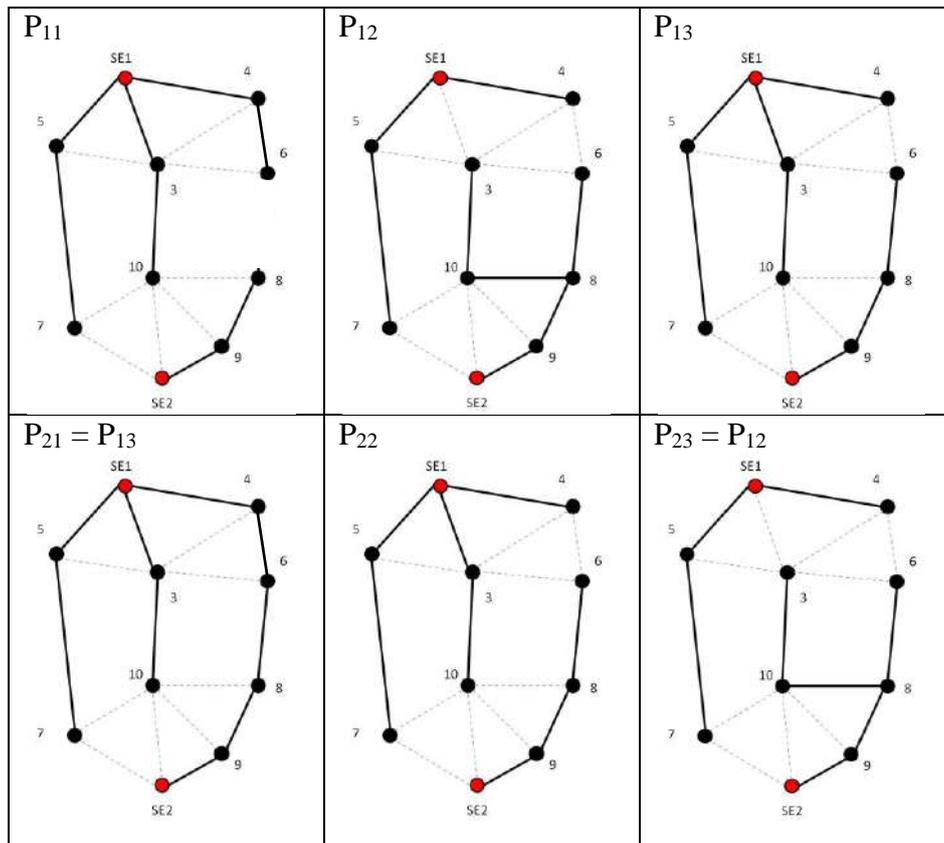


Figura 31 – Grupo 1 com 3 indivíduos selecionados, (fonte: própria).

Resolvendo o problema de fluxo de carga radial para cada indivíduo do grupo 1, encontramos os seguintes valores de perdas:  $P_{11} = 500$  kW;  $P_{12} = 630$  kW;  $P_{13} = 538$  kW. Escolhemos então, o melhor dos três, ou seja, o  $P_{11}$  pois tem o menor valor de perdas (500kv). Feito isso, escolhe-se aleatoriamente mais 3 indivíduos para compor o grupo 2, menos o  $P_{11}$  que já foi escolhido no passo anterior. Resolvendo o problema de fluxo de carga radial para cada indivíduo do “grupo 2”, encontramos os seguintes valores de perdas:  $P_{21} = 538$  kW;  $P_{22} = 712$  kW;  $P_{23} = 630$  kW. Escolhemos o indivíduo que contém as menores perdas no “grupo 2”, ou seja, o que apresente o menor valor de perdas, sendo assim escolhemos o  $P_{21}$ .

Feito isso, esta etapa é considerada finalizada, onde os indivíduos  $P_{11}$  e  $P_{21}$  foram selecionados para serem utilizado na etapa de recombinação do algoritmo genético especializado.

## V.2.6 – Etapa de Recombinação

O operador de recombinação consiste em promover a troca de parte das topologias dos descendentes selecionados para construir duas novas configurações de topologia de

rede, como detalhado em Reeves (REEVES, 2003). No entanto, considerando que o descendente gerado para o problema de PSDEE deve ter uma topologia radial e não deve exceder os limites de potência, algumas estratégias adicionais foram adotadas para garantir que a recombinação não viole as restrições do problema.

Na etapa de recombinação os dois indivíduos fruto da etapa anterior de seleção, “ $PAI1 = P_{11}$ ” e “ $PAI2 = P_{21}$ ”, são recombinados para que haja troca do material genético entre eles. A recombinação é realizada entre os descendentes onde as subestações selecionadas são as mesmas entre estágios avaliados. As informações referentes às subestações são transmitidas diretamente pelos pais para os descendentes que estão sendo gerados. O tipo de recombinação utilizada nesta etapa é a de um único ponto (“*single-point crossover*”), que consiste genericamente em escolher um número entre  $1$  e  $k - 1$  do vetor solução para realizar a troca de informações entre os indivíduos, sendo  $k$  o tamanho do vetor solução.

Para se obter o primeiro filho “*FILHO1*”, o descendente herda as informações genéticas relacionadas aos ramos situados à esquerda do ponto de recombinação como exemplificado na Figura 33. São ativados os nós das respectivas subestações que foram herdadas dos pais e são desconsiderados os ramos conectados as subestações desconsideradas ou inativas no estudo. Para completar a segunda parte das informações dos ramos do descendente, a partir das informações herdadas do “ $PAI1$ ” são identificados os ramos candidatos a serem conectados ao sistema de distribuição, porem que preferencialmente preservem as informações de ramos do “ $PAI2$ ”. Um destes ramos do “ $PAI2$ ” é selecionado aleatoriamente para ser conectado ao sistema.

Caso não seja encontrado nenhum candidato a ser conectado neste passo da recombinação, a condição de preservar a informação do “ $PAI2$ ” é relaxada e faz-se uma busca sobre todos os ramos do sistema para selecionar um ramo viável e que contemple o critério de radialidade do sistema.

Para a escolha do próximo ramo a ser conectado, a condição de se aproveitar a informação do “ $PAI2$ ” retorna a ser considerada. O processo se repete até que todas as cargas (nós) estejam conectadas ao sistema de distribuição de energia e de forma radial. O segundo filho é obtido de forma análoga ao primeiro, porem iniciando o processo com as informações do “ $PAI2$ ” e aproveitando o material genético do “ $PAI1$ ”. O diagrama de

blocos da Figura 32 apresenta o fluxo de tarefas utilizado na fase da recombinação para “FILHO1”.

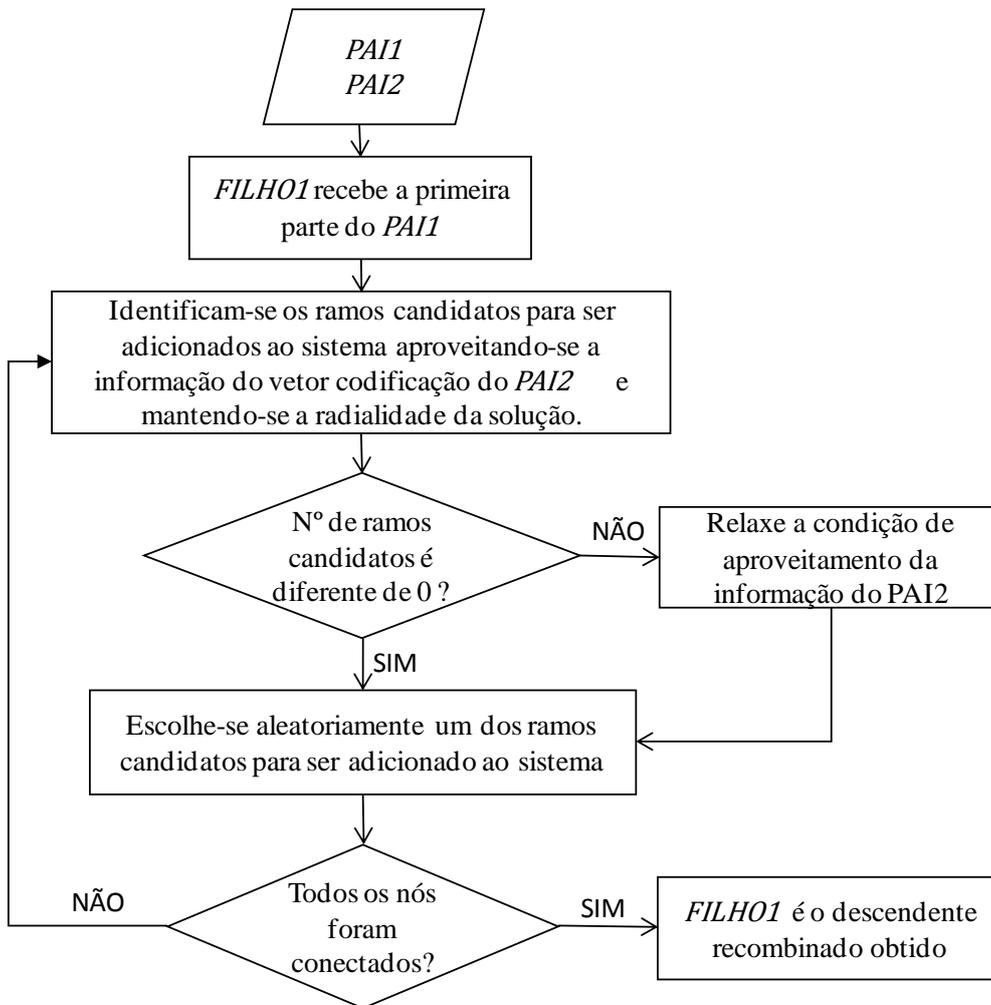


Figura 32 - Fluxograma da Heurística de recombinação dos filhos (CAMARGO, 2014).

### V.2.6.2 – Aplicação do Operador de Recombinação no Sistema de 14 Barras.

Dando sequência a etapa de recombinação após o a etapa de seleção do AG especializado, escolhe-se aleatoriamente o ponto de recombinação como na Figura 33:

|      |  | CONEXÕES |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |     |      |      |     |     |    |    |
|------|--|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|-----|------|------|-----|-----|----|----|
|      |  | 1 5      | 1 4 | 1 3 | 3 4 | 5 3 | 4 6 | 3 6 | 2 7 | 2 9 | 7 10 | 2 10 | 9 10 | 8 9 | 8 10 | 3 10 | 5 7 | 6 8 | S1 | S2 |
| PAI1 |  | 0        | 1   | 1   | 0   | 1   | 1   | 0   | 1   | 1   | 0    | 1    | 0    | 1   | 0    | 1    | 0   | 0   | 1  | 1  |
| PAI2 |  | 1        | 1   | 1   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 1   | 0    | 0    | 0    | 1   | 0    | 1    | 1   | 1   | 1  | 1  |

Figura 33 – Recombinação entre duas soluções, (fonte: Própria).

A Figura 33, representa dois indivíduos (*PAI1* e *PAI2*) codificados como na sessão V.2.1, a linha tracejada em vermelho representa o ponto de corte da fase de recombinação no vetor de codificação.

Explicando a figura, logo abaixo do título “CONEXÕES” existe uma fração correspondente a numeração de ramos do sistema de distribuição estudado. A ligação "1/5" representa a conexão da “barra/carga 1” para a “barra/carga 5”. Os vetores ao lado dos nomes “*PAI1*” e “*PAI2*” representam a presença ou não do ramo na solução bem como o tipo de condutor implementado na solução de acordo com suas características elétricas, sendo que não entraremos em maiores detalhes pois a codificação foi explicada na sessão V.2.1.

Assim, a recombinação ocorrerá de forma que o “*FILHO1*”, receba o material genético do “*PAI1*” até o ponto de recombinação e o restante do material genético será herdado do “*PAI2*”. E conseqüentemente o “*FILHO2*”, receba o material genético de “*PAI2*” até o ponto de recombinação e o restante do material genético de “*PAI1*”. Obtendo os filhos como demonstrado na Figura 34:

|             |  | CONEXÕES |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |     |      |      |     |     |    |    |
|-------------|--|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|-----|------|------|-----|-----|----|----|
|             |  | 1 5      | 1 4 | 1 3 | 3 4 | 5 3 | 4 6 | 3 6 | 2 7 | 2 9 | 7 10 | 2 10 | 9 10 | 8 9 | 8 10 | 3 10 | 5 7 | 6 8 | S1 | S2 |
| <i>PAI1</i> |  | 0        | 1   | 1   | 0   | 1   | 1   | 0   | 1   | 1   | 0    | 1    | 0    | 1   | 0    | 1    | 1   | 1   | 1  | 1  |
| <i>PAI2</i> |  | 1        | 1   | 1   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 1   | 0    | 0    | 0    | 1   | 0    | 1    | 0   | 0   | 1  | 1  |

Figura 34 - Resultado da recombinação, (fonte: própria).

Resolvendo problemas de fluxo de carga radial encontramos os seguintes valores das perdas calculadas no sistema de distribuição, supondo que não foi violado o critério de radialidade: perdas do "*FILHO1*" = 475 kW; perdas do "*FILHO2*"= 715 kW. Sendo assim o "*FILHO1*" foi selecionado com o mais viável pois tem o menor valor de perdas, como demonstrado na Figura 35:

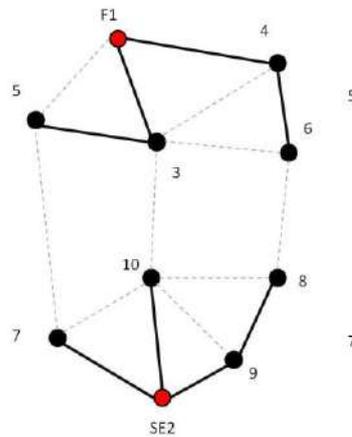


Figura 35 - Filho 1, (fonte: própria).

### V.2.7 – Etapa de Mutação

A heurística utilizada para desenvolver esta etapa do AG especializado, foi a mesma adotada em Souza (SOUZA, 2011), e será abordada a seguir.

Considerando que o resultado da mutação deve gerar um indivíduo com topologia radial, a estratégia utilizada consiste em escolher um ramo candidato, e conecta-lo ao sistema, gerando assim uma nova topologia. Em seguida, selecionar outro ramo existente que já faça parte da solução, e desconecta-lo, como demonstrado nas partes 1-conexão e 2-exclusão de ramos da Figura 36. Este processo se repete em outras partes do indivíduo até que todas as opções de conexão tenham sido testadas. A topologia gerada nesta etapa será avaliada e se for mais viável que o descendente gerado na etapa de recombinação substituirá a solução referida, em caso contrário será esta topologia será descartada. No planejamento multiestágio a mutação é aplicada respeitando as mesmas regras explicados anteriormente, porem levando em consideração a troca de entre estágios do horizonte do planejamento da solução candidata.

Na Figura 36 é ilustrada a estratégia utilizada na etapa de mutação aplicada ao "FILHO1", considerado o mais viável na etapa anterior a esta, ou seja, a etapa de recombinação anteriormente descrita. Observando a Figura 36, foi selecionado o "ramo 5-7" para fechar uma malha no sistema de 10 barras e o "ramo 3-5" foi o retirado do sistema (escolha aleatória que será avaliada), gerando desta forma um indivíduo novo respeitando sempre os critérios de radialidade.

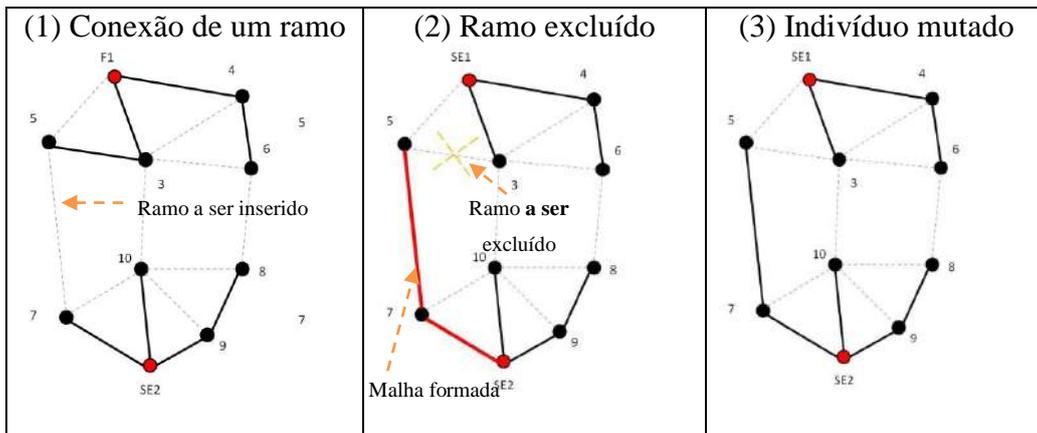


Figura 36 - Mutação, (fonte: própria).

### V.2.8 Fase de Melhoria Local

Nesta etapa de melhoria local, foram implementadas as propostas sugeridas em Camargo (CAMARGO, 2014), onde uma solução candidata será avaliada e melhorada em 4 estágios distintos, buscando assim torna-la uma solução mais viável e de menor custo. As mudanças sugeridas na solução serão:

1. Melhoria por troca de ramos;
2. Alinhamento de construção de ramos entre os estágios;
3. Seleção econômica de condutores;
4. e Adiantamento de recondutoramento.

O algoritmo se encarregará de avaliar e modificar uma solução, caso seja pertinente, verificando: a potência máxima da subestação da solução; a corrente máxima permitida pelo condutor; e as magnitudes das tensões nos barramentos.

A melhoria por "Troca de ramos" visa encontrar uma solução mais viável baseada na técnica "*Branch exchange*" descrita em Carreno (CARREÑO, ROMERO, & FELTRIN, 2008). A estratégia consiste em escolher aleatoriamente um ramo candidato aberto para ser adicionado à topologia para que se forme uma malha e, a seguir, é verificado sistematicamente qual dos ramos pertencentes ao laço formado é a melhor opção para ser retirado e tornar o sistema radial novamente (CAMARGO, 2014). O diagrama de blocos contendo os passos executados nesta etapa este apresentado na Figura 37 a seguir.

A melhoria por "Alinhamento de construção de ramos entre os estágios" tem como objetivo encontrar uma solução de melhor qualidade na vizinhança do descendente através da realocação de ramos que foram construídos em um determinado estágio do planejamento, porém foram retirados da solução em outro estágio de planejamento. A heurística utilizada para este caso consiste em verificar, para cada ramo da proposta de solução, se esta situação ocorre, caso positivo, o ramo em análise é acrescentado na topologia da solução no estágio em análise. Como consequência, uma malha se forma e para que o sistema se torne radial novamente, um ramo pertencente à malha é retirado aleatoriamente. É avaliado se com a alteração a função objetivo da nova configuração melhorou, caso positivo, a solução corrente assume a alteração realizada, caso contrário,

não. O processo se repete até que todos os ramos sejam analisados como mostrado na Figura 38.

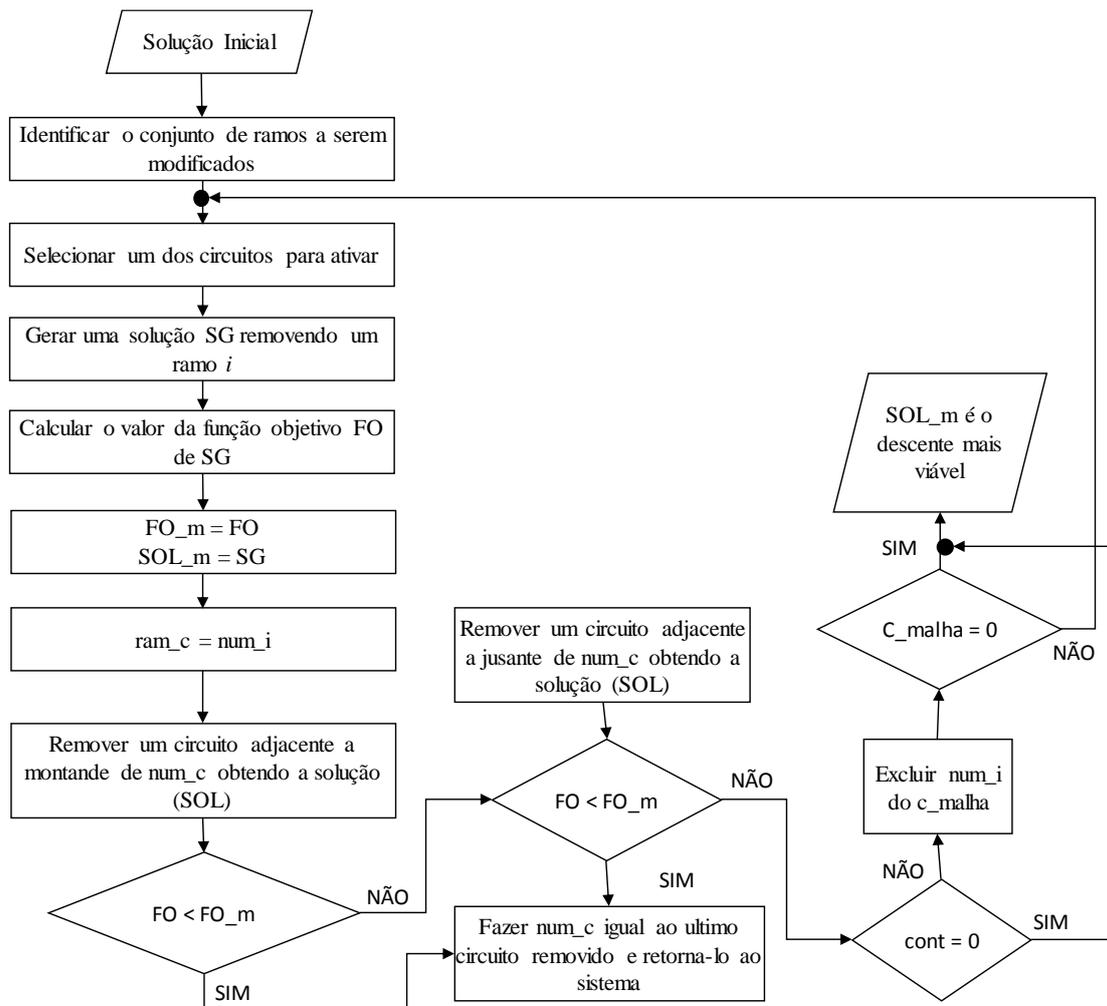


Figura 37 - Diagrama de blocos, "Troca de ramos"(CAMARGO, 2014).

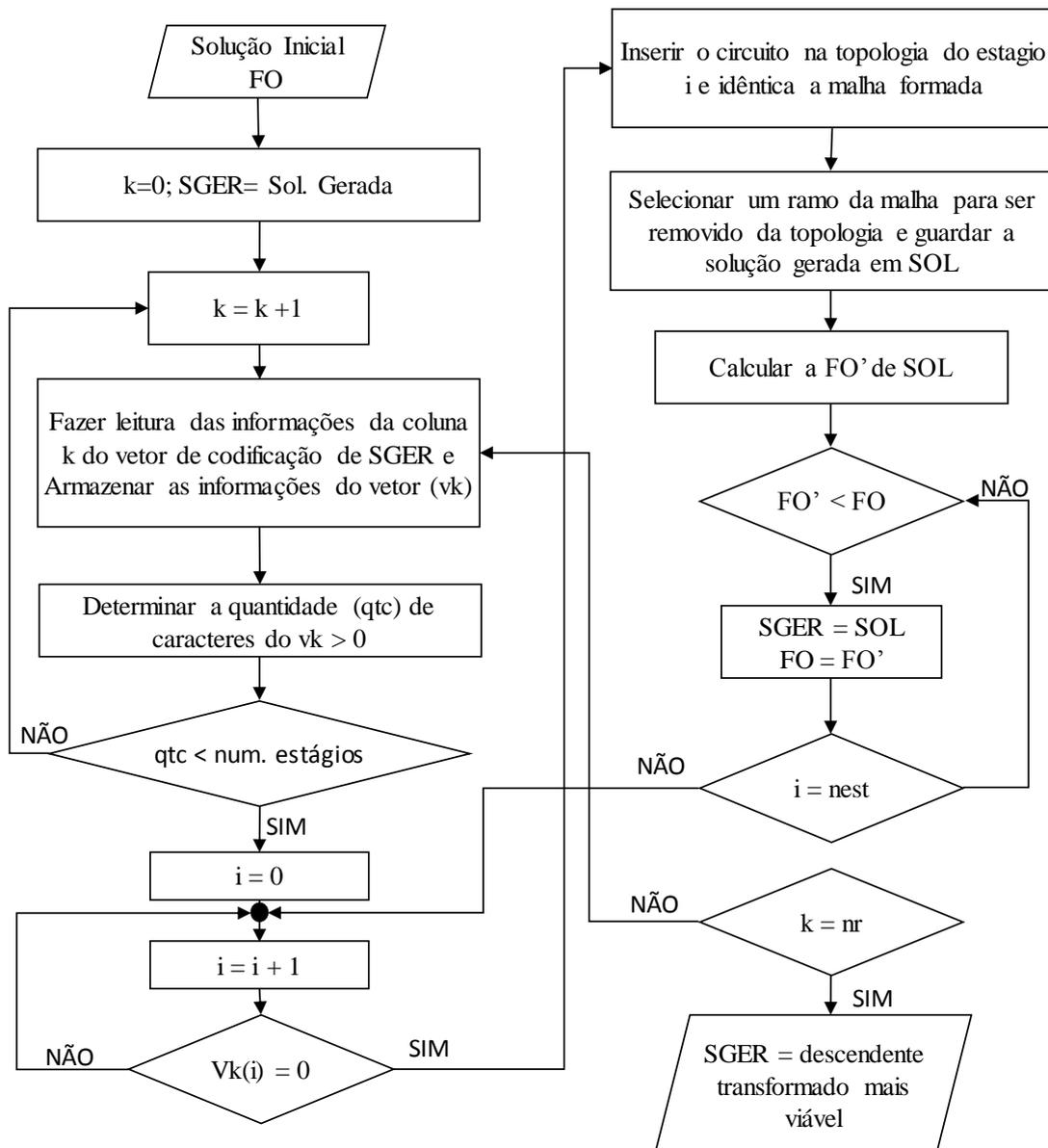


Figura 38 - Diagrama de blocos, " Alinhamento de construção de ramos entre os estágios "(CAMARGO, 2014).

A Melhoria por "Seleção econômica de condutores" implementada neste trabalho, foi apresentada em Gallego et. al. (GALLEGO, RIDER, LAVORATO, & PADILHA-FELTRIN, 2012) que consistiu em determinar o melhor tipo de condutor para cada circuito, dentre os disponíveis, em função da corrente que passa no circuito. Esta heurística pode ser generalizada tanto para a seleção de novos condutores como para recondutoramento dos condutores existentes, considerando os custos fixos dos condutores. Esta sub-rotina é executada para cada um dos estágios de planejamento da solução candidata.

Melhoria por "Adiantamento de recondutoramento" consiste em realizar testes para verificar se o adiantamento do recondutoramento nos estágios iniciais de cada circuito da solução gerada produz uma solução técnica e economicamente mais viável, caso positivo, a solução obtida será armazenada para ir para a fase de substituição. Esta melhoria somente é realizada para soluções geradas viáveis e com número de estágios de planejamento maior que 1.

Além destes quatro estágios de avaliação das soluções, foram implementadas outras verificações para tratar as soluções com problemas de violações das restrições. Estas restrições são avaliadas e tratadas conforme detalhado em Camargo (2014). As verificações são:

- Quando há excesso de potência demandada nas subestações;
- Quando há circuito no sistema cujo valor da corrente é superior ao limite máximo do condutor proposto;
- Há barra (s) na rede com magnitude de tensão fora da faixa de valores permitidos para o sistema em análise.

Para entendermos de forma prática a fase de melhoria local implementada vamos utilizar o exemplo do sistema de 10 Barras, utilizado nas sessões anteriores.

Sendo assim nesta fase de melhoria local, a topologia gerada como solução mais viável (Figura 36) será analisada e serão aplicados os estágios de melhoria local nesta solução.

1. Escolhemos de forma aleatória os laços fundamentais que vamos percorrer para analisar a solução. A troca de ramos é feita simulando a inserção de um ramo desligado na solução corrente, no laço fundamental que está sendo avaliado, tornando o mesmo ativo e parte da solução corrente, e da mesma forma removendo outros ramos da solução corrente a título de teste.
2. Ao analisar operação, o algoritmo observa qual ramo está desconectado. Assim que um ramo desconectado é detectado, o algoritmo força a conexão do mesmo.
3. O algoritmo analisa o próximo ramo ligado ao ramo inserido no passo anterior, então é calculada a função objetivo dessa nova solução, se as

perdas diminuiram: armazena-se essa topologia como sendo a melhor encontrada até o momento. Este processo será repetido até que sejam analisados todos os ramos pertencentes ao laço fundamental que está sendo avaliado. Guardando sempre na memória a melhor topologia encontrada até o momento.

4. Finalizado este processo, a topologia técnica e economicamente mais viável é mantida e armazenada;
5. O processo é reiniciado para analisar e avaliar o conjunto de laços seguintes
6. Quando finalizado todo o processo obteremos um descendente mais viável.

Como demonstrado anteriormente na Figura 35 o descendente gerado no processo de recombinação possui perdas ativas de 480 kW. Dando sequência a metodologia implementada na fase de melhoria local, conecta-se o "ramo 3-10" e desconecta-se o "ramo SE1-3" da subestação SE1, como mostra a Figura 39.

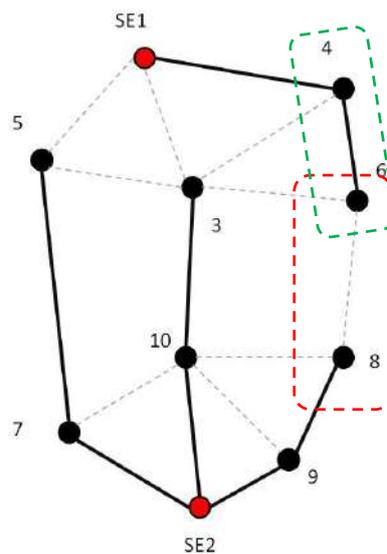


Figura 39 - Fase de Melhoria Local - Parte 1, (fonte: própria).

Calculando o fluxo de carga dessa nova topologia, obtemos 640 kW de perdas ativas. Percebe-se que nas alterações avaliadas as perdas aumentaram, logo se interrompe a busca de uma solução por este caminho. Iniciando outra avaliação que vai percorrer um caminho diferente da alternativa anterior conecta-se o "ramo 6-8", e desconecta-se o "ramo 4-6" (Figura 40):

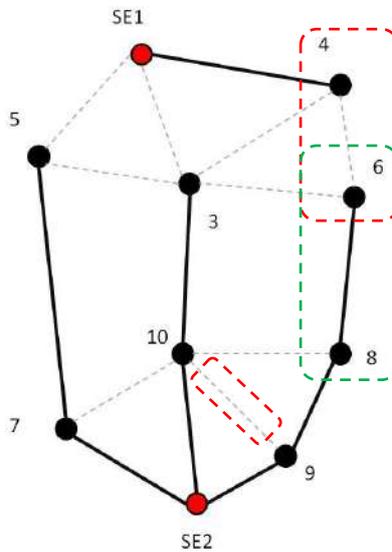


Figura 40 - Fase de Melhoria Local - Parte 2, (fonte: própria).

Calcula-se o fluxo de carga nesta nova alternativa de solução, e obtém-se o valor de 466 kW de perdas ativas. Como podemos observar as perdas são menores, o que comprova uma solução mais viável, sendo assim salvamos essa nova topologia, e encerramos esta análise. Repetimos o processo partindo de outras barras de carga na tentativa de encontrar outra solução mais viável. Após analisadas todas as opções, teremos o nosso descendente mais viável (*Dm*). A Figura 41 mostra a codificação do indivíduo formado nesta etapa:

|           |  | CONEXÕES |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |     |      |      |     |     |    |    |
|-----------|--|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|-----|------|------|-----|-----|----|----|
| INDIVÍDUO |  | 1 5      | 1 4 | 1 3 | 3 4 | 5 3 | 4 6 | 3 6 | 2 7 | 2 9 | 7 10 | 2 10 | 9 10 | 8 9 | 8 10 | 3 10 | 5 7 | 6 8 | S1 | S2 |
| F1        |  | 0        | 1   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 1   | 1   | 0    | 1    | 0    | 1   | 0    | 1    | 1   | 1   | 1  | 1  |

Figura 41 - Indivíduo codificado, (fonte: própria).

### V.2.9 – Etapa de Substituição

Neste trabalho a etapa de substituição foi implementada de acordo com o trabalho de Chu & Beasley (AGCB), porém foram implementadas algumas modificações no

controle de diversidade originalmente adotado em Chu & Beasley (CHU & BEASLEY, 1997).

Na proposta original de Chu e Beasley, a diversidade se limita à condição de que todos os indivíduos sejam diferentes, no entanto, esta condição não é suficiente pois as diferenças entre as soluções candidatas podem ser mínimas e acaba por limitar a população corrente numa região reduzida no espaço de busca (GALLEGO, RIDER, LAVORATO, & PADILHA-FELTRIN, 2012).

Assim sendo, a proposta de modificação, no algoritmo de Chu & Beasley deste trabalho no controle de diversidade será a mesma adotada em Romero et. al.(ROMERO & LAVORATO, 2012), onde um descendente será incorporado na população corrente se satisfazer o critério de diversidade (se ele é diferente de cada um dos elementos da população) ou se for a solução mais viável dentre as soluções das quais ele não satisfaz este critério. Esta estratégia visa eliminar soluções vizinhas e menos viáveis, bem como favorecer a busca de soluções em outras regiões do espaço de busca.

O processo de substituição do AG-ESP segue os seguintes passos:

1. Verificar se o descendente gerado satisfaz o critério de diversidade, ou seja, se ele é diferente de cada um dos elementos da população em pelo menos um número mínimo estipulado de caracteres do vetor de codificação.
2. Se o descendente não satisfaz o critério de diversidade proceder da seguinte maneira:
  - (a) Se o descendente é viável e o valor de sua função de custo é melhor que todas as demais soluções nas quais ele não satisfaz o critério de diversidade, então inseri-lo na população corrente e eliminar da população corrente as  $k_n$  soluções das quais este critério não seja satisfeito. Tomar  $n_{pc} = n_{pc} - k_n + 1$ , sendo  $n_{pc}$  a quantidade de indivíduos da população corrente. Ir ao passo 8.
  - (b) Caso o descendente não seja viável e/ou o valor da função de custo não for melhor que as soluções que não atendem ao critério de diversidade, descartar o descendente gerado e ir ao passo 8.

3. Se o descendente satisfaz o critério de diversidade proceder da seguinte maneira:
  - (a) Se  $n_{pc} < n_{pop}$ , sendo  $n_{pop}$  o número de indivíduos da população inicial, então incorporar o descendente na população corrente e atualizar  $n_{pc} = n_{pc} + 1$  e ir para o passo 8.
  - (b) Caso contrário, ir ao passo 4.
4. Se o descendente gerado for inviável e se há outras soluções inviáveis na população corrente, então o descendente substituirá o indivíduo de maior inviabilidade entre todos da população corrente, desde que seja “menos” inviável, caso contrário, a solução é descartada. Ir para o passo 8.
5. Sendo o descendente viável e se há soluções inviáveis na população inicial, então o descendente gerado substituirá a solução inviável de pior qualidade armazenada na população corrente.
6. Se o descendente gerado for viável e não há mais indivíduos inviáveis na população corrente, então o descendente substituirá a pior solução viável armazenada, desde que seja melhor, caso contrário, a solução é descartada. Ir para o passo 8.
7. Atualizar a população corrente.
8. Finalizar a etapa da substituição.

O diagrama de blocos da sub-rotina utilizada na fase de substituição está apresentado na Figura 16.

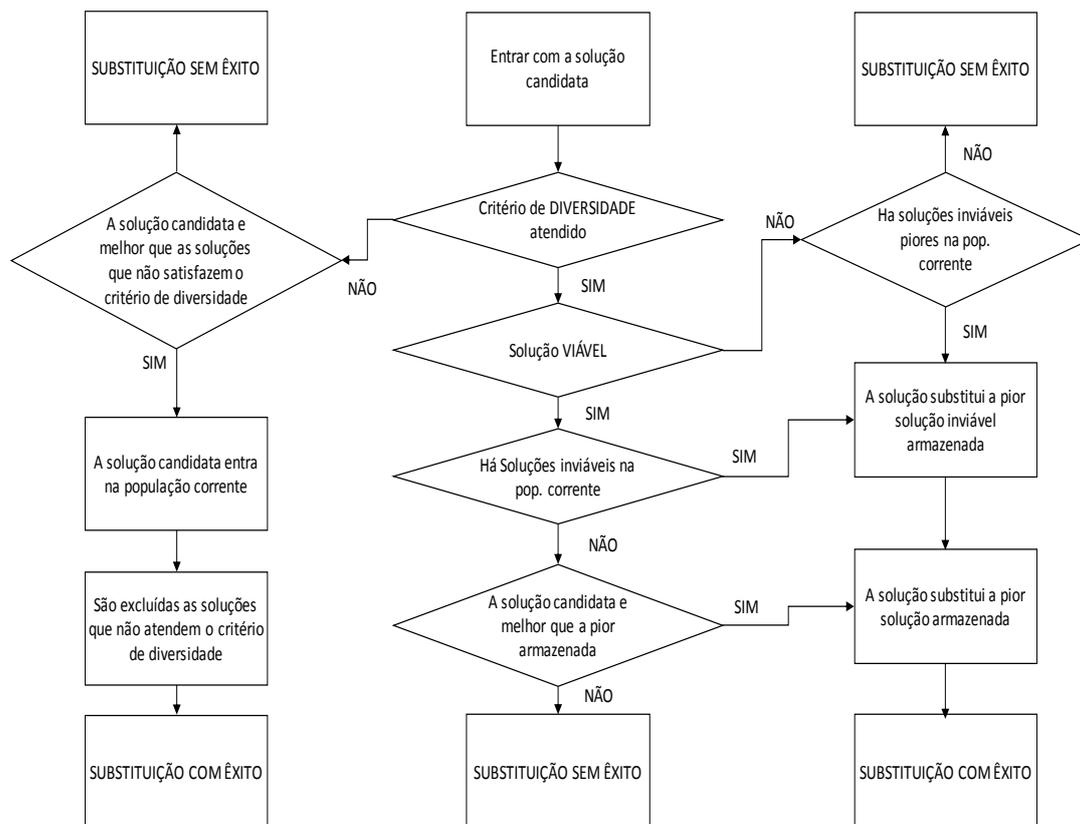


Figura 42 - Solução Final após a fase de melhoria local, (CAMARGO, 2014).

O critério de parada do AG especializado foi definido para interromper a análise quando o AG especializado atingir um número de iterações pré-definidas  $It(x)$ .

## V.2.10 – Interface do AG especializado com GIS

Nesta seção vamos explicar o processo metodológico que foi utilizado para a criação de uma interface entre o AG Especializado e o Ambiente GIS (Sistema de Informação Geográfica), com o objetivo de tornar mais fácil a entrada de dados no AG e de forma complementar observar os resultados dentro de uma ferramenta SIG.

### V.2.10.1 – Recursos Tecnológicos Utilizados

Foram utilizados os seguintes recursos para elaboração da interface AG Edpecializado com o GIS: Um PC Dell Precision T7600, com processador Xeon (R) E5-2620 de 2GHz, com memória RAM de 16Gbytes, em um ambiente operacional Windows 10 64 Bits; A interface foi desenvolvida na linguagem Python 2.7, e tem por objetivo ler a base de dados armazenada no GIS e converte-la a um formato compatível com o MatLab, onde foi desenvolvido o AG Especializado;

### V.2.10.2 – Modelagem da Interface.

Para facilitar a iteração entre a base de dados georreferenciada e o AG-Especializado, foi utilizada uma extensão denominada "*Network Analyst*", nativa da ferramenta ArcGIS. Esta extensão entende as regras de conectividade dos elementos da rede de forma avançada para representar com precisão a realidade do mundo multimodal de redes fornecendo dados importantes como quais elementos se conectam a outros, bem como o que acontece na rede estudada, se um desses elementos for interrompidos no conjunto total de uma rede, neste caso uma rede de distribuição de energia.

Outro módulo utilizado para conversão dos dados da Rede de distribuição para o AG bem como do AG Especializado foi o "*Model Builder*" (ferramenta de modelagem e metodologia nativa no ArcGIS), módulo este onde foi implementada toda a metodologia de conversão buscando os dados de cada elemento da rede, como os condutores existentes, subestações e possíveis conexões para trazer as informações espaciais dos elementos e traduzi-los a um formato compatível com o entendido no AG Especializado.

O Fluxo de trabalho entre os ambientes GIS e AG Especializado está detalhado na Figura 43 abaixo:

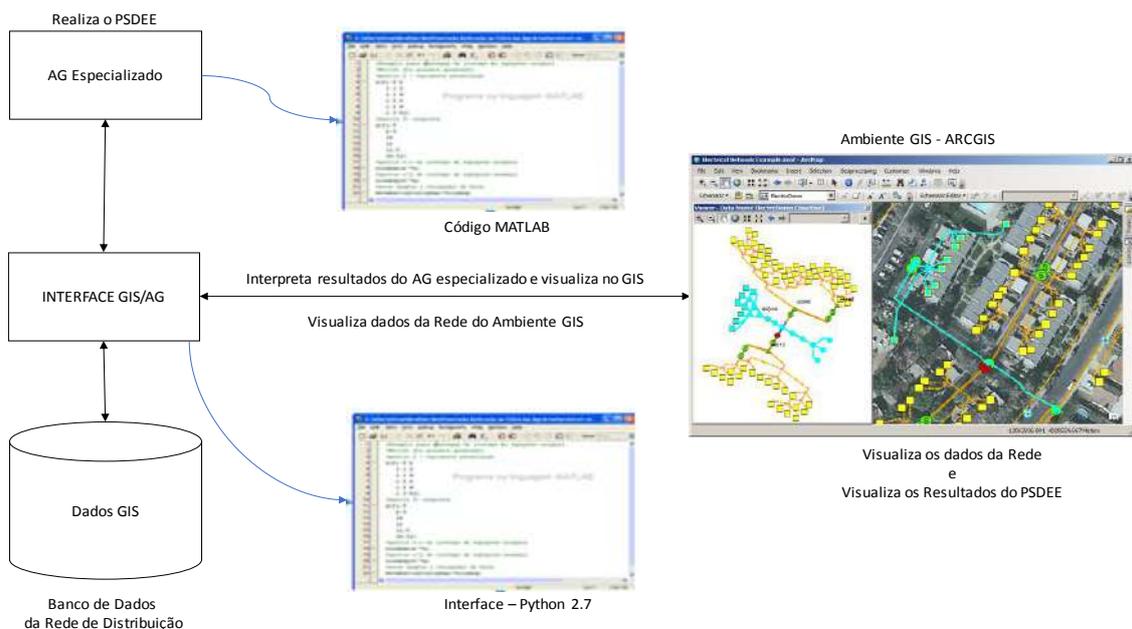


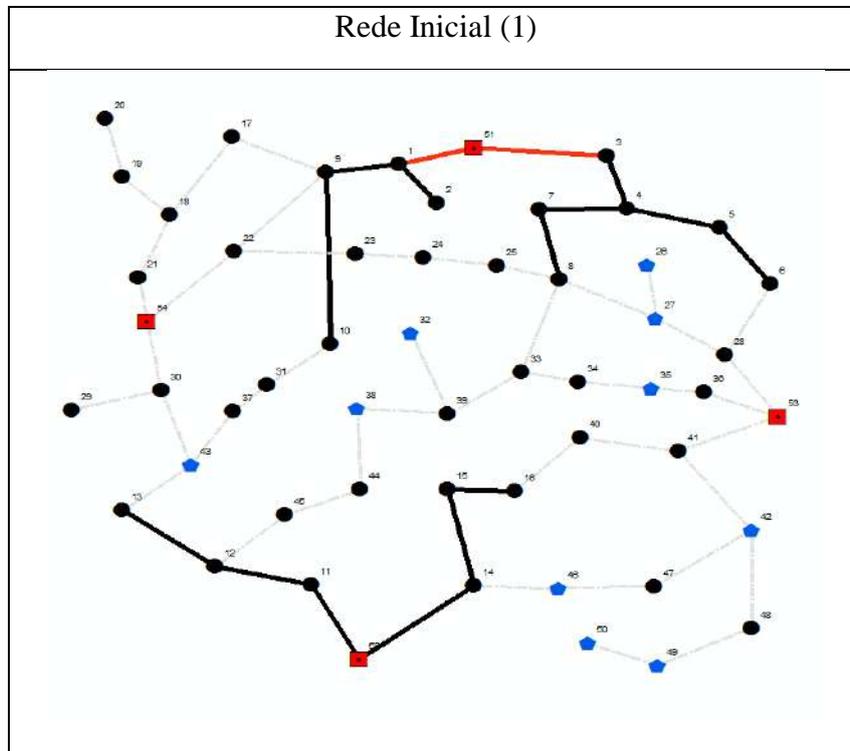
Figura 43 - Fluxo de trabalho entre o AG Especializado e o Ambiente GIS ArcGIS, (fonte: própria).

Para entendermos melhor a figura vamos explicar o Fluxo de trabalho da metodologia implementada para a solução do PSDEE:

- a) Os dados da rede são tratados dentro do ambiente GIS: Nesta fase os dados são incorporados a Base de Dados GIS, onde serão analisados de forma assistida (Operador do Ambiente e Processos automatizados do GIS conduzem os passos da análise de dados para se obter qualidade e especificidade para a transação em questão);
- b) Os dados iniciais da rede são incorporados a Base de Dados GIS;
- c) Foi aplicado um modelo de simbologia, ou seja, um modelo de visualização e interpretação de dados, para que um operador experiente que esteja acostumado com estes dados possa visualizar, avaliar e interpretar os mesmos;
- d) A extensão Network Analyst do ambiente GIS faz a conversão dos dados e interpretação dos mesmos, disponibilizando estes para a ferramenta de modelagem desenvolvida, que converte os dados a um formato compatível com o ambiente GIS;
- e) Os dados são analisados pelo AG Especializado que planeja o PSDEE do estudo em questão; após o termino da análise, o AG Especializado fornece a solução PSDEE do estudo proposto;
- f) O analista aciona a ferramenta de modelagem do ambiente GIS de interpretação de dados da saída do AG Especializado;
- g) O GIS interpreta os dados e mostra o resultado em sua interface gráfica;

A Figura 44 abaixo mostra um caso do sistema de distribuição 54 barras proposto e solucionado pelo AG Especializado , disponibilizado em ambiente GIS. A topologia inicial, foi elaborada dentro do ambiente GIS no formato "shapefile". Cabe lembrar que o formato "shapefile" é um formato muito utilizado na divulgação e análise de dados vetoriais utilizados para estudo de dados georeferenciados. Podemos observar o antes da aplicação do PSDEE na primeira etapa da figura que retrata o estado inicial do problema, bem como podemos observar o pós-processamento do PSDEE resultando em uma topologia final e resultado da melhor solução encontrada pelo AG, já incorporado ao ambiente GIS.

Fica comprovado que a utilização da interface de conversão de dados entre os dois ambientes AG Especializado e o ambiente GIS simplifica a codificação da rede distribuição a ser estudada e planejada, bem como quanto ao entendimento dos resultados, pois podemos ver através da interface GIS os dados advindos dos resultados obtidos na solução do PSDDE da rede estudada.



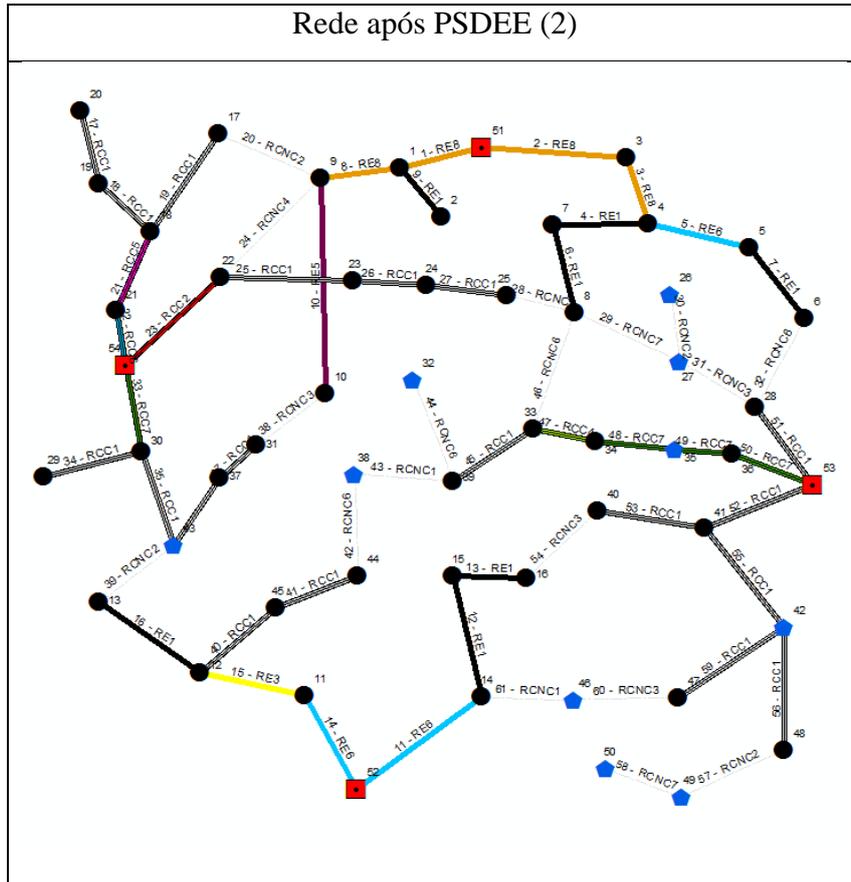


Figura 44 - Visualização da rede inicial (1) e da solução após a aplicação do PSDDE através do AG Especializado (2) no ambiente GIS - Sistema de 54 Barras, (Fonte: Autoria própria)

## **CAPÍTULO VI - Testes e Resultados**

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos na avaliação de alguns casos de sistemas de distribuição de energia elétrica disponíveis na literatura aplicada, submetidos ao PSDEE do AG Especializado desenvolvido neste trabalho.

As ações previstas para o planejamento são: construção e/ou recondutoramento de circuitos, construção e/ou ampliação de capacidade de subestações. Os dados completos dos sistemas testados encontram-se nos Anexos deste trabalho.

Como mencionado anteriormente o algoritmo foi desenvolvido em linguagem MATLAB utilizando uma máquina com processador Intel (R) Xeon (R) CPU 2,0 GHz. com 12 Gb de memória com sistema operacional Windows 10.

### **VI.1 – Resultados Obtidos nos Sistemas de Distribuição Propostos;**

Nos testes realizados considerando os planejamentos estático e dinâmico, foram avaliados os sistemas de 54, 23, 136 e 417 barras disponíveis na literatura aplicada.

Os sistemas de 23 e 136 barras serão analisados como problemas estáticos, levando em consideração um estágio único de avaliação. Os sistemas de 54 e 417 barras serão avaliados em um panorama de multiestágios (3 estágios distintos) de avaliação.

#### **VI.1.1 – Sistema de 54 Barras**

De forma a esclarecer melhor cada etapa da metodologia desenvolvida no AG Especializado, será demonstrado um "passo a passo" para chegar a solução final do sistema de 54 barras. Sendo assim será apresentada cada etapa da metodologia, desde a entrada inicial dos dados da rede do sistema proposto, através da interface GIS/AG Especializado, à composição de cada item da função de custo, até a solução final do problema proposto.

##### **VI.1.1.1 - Descrição do Problema - Sistema de 54 Barras**

Este sistema foi avaliado na literatura pelos seguintes autores:

- Baquero (2012) que utilizou Algoritmos Genéticos com busca Tabu;
- Camargo (2014) que utilizou um AG Chu & Beasley Especializado.

Trata-se de uma rede de distribuição de energia com tensão nominal de 15kV.

São 16 trechos de ramais existentes, candidatos a um redimensionamento de acordo com as necessidades de atendimento das cargas do sistema proposto, e 45 trechos candidatos a construção seguindo as mesmas regras de construção ou não para atender os requisitos do sistema. Os ramais do sistema podem ser de oito tipos de condutores diferentes. Os ramais quando associados a teoria de grafos representam as arestas de um grafo.

Possui duas Subestações existentes com a possibilidade de ampliação de suas capacidades de 16.7MVA para 33.4MVA. Também possui duas Subestações Candidatas, uma de 22MVA e outra de 30MVA. Sujeitas a implementação durante o planejamento do sistema. O motivo da ampliação ou construção das subestações, se dá, pela necessidade de atender a demanda no atendimento das cargas do sistema proposto.

Para a realização destes testes foi considerado as seguintes características utilizadas por todos os autores acima mencionados:

- O desvio máximo de tensão permitido foi de 3% ;
- O fator de potência médio igual a 0,9;
- O fator de perdas igual a 0,35;
- A taxa de juros igual a 10% a.a. em um horizonte de planejamento de 20 anos,

#### **VI.1.1.2 - Codificação do Problema - Sistema de 54 Barras**

Como foi informado na sessão V.2.1 onde foi elaborado a codificação do problema do PSDEE para o AG especializado, este trabalho usou dois tipos de codificação do indivíduo:

1. O Indivíduo foi codificado em números inteiros, codificação explicada e detalhada na sessão V.2.1;
2. O Indivíduo foi codificado em números binários. A codificação será detalhada a seguir.

A codificação em números binários foi utilizada única e exclusivamente na solução do sistema de 54 barras para ser possível a comparação com outros autores que utilizaram esta codificação na solução do PSDEE deste sistema. Na representação dos indivíduos através de números binários (0/1), cada indivíduo é composto com

um número de bits equivalente ao número de linhas que compõem a topologia estudada. O indivíduo será dividido em quatro partes distintas que representarão as topologias possíveis para a rede que será analisada.

A primeira parte do indivíduo, correspondente aos ramos (arestas) já existentes no sistema e os respectivos condutores adotados nestes ramos. Cada ramo é identificado por três bits que representam o tipo de condutor utilizado na construção do ramo. A Tabela 3 apresenta a correspondência entre o genótipo e fenótipo para cada trecho do sistema.

Tabela 3 - Ramos existentes

| <b>Genótipo</b> | <b>Fenótipo</b> |
|-----------------|-----------------|
| 000             | Condutor tipo 1 |
| 001             | Condutor tipo 2 |
| 010             | Condutor tipo 3 |
| 011             | Condutor tipo 4 |
| 100             | Condutor tipo 5 |
| 101             | Condutor tipo 6 |
| 110             | Condutor tipo 7 |
| 111             | Condutor tipo 8 |

Para representar os ramos (arestas) candidatos à construção, foram utilizados quatro bits para cada ramo. Observe que um bit a mais é colocado no início de cada configuração de ramo (aresta) em relação a primeira parte do indivíduo que era composto por apenas 3 Bits. Quando o valor do primeiro Bit é (1), significa dizer que o ramo foi incluído, quando (0) o ramo não foi incluído na solução que está sendo avaliada. A representação descrita compõe a segunda parte do indivíduo. A Tabela 4 ilustra essa representação de 4 Bits de cada indivíduo.

Tabela 4 - Ramos candidatos

| <b>Genótipo</b> | <b>Fenótipo</b> |
|-----------------|-----------------|
| (0/1)000        | Condutor tipo 1 |
| (0/1)001        | Condutor tipo 2 |
| (0/1)010        | Condutor tipo 3 |
| (0/1)011        | Condutor tipo 4 |
| (0/1)100        | Condutor tipo 5 |
| (0/1)101        | Condutor tipo 6 |
| (0/1)110        | Condutor tipo 7 |
| (0/1)111        | Condutor tipo 8 |

A terceira parte do indivíduo representa a possibilidade de expansão ou não da capacidade de cada uma das subestações existentes no sistema de 54 Barras. As

informações relacionadas as Subestações são apresentadas na Tabela 5. (Neste caso estamos exemplificando uma topologia onde existem duas subestações existentes e candidatas a expansão.

Tabela 5 - Subestações existentes

| <b>Genótipo</b> | <b>Fenótipo</b>                      |
|-----------------|--------------------------------------|
| 0               | SE 1 ou SE2, não expandida, 16,7 MVA |
| 1               | SE 1 ou SE 2, expandida, 33,4 MVA    |

Por fim, a quarta parte é destinada a representar as subestações que serão candidatas à construção dentro da solução final do sistema de 54 Barras. Sendo cada par de Bits relacionados a uma subestação. O primeiro bit de cada par representa a construção (1) ou não construção (0), e o segundo as duas alternativas quanto a sua capacidade. A Tabela 6 apresenta as possibilidades existentes de acordo com o exemplo anterior.

Tabela 6 - Subestações candidatas

| <b>Genótipo</b> | <b>Fenótipo</b>                    |
|-----------------|------------------------------------|
| 00              | SE3 ou SE4, não construída, 22 MVA |
| 01              | SE3 ou SE4, não construída, 30 MVA |
| 10              | SE3 ou SE4, construída, 22 MVA     |
| 11              | SE3 ou SE4, construída, 30 MVA     |

Na Figura 45, podemos observar o modelo de representação de um indivíduo do sistema proposta contendo 16 ramos existentes, 45 ramos candidatos, duas (2) subestações existentes e duas (2) subestações candidatas.

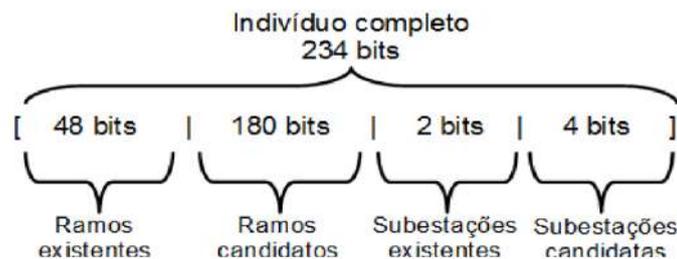


Figura 45 - Representação binária do indivíduo no sistema de distribuição de 56 barras, (Fonte: Autoria própria).

A representação binária do sistema de 56 barras foi elaborada através da interface entre o Sistema GIS e o AG, que transformou os dados do problema proposto do formato

GIS a um formato compatível ao Algoritmo Genético Especializado desenvolvido no "software" MatLab.

### VI.1.1.3 - Parametrização do AG Especializado

Para a realização deste teste foi utilizada uma população inicial de 200 indivíduos e um número máximo de 5000 iterações (critério de parada adotado neste estudo).

### VI.1.1.4 - Resultados

Seguem nas Tabela 7 e Tabela 8 um resumo dos resultados encontrados nos três estágios avaliados para o problema de 54 barras.

Tabela 7 - Custos apresentados para solução multi estágios

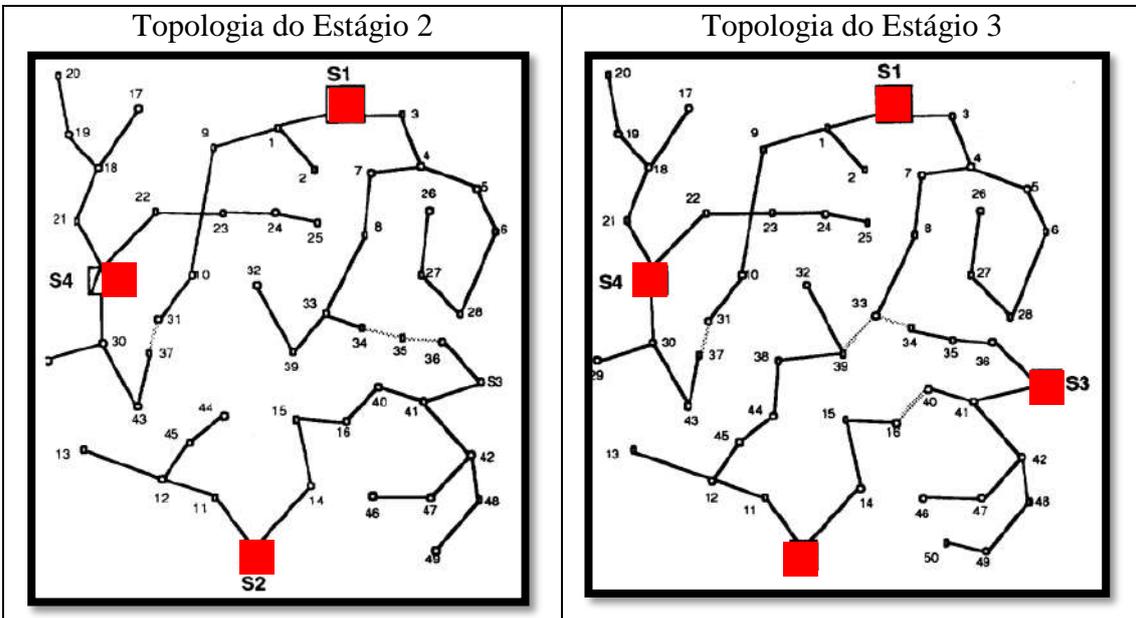
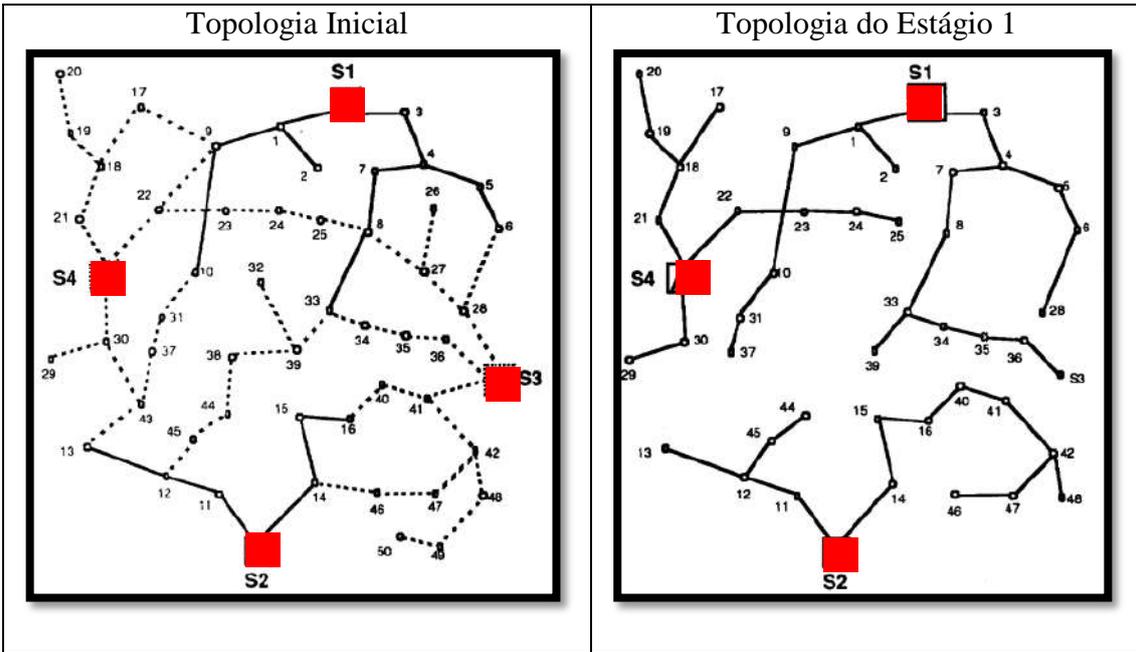
| ESTÁGIO      | R\$ - Circuitos | R\$ - SE     | R\$ - Perdas | Custo /Estágio | VPL (Valor presente liquido) |
|--------------|-----------------|--------------|--------------|----------------|------------------------------|
| <b>1</b>     | 1.941.253,00    | 2.508.957,00 | 598.740,8    | 5.039,90       | 4.939,22                     |
| <b>2</b>     | 407.914,60      | 2.090.797,00 | 726.499,8    | 3.225,15       | 1.914,48                     |
| <b>3</b>     | 68.396,07       |              | 163.706,00   | 1.232,57       | 434,12                       |
| <b>Total</b> |                 |              |              |                | <b>7.207,70</b>              |

Tabela 8 - Fluxo de Potência Calculado X Potência Máxima

| SE  | ESTÁGIO 1 |            | ESTÁGIO 2 |            | ESTÁGIO 3 |            |
|-----|-----------|------------|-----------|------------|-----------|------------|
|     | Pot. Máx. | Pot. Calc. | Pot. Máx. | Pot. Calc. | Pot. Máx. | Pot. Calc. |
| SE1 | (16,70)   | 15,69      | (16,70)   | 14,87      | (16,70)   | 15,3       |
| SE2 | (16,70)   | 15,98      | (16,70)   | 11,63      | (16,70)   | 15,3       |
| SE3 | -         | -          | (22,00)   | 14,12      | (22,00)   | 20,7       |
| SE4 | (22,00)   | 10,15      | (22,00)   | 14,39      | (22,00)   | 18,53      |

Os valores das perdas da melhor solução por estágio são respectivamente, 710,38; 875,10 e 1.401,75 kW. Os valores mínimos obtidos nos respectivos estágios são: 0,999522; 1,001492 e 0,994174 p.u. Os resultados das topologias encontrados em cada estágio estão abaixo relacionados:

Tabela 9 - Topologias encontradas por Estágio de avaliação



A Tabela 10 apresenta quais condutores foram adotados para a melhor solução deste Cenário de multi estágios, para cada estágio avaliado. O valor zero significa dizer que o condutor não foi incluído na solução final deste estágio. Observando a Tabela 10 podemos concluir como foi dinâmica a inclusão dos circuitos e como foram sendo construídos, repotenciados ou desativados durante os estágios do horizonte de planejamento indicado.

A melhor solução encontrada pelo AG-Especializado indica a construção das subestações SE4 no primeiro estágio e SE3 no segundo estágio e mantém as subestações existentes (SE1 e SE2) sem ampliação de suas capacidades, exatamente igual aos resultados encontrados em Camargo,2014. O planejamento dinâmico coordenado permitiu manter a maioria dos ramos ativos em todos os estágios. Pode-se constatar também que o algoritmo evitou o recondutoramento para a maioria dos circuitos do sistema. As barras de passagens terminais 26, 27, 32 e 49 somente são ligadas no segundo estágio, tendo em vista que no primeiro suas cargas são nulas e assim não há necessidade de conectá-las. Já a barra 50 é ligada somente no terceiro estágio, pois nos estágios anteriores não há demanda neste nó de consumo.

Tabela 10 - Tipos de condutores por estágio

| Circ. | i  | j  | Est.1     | Est.2     | Est.3     | Circuito | i  | j  | Est.1     | Est.2     | Est.3     |
|-------|----|----|-----------|-----------|-----------|----------|----|----|-----------|-----------|-----------|
|       |    |    | $tc_{ij}$ | $tc_{ij}$ | $tc_{ij}$ |          |    |    | $tc_{ij}$ | $tc_{ij}$ | $tc_{ij}$ |
| 1     | 51 | 1  | 7         | 7         | 8         | 32       | 6  | 28 | 1         | 1         | 1         |
| 2     | 51 | 3  | 4         | 4         | 4         | 33       | 54 | 30 | 5         | 5         | 5         |
| 3     | 3  | 4  | 3         | 3         | 3         | 34       | 30 | 29 | 1         | 1         | 1         |
| 4     | 4  | 7  | 1         | 1         | 1         | 35       | 30 | 43 | 2         | 2         | 2         |
| 5     | 4  | 5  | 1         | 0         | 0         | 36       | 43 | 37 | 1         | 1         | 1         |
| 6     | 7  | 8  | 1         | 1         | 1         | 37       | 37 | 31 | 1         | 1         | 1         |
| 7     | 5  | 6  | 1         | 1         | 1         | 38       | 31 | 10 | 0         | 0         | 0         |
| 8     | 1  | 9  | 2         | 2         | 2         | 39       | 13 | 43 | 0         | 0         | 0         |
| 9     | 1  | 2  | 1         | 1         | 1         | 40       | 12 | 45 | 7         | 7         | 7         |
| 10    | 9  | 10 | 1         | 1         | 1         | 41       | 45 | 44 | 7         | 7         | 7         |
| 11    | 52 | 14 | 3         | 3         | 3         | 42       | 44 | 38 | 5         | 5         | 5         |
| 12    | 14 | 15 | 1         | 1         | 1         | 43       | 38 | 39 | 3         | 3         | 3         |
| 13    | 15 | 16 | 1         | 0         | 0         | 44       | 39 | 32 | 0         | 1         | 2         |
| 14    | 52 | 11 | 8         | 8         | 8         | 45       | 39 | 33 | 2         | 0         | 0         |
| 15    | 11 | 12 | 8         | 8         | 8         | 46       | 33 | 8  | 0         | 0         | 0         |
| 16    | 12 | 13 | 1         | 1         | 1         | 47       | 33 | 34 | 1         | 1         | 1         |
| 17    | 19 | 20 | 1         | 1         | 1         | 48       | 34 | 35 | 2         | 2         | 2         |
| 18    | 18 | 19 | 1         | 1         | 1         | 49       | 35 | 36 | 1         | 1         | 3         |
| 19    | 17 | 18 | 1         | 1         | 1         | 50       | 53 | 36 | 0         | 3         | 3         |
| 20    | 9  | 17 | 0         | 0         | 0         | 51       | 53 | 28 | 0         | 4         | 4         |
| 21    | 18 | 21 | 2         | 2         | 3         | 52       | 53 | 41 | 0         | 5         | 5         |
| 22    | 54 | 21 | 3         | 3         | 3         | 53       | 41 | 40 | 0         | 1         | 1         |
| 23    | 54 | 22 | 1         | 1         | 1         | 54       | 40 | 16 | 1         | 1         | 1         |
| 24    | 9  | 22 | 0         | 0         | 0         | 55       | 41 | 42 | 1         | 1         | 1         |
| 25    | 22 | 23 | 1         | 1         | 1         | 56       | 42 | 48 | 1         | 1         | 1         |
| 26    | 23 | 24 | 1         | 1         | 1         | 57       | 48 | 49 | 0         | 1         | 1         |
| 27    | 24 | 25 | 1         | 1         | 2         | 58       | 49 | 50 | 0         | 0         | 1         |
| 28    | 25 | 8  | 0         | 0         | 0         | 59       | 42 | 47 | 1         | 0         | 0         |
| 29    | 8  | 27 | 0         | 0         | 0         | 60       | 47 | 46 | 1         | 1         | 1         |
| 30    | 27 | 26 | 0         | 1         | 1         | 61       | 46 | 14 | 1         | 1         | 2         |
| 31    | 27 | 28 | 0         | 1         | 1         | -        | -  | -  | -         | -         | -         |

Com o intuito de validar a metodologia proposta, a Tabela 11 apresenta os valores atualizados obtidos pelo AG-ESP, pelo trabalho realizado em Camargo, 2014 onde foi elaborada uma outra alternativa do AG de Chu & Beasley e pelo trabalho concluído de Baquero (2012) para o PSDEE para o sistema 54 barras.

Tabela 11 - Comparativo de Resultados do AG-Especializado com a Literatura - Sistema de 54 Barras

|                        | Custos (10 <sup>3</sup> R\$) |                 |                 | Total           |
|------------------------|------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                        | Circuitos                    | Subestações     | Perdas          |                 |
| Baquero, 2012          | 2.235,1                      | <b>3.641,84</b> | <b>1.351,10</b> | 7.228,00        |
| Camargo, 2014          | <b>2.124,45</b>              | <b>3.641,84</b> | 1.424,82        | <b>7.191,11</b> |
| AG-Especializado, 2017 | 2.220,9                      | <b>3.641,91</b> | 1.426,82        | 7.207,70        |

Os resultados apresentados indicam um aumento de 0,28% do melhor valor apresentado em Camargo, 2014 e 0,23% melhor que o valor encontrado na literatura até o momento. Os valores obtidos da melhor solução obtida pelo AG-ESP em relação as referências comparadas, é menor que Baquero, 2012, porém não foi melhor que Camargo, 2014 quanto aos custos com a construção e/ ou recondutoramento de circuitos, igual ao que se refere a custos com construção de subestações e maior no que diz respeito a custos com perda, o que mostra que o algoritmo apresentou um bom desempenho para encontrar soluções de boa qualidade para este teste.

## VI.1.2 – Sistema de 23 Barras

### VI.1.2.1 - Descrição do Problema

Este sistema foi avaliado na literatura pelos seguintes autores:

- Gomez et al. (2004) que utilizou a Meta-heurística de colônia de formigas para solução geral do sistema proposto;
- Nahman e Peric (2008) que utilizou Recozimento Simulado;
- Oliveira (2010) que utilizou um algoritmo heurístico construtivo associado com o Algoritmo de Branch and Bound;
- Souza (2011) que utilizou a Meta-heurística VNS;
- Camargo (2014) que utilizou o AG Chu & Beasley Especializado;

Trata-se de uma rede de distribuição de energia com tensão nominal de 34,5kv. O sistema possui 20 barras (pontos onde estão ligadas as cargas do sistema). São 35 ramais

candidatos a construção de acordo com as necessidades de atendimento das cargas do sistema proposto. Os ramais do sistema podem ser de dois tipos de condutores diferentes (0 ou 1), variando sua capacidade. Possui uma única subestação construída com capacidade de 10 MVA.

Para a realização destes testes foi considerado as seguintes características utilizadas por todos os autores acima mencionados:

- O planejamento ocorreu em uma única etapa e que o desvio máximo de tensão permitido foi de 3%;
- O fator de potência médio igual a 0,9;
- O custo de perdas de energia igual a 0,05 US\$/kWh;
- O fator de perdas igual a 0,35;

O sistema de distribuição de 23 barras proposto está demonstrado na Figura 64.

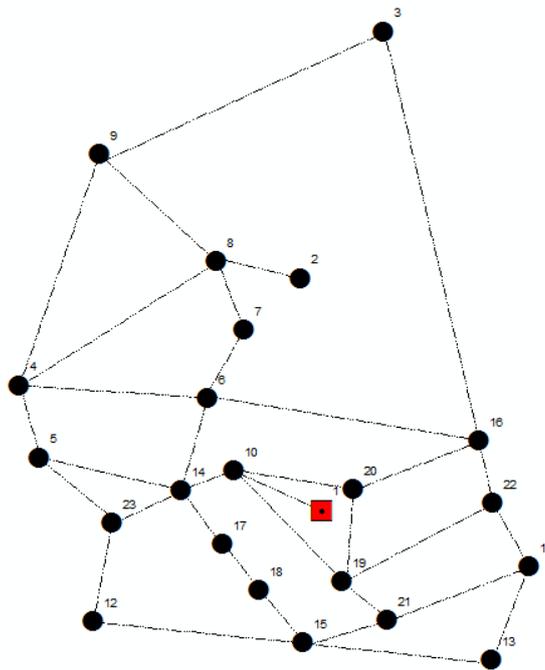


Figura 46 - Sistema de 23 Barras, (GOMEZ, KHODR, OLIVEIRA, OCQUE, & YUSTA, 2004).

### VI.1.2.2 - Parametrização do AG Especializado

Para a realização deste teste foi utilizada a metodologia proposta na literatura especializada, com uma população inicial de 100 indivíduos e um número máximo de iterações igual a 300.

### VI.1.2.3 - Resultados

A fase de melhoria local conseguiu resultados promissores algumas das soluções candidatas. Os resultados da melhor solução obtida com o algoritmo especializado, foram comparados com os resultados de, Gomes, 2004, Nahman e Peric, 2008, Lavorato, 2010, Souza, 2011 e Camargo, 2014 e estão apresentados Tabela 12, respectivamente.

Tabela 12- Comparativo entre Literatura e AG Especializado.

|                               | Custos (US\$)  |               |                |
|-------------------------------|----------------|---------------|----------------|
|                               | Circuitos      | Perdas        | Total          |
| <b>Gomes, 2004</b>            | 151.892        | 21.021        | 172.913        |
| <b>Nahman e Peric, 2008</b>   | 151.892        | 21.007        | 172.899        |
| <b>Lavorato, 2010</b>         | 151.892        | <b>20.217</b> | 172.109        |
| <b>Souza, 2011</b>            | 151.892        | <b>20.217</b> | 172.109        |
| <b>Camargo, 2014</b>          | <b>151.136</b> | <b>20.217</b> | <b>171.353</b> |
| <b>AG-Especializado, 2017</b> | <b>151.136</b> | 20.245        | 171.590        |

Como podemos notar houveram pequenas variações nos valores das perdas, provavelmente em decorrência de pequenas diferenças na tradução da metodologia utilizada no ambiente de desenvolvimento para encontrar o ponto de operação, parâmetros utilizados, faixa de limites de tensão permitida ou variações no modelo matemático.

Porém podemos observar também que os resultados no AG Especializado desenvolvido foram inferiores a Camargo, 2014, porém foram superiores a Souza, 2011 e Lavorato, 2010, que podem ser um resultado de algumas variações decorrentes da aplicação de técnicas distintas na geração uma população inicial melhorada.

Explicando a Figura 47, observamos à esquerda a coluna (A) com a simbologia de cores e representações de cada ramo do sistema de acordo com suas cores e estilo de tracejado. Também observamos na coluna (B) a rede antes da aplicação do PSDEE, e na coluna (C) o sistema de 23 barras resolvido após ser submetido ao PSDEE.

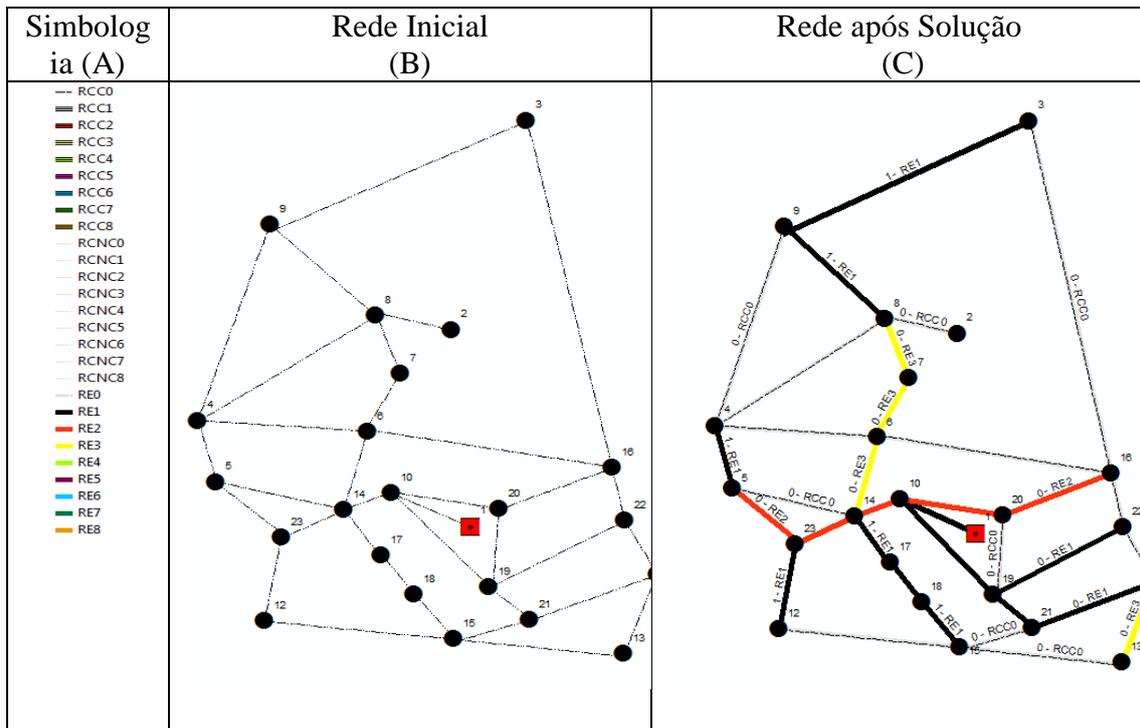


Figura 47 - Solução elaborada - Sistema de 23 barras, (Fonte: Autoria própria).

Na figura abaixo está apresentado o gráfico de custo X numero de iterações com os valores da incumbente ao longo das gerações:

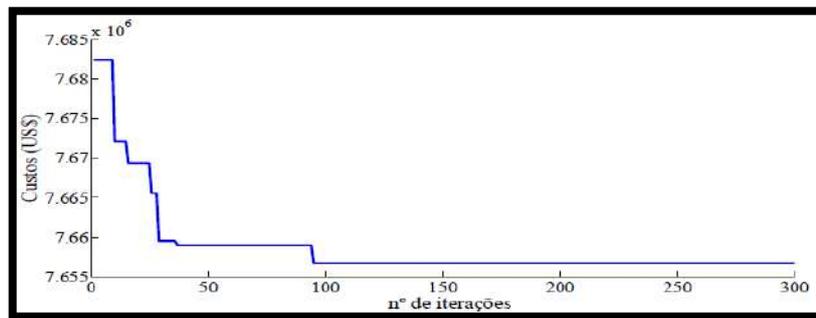


Figura 48 - Gráfico dos valores da incumbente ao longo das gerações - Sistema de 23 barras.

### **VI.1.3 Sistema de 136 Barras**

#### **VI.1.3.1 - Descrição do Problema**

Este sistema foi avaliado na literatura pelos seguintes autores:

- Camargo (2014) que utilizou um AG Chu & Beasley Especializado;

Este sistema foi testado em Oliveira (2010), Souza (2011) e Camargo (2014) e possui 136 barras e 156 ramos e é um sistema de distribuição real localizado em uma cidade de porte médio no Brasil, tendo como tensão base 13,8 KV, as condições de carga total ativa e reativa são 18.313,809 KW e 9.384,827 KVA<sub>r</sub>, respectivamente. Este sistema possui 21 circuitos com chaves de interconexão abertas, inicialmente as chaves abertas são 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155 e 156.

Há previsão de aumento de carga para a subestação 202 que no cenário atual está operando com sua capacidade máxima. Nesse caso, é necessário planejar uma transferência de cargas de uma subestação para outra. Esta ação requer a construção de novos circuitos e a abertura de circuitos existentes para satisfazer as condições de radialidade.

Para a realização destes testes foi considerado as seguintes características utilizadas por todos os autores acima mencionados:

- A máxima queda de tensão considerada admissível é de 7%;
- A sobretensão máxima é de 5%;
- O fator de potência médio é igual a 0,92;
- O custo das perdas de energia é de 0,001 US\$/kWh;
- O fator de perda é igual a 0,35;
- Custo de operação da subestação é de 0,000001 US\$/kVA2h.

Quatorze circuitos candidatos podem ser construídos no sistema, como mostra a Figura 49.

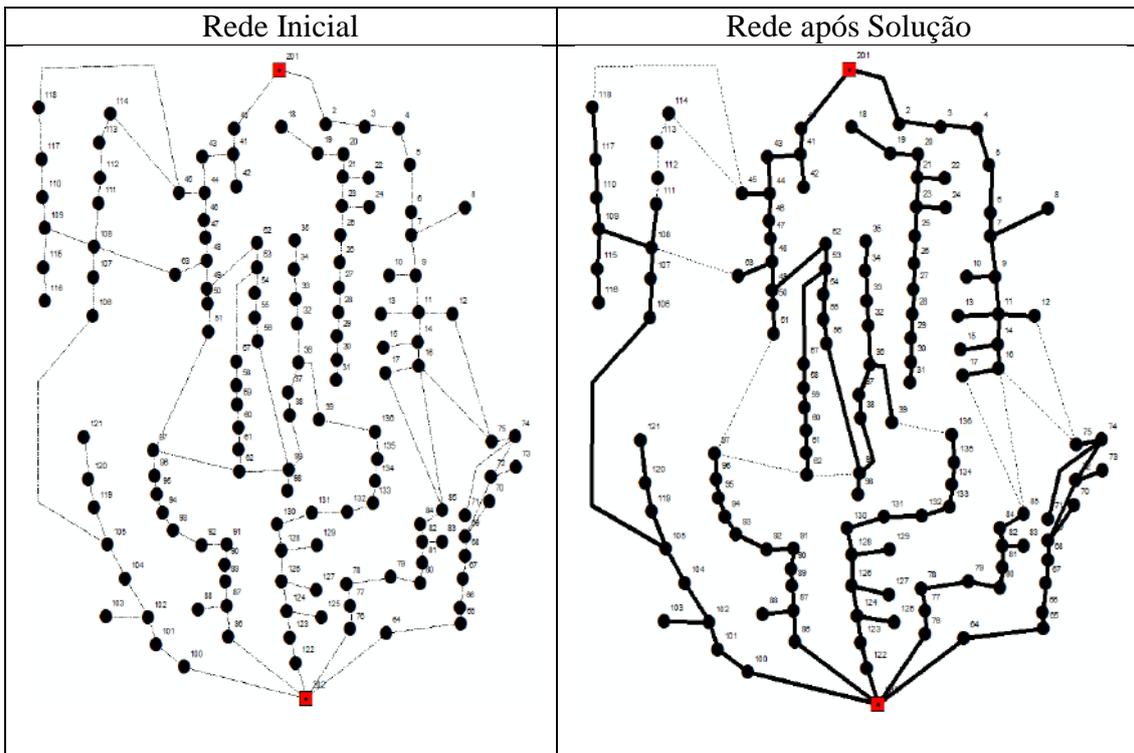


Figura 49 - Sistema de 136 Barras - Rede proposta e Solução após utilizar o AG Especializado, (Fonte: Autoria própria).

Da topologia inicial, 6 novos circuitos são construídos: 16-85, 39-136, 38-99, 45-114, 45-118 e 63-108 e conseqüentemente 6 já existentes são abertos para manter a radialidade do sistema 82-84, 98-99, 106-107, 108-109, 108-111 e 134-135. O valor das perdas ativas totais da melhor solução foi de aproximadamente 447,21 kW e a tensão mínima foi de 1,015 p.u. na barra 84. As subestações 201 e 202 fornecem respectivamente 10,78 MVA e 9,98 MVA de potência aparente ao sistema.

### VI.1.3.2 - Parametrização do AG Especializado

Para a realização deste teste o número de indivíduos utilizados para este teste foi de 60 e o número máximo de iterações utilizado para encontrar a melhor solução foi de 1000. O tempo de processamento foi em média de 120 segundos.

### VI.1.3.3 - Resultados

A melhoria local por troca de ramos conseguiu melhorar em torno de 85% das soluções. A topologia da solução obtida pelo AG-ESP foi a mesma encontrada por Oliveira (2010), Souza (2011) e Camargo (2014).

Tabela 13- Comparativo entre Literatura e AG Especializado.

|                               | Custos (US\$) |                  |                     |
|-------------------------------|---------------|------------------|---------------------|
|                               | Circuitos     | Perdas           | Total               |
| <b>Camargo, 2014</b>          | <b>4.000</b>  | <b>11.166,42</b> | <b>5.506.887,22</b> |
| <b>AG-Especializado, 2017</b> | 4.100         | 11.673.36        | 5.756.893,12        |

Na figura abaixo está apresentado o gráfico com os valores da incumbente ao longo das gerações:

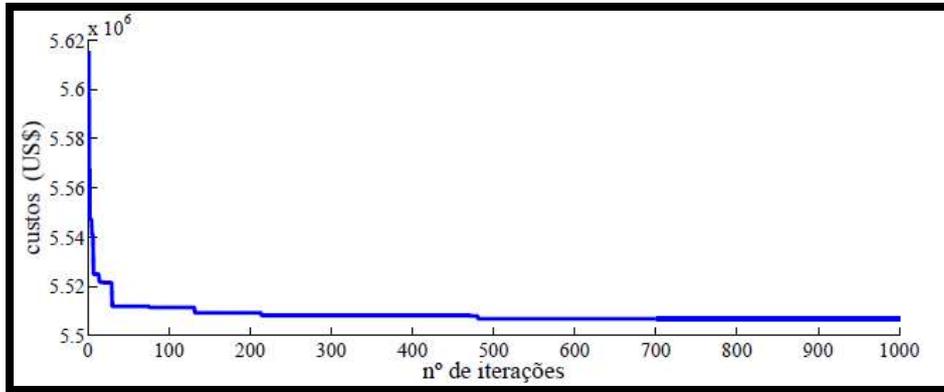


Figura 50 - Gráfico dos valores da incumbente ao longo das gerações - Sistema de 136 barras, (Fonte: Autoria própria)..

#### VI.1.4 – Sistema de 417 Barras

##### VI.1.4.1 - Descrição do Problema

Este sistema foi avaliado na literatura pelos seguintes autores:

- Baquero (2012) que utilizou Algoritmos heurísticos com busca Tabu;
- Camargo (2014) que utilizou um AG Chu & Beasley Especializado.

Possui duas subestações existentes sem possibilidade de ampliação e uma candidata à construção com duas alternativas de capacidade, 88 circuitos existentes e 385 ramos propostos. A tensão nominal do sistema é de 10 kV.

Para a realização destes testes foi considerado as seguintes características utilizadas por todos os autores acima mencionados:

- O planejamento ocorreu em uma única etapa e que o desvio máximo de tensão permitido foi de 3%;
- O fator de potência médio igual a 0,9;

- O custo de perdas de energia igual a 0,05 US\$/kWh;
- O fator de perdas igual a 0,35;
- A taxa de juros igual a 10% a.a. em um horizonte de planejamento de 20 anos,

#### VI.1.4.2 - Parametrização do AG Especializado

Para realizar os testes foram utilizados 300 indivíduos para compor a população inicial e um número máximo de 5000 iterações.

#### VI.1.4.3 - Resultados

A melhor solução encontrada pelo AG Especializado indica a construção da subestação na barra 416 no primeiro estágio. Assim como ocorreu para o sistema de 54 barras, o plano de expansão otimizado evitou o recondutoramento entre os estágios da maioria dos circuitos e a conexão de barras terminais com demanda nula, evitando gastos desnecessários com construção de circuitos.

A Figura 51 mostra a topologia encontrada no estágio 3 da melhor solução encontrada pelo AG-ESP para o sistema de 417 barras.

O Custo final encontrado na solução do sistema de 417 barras avaliado no AG Especializado, esta demonstrado e comparado com Camargo (2014) na Tabela 14.

Tabela 14- Resultados do sistema proposto de 417 barras. (Fonte: Autoria Própria)

|                               | Custos (US\$)  |               |                 |
|-------------------------------|----------------|---------------|-----------------|
|                               | Circuitos + SE | Perdas        | Total           |
| <b>Baquero, 2012</b>          | <b>3264,24</b> | <b>626,68</b> | <b>3.890,90</b> |
| <b>Camargo, 2014</b>          | 3394,74        | 665,55        | 4.060,29        |
| <b>AG-Especializado, 2017</b> | 3414,14        | 669,35        | 4.083,49        |

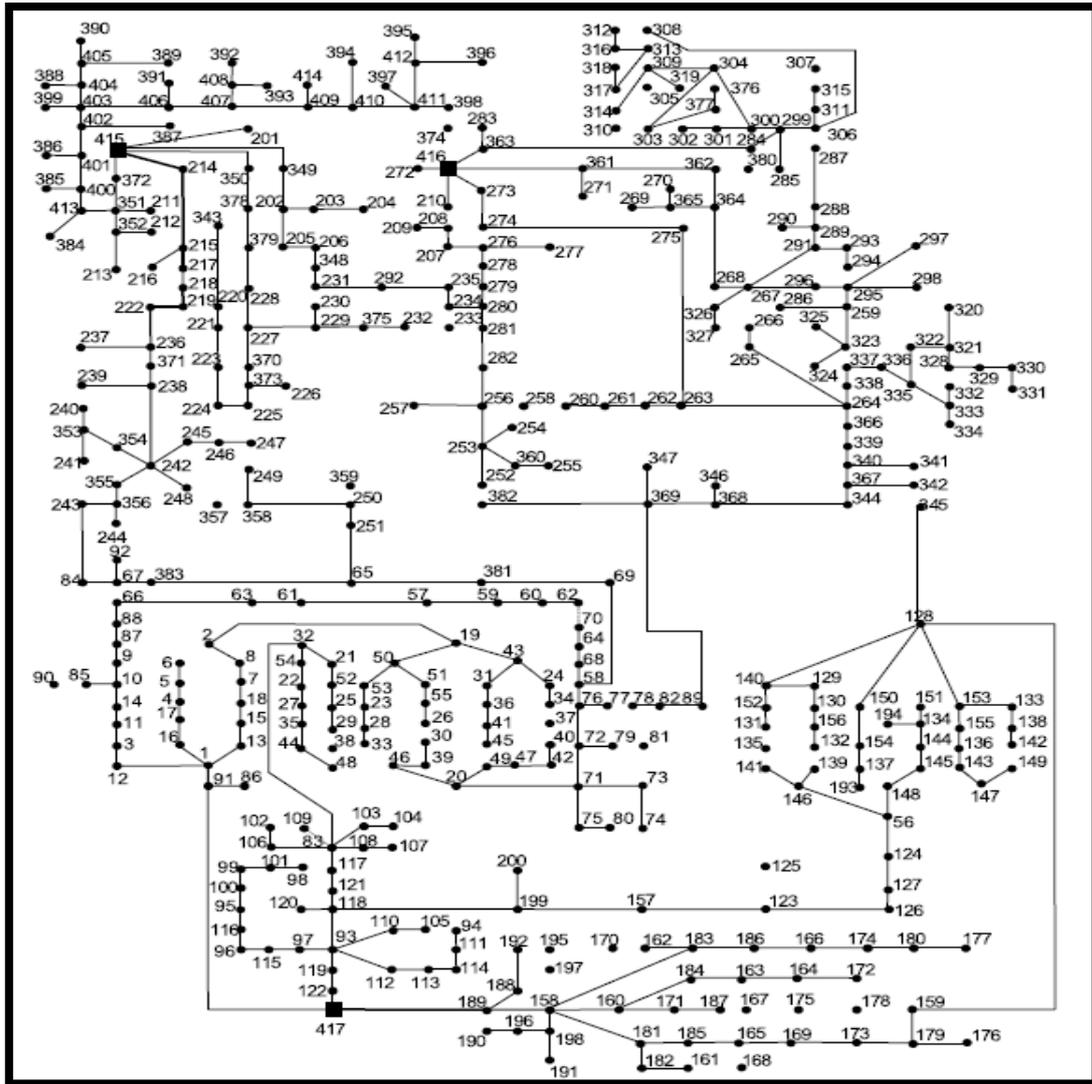


Figura 51 - Sistema de 417 barras,(BAQUERO, 2012).

## **CAPÍTULO VII - Considerações Finais e Conclusões**

### **VII.1 – Considerações finais**

Este trabalho teve como objetivo desenvolver um Algoritmo Genético Especializado, adaptado da metodologia implementada no trabalho de Chu & Beasley em conjunto com técnicas heurísticas específicas para resolver o problema de PSDEE. O PSDEE foi formulado como um problema de PNLIM visando minimizar os custos referentes aos investimentos e operação, sujeitos às restrições físicas, operacionais e aos limites estabelecidos dos indicadores de qualidade dos serviços prestados pela concessionária.

Uma das inovações adotadas neste trabalho foi a heurística de definição de uma população inicial melhorada através de um algoritmo de colônia de formigas denominado ACS ("*Ant Clony System*"). Muitos outros autores propuseram solucionar esta questão utilizando o algoritmo colônia de formigas, no entanto, sua grande maioria utiliza o ACO em conjunto com outros métodos e/ou dispuseram apenas da versão mais simples do algoritmo, como a AS. Outros autores dispuseram da variante MMAS. Por consequência, este trabalho teve como um dos objetivos implementar a variante ACS para solucionar o problema de criação de uma população de qualidade melhor com o seguinte propósito: efetuar uma análise comparativa do algoritmo implementado com outros trabalhos encontrados na literatura para comprovar a eficácia do método proposto.

No intuito de conhecer melhor a literatura que abraça a utilização de Algoritmos evolucionários na solução de problemas de planejamento de sistemas de distribuição de energia (PSDEE) e conhecer os trabalhos da área, foi elaborada uma revisão bibliográfica do assunto.

Podemos então concluir que existe uma grande e variada produção de estudos apontados para este problema, e que os modelos utilizados nesta questão possuem muitas igualdades, porém muitas inovações bastante interessantes. Com relação a função objetivo, os custos com instalação e/ou recondutoramento dos circuitos, construção e/ou ampliação das subestações e custos com perdas resistivas estão presentes na maioria dos modelos. Além dos custos típicos utilizados no planejamento, os custos de alguns elementos são adicionados para produzir soluções que atendam as especificidades de cada trabalho como: custos com chaves de manobra, com ramais de interconexões, com

energia não suprida, com geração distribuída, com instalação de banco de capacitores, com reguladores de tensão, dentre outros.

As restrições utilizadas são, na sua maioria, semelhantes. Das técnicas de soluções utilizadas as meta-heurísticas têm sido as mais empregadas para a solução do problema de PSDEE, com destaque para os Algoritmos Genéticos, os algoritmos de Colônia de Formigas e o Algoritmo de "*Tabu Search*" (Busca Tabu).

Diante das características e da natureza do problema de PSDEE e dos resultados apresentados na literatura, foi desenvolvido um Algoritmo Genético especializado, baseado na metodologia do trabalho de Chu & Beasley (1997) e de Camargo (2014) para resolver o problema de PSDEE, modelado como um problema PNLIM mono-objetivo, estático ou multiestágio (dinâmico), com o objetivo de investimentos e de operação mínimos, sujeitos às restrições físicas.

Os aspectos diferenciados do algoritmo genético desenvolvido para resolver o problema de PSDEE foram:

- Obtenção de uma população inicial com indivíduos obtidos por um algoritmo ACS ("*Ant Colony System*") que primeiro seleciona as subestações e posteriormente constrói os circuitos um a um de forma orientada a distribuir as cargas de acordo com a capacidade das subestações e gerar soluções com topologias radiais. Estas soluções são avaliadas quanto a sua qualidade pelos custos de investimento e de operação e quanto às suas restrições por uma função normalizada de restrições proposta neste trabalho, cujos valores de cada solução são armazenados em vetores diferentes para armazenar e tornar disponível para compor outras soluções atrativas.
- Heurísticas específicas para garantir as condições de radialidade das soluções geradas ao ser aplicado os operadores genéticos de recombinação e mutação.
- Inserção da etapa de melhoria local, com o objetivo de melhorar a viabilidade e a função de custo das soluções desenvolvidas.

- Controle a diversidade das soluções candidatas ao longo das gerações através do desenvolvimento e implementação de uma etapa de uma etapa de substituição com o objetivo de manter as soluções com características mais atrativas e a de eliminar gradativamente as que possuísem características indesejáveis para o problema por meio da avaliação dos seus respectivos valores de soluções viáveis e inviáveis.
- Para validar a metodologia proposta foram testados sistemas da literatura especializada. Os testes foram realizados em duas etapas: a primeira realizou o planejamento estático relaxando as restrições associadas aos limites dos indicadores de continuidade; a segunda realizou o planejamento multiestágio dinâmico considerando as mesmas restrições da etapa anterior.

O método proposto mostrou-se eficiente na resolução do PSDEE, pois como podemos observar no Capítulo VI, os resultados obtidos pelo AG especializado em todos os estudos de caso obtiveram resultados superiores, quando comparados aos outros métodos aplicados por outros pesquisadores, em um mesmo estudo de caso, porém os resultados do AG especializado, na maioria das vezes foi inferior a Camargo (2014). A avaliação dos resultados obtidos está fundamentada no bom desempenho dos métodos desenvolvidos para resolver os problemas de reconfiguração e seleção de condutores. O método proposto pode ser estendido para considerar a alocação de equipamentos como capacitores e reguladores de tensão. Outras opções de planejamento que podem ser incluídas são a alocação de chaves de manobras e de geradores distribuídos.

#### **VII.1.1 – Conclusões nos Estudos dos Sistemas Propostos:**

Na primeira etapa foram realizados testes no Planejamento Estático, onde foram avaliados os seguintes sistemas: Sistema de 23 e Sistema 136.

O sistema de 23 barras foi testado e comparado com outras soluções do PSDEE encontradas e apresentou um custo menor que a da literatura especializada.

O sistema de 136 barras encontrou a mesma configuração e valores encontrados pela literatura especializada, porém com tempos de processamento mais baixos. A melhoria local baseada na troca de ramos conseguiu encontrar soluções vizinhas de menor

custo, em média de 85% dos descendentes e para o sistema de 136 barras este percentual aumentou para a média de 95%.

Na segunda etapa foram realizados testes no planejamento multiestágio dinâmico, onde foram avaliados os seguintes sistemas: Sistemas de 54 barras e Sistema de 417 Barras.

Os resultados para avaliação e solução do sistema de 54 barras foram um pouco melhores que os resultados obtidos na literatura, porém não superiores a Camargo (2014), sendo que foram observadas melhorias de qualidade devido a troca de ramos e adiantamento de recondução, resultando e uma melhoria de aproximadamente 95% das soluções candidatas a solução do sistema proposto.

No sistema de 417 barras a solução encontrada pelo algoritmo corresponde a 4,15% melhor do que os resultados encontrados na literatura especializada e 0,19% inferior aos resultados encontrados em Camargo (2014).

Diante dos resultados obtidos, o algoritmo proposto neste trabalho mostrou-se bastante efetivo na solução de problemas de PSDEE, em ambas metodologias de planejamento estático e planejamento multiestágio dinâmico.

A interface GIS desenvolvida para ler dados e interpretar resultados em um ambiente GIS, foi uma das inovações deste trabalho. Com esta interface a conversão de dados das redes de distribuição a um formato compatível com o AG, e a interpretação dos resultados do PSDEE, tarefas consideradas complicadas antes da criação da interface, foi rápida e eficaz.

#### **VII.1.2– Propostas para Trabalhos Futuros:**

Como melhorias e desenvolvimentos futuros a serem implementados na metodologia sugerida nesta pesquisa, podemos apontar:

- Aplicação do algoritmo baseados em outras heurísticas para as fases de população inicial, substituição e mutação;
- Inserção de Geração Distribuída (GD) no sistema, de forma a levar em consideração a inserção de novas fontes de energias dinâmicas ao sistema;

- Implementação de um módulo de restauração de redes de distribuição na eminência de simulação de faltas na rede cuja topologia já esteja definida;
- Utilizar otimização multiobjetivo;
- Modelagem cargas de potências dinâmicas;

## BIBLIOGRAFIA

- A.ABUR. (1996). A modified linear programming method for distribution system reconfiguration. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems* (pp. 673-676). ISCAS: IEEE.
- ADAMS, R. N., & LAUGHTON, M. A. (1974). Optimal planning of power networks using mixed-integer programming. part 1: static and time-phased network synthesis. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, p. 139 –147.
- AHUJA, A., & PAHWA, A. (2005). Using Ant Colony for Loss Minimization in Distribution Networks. *Proceedings of the 37th Annual North American Power Symposium.*, pp. 470-474.
- ARCANJO, D. N. (2014). Metodologia multi-estágio para restabelecimento de sistemas elétricos de distribuição utilizando algoritmos bio-inspirados. *Tese de Mestrado. Juiz de Fora – MG, Brasil. Universidade Federal de Juiz de Fora.*
- BALABANIAN, N., & BICKART, T. A. (1969). *Electrical Network Theory*. Wiley, New York.
- BAQUERO, J. F. (2012). Estratégia de decomposição para resolver o problema de planejamento da expansão de sistemas de distribuição. *Doutorado em Engenharia Elétrica —Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira*, 170 f.
- BARAN, & WU. (1989). NETWORK RECONFIGURATION IN DISTRIBUTION SYSTEMS FOR LOSS REDUCTION AND LOAD BALANCING . *IEEE Transactions on Power Delivery*, p.1401-1407.
- BAYKASOGLU, A., OWEN, S., & GINDY, N. (1999). Solution of goal programming models using a basic taboo search algorithm. *Journal of the Operational Research Society, Catonsville*, v. 50, n. 9., p. 960–973.
- BERNAL-AGUSTÍN, J. L. (1998). Aplicación de algoritmos genéticos al diseño optimo de sistemas de distribución de energía eléctrica. *Doctoral Ingeniero Industrial Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Zaragoza. Zaragoza, Zaragoza, Espanha.*

- BRAZ, H. D. (2000). Configuração de sistemas de distribuição usando um algoritmo genético sequencial. *Mestrado em Engenharia Elétrica*, 71f.
- BUENO, E. A. (2005). Redução de perdas técnicas através de reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica sob demandas variáveis. *Doutorado em Engenharia Elétrica*. Campinas, São Paulo, Brasil: Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.
- CAMARGO, V. L. (2014). Algoritmo Genético Especializado Aplicado ao Planejamento da Expansão de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. Ilha Solteira, São Paulo, Brasil.
- CARPANETO, E., & CHICCO, G. (2004). Distribution system minimum loss reconfiguration in the Hyper-Cube Ant Colony Optimization framework. *ELECTRIC POWER SYSTEMS RESEARCH*, vol. 78 n. 12. ISSN 0378-7796, pp. 2037-204.
- CARRANO, E. G., SOARES, L. A., TAKAHASHI, R. H., SALDANHA, R., & NETO, O. (2006). Electric distribution network multiobjective design using a problem-specific genetic algorithm. *IEEE Transactions on Power Delivery, Toronto*, v. 21, n. 2., p. 995–1005.
- CARREÑO, E. M., ROMERO, R., & FELTRIN, A. P. (2008). An efficient codification to solve distribution network reconfiguration for loss reduction problem. *IEEE Transactions on Power Systems*,, 1542–1551.
- CARVALHO, T. L. (2015). Aplicação de algoritmos colônia de formigas na reconfiguração e alocação de bancos de capacitores em redes elétricas de distribuição. *Dissertação de Mestrado, UFBA, Salvador*.
- CERNY, V. (1985). Algorithm., hermodynamical Approach to the Traveling Salesman. Problem: An Efficient Simulation. *JOURNAL OF OPTIMIZATION THEORY AND APPLICATIONS: Vol. 45, No. 1*.
- CESPEDES, R. (1990). New method for the analysis of distribution networks. *IEEE Transactions on Power Systems, New York*, v. 5, n. 1., p. 391-396.

- CHANG, C.-F. (2008). Reconfiguration and capacitor placement for loss reduction of distribution systems by ant colony search algorithm. *IEEE Transactions on Power Systems*. vol. 23, no.4., p.1747 – 1755.
- CHU, P., & BEASLEY, J. E. (1997). A genetic algorithm for the generalised assignment problem. *Computers and Operations Research, Kidlington*, v. 24, n. 1., p. 17–23.
- Civanlar, S., Grainger, J. J., & Yin, H. a. (1988). Distribution feeder reconfiguration for loss reduction. . *IEEE Trans. Power Delivery, Vol. III, No. 3.,* pp. 1217-1223. .
- CIVANLAR, S., GRAINGER, J., & YIN, H. L. (1988). Distribution feeder reconfiguration for loss reduction. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1217-1223.
- COSSI, A. M. (2008). PLANEJAMENTO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DE MÉDIA E BAIXA TENSÃO. Ilha Solteira, São Paulo, Brasil.
- CRAWFORD, D. M., & HOLT, S. B. (1974). A mathematical optimization technique for locating and sizing distribution substations, and deriving their optimal service areas. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, New York*, v. 94, n. 2., p. 230–235.
- DIAS, B. D. (2002). Avaliação de indicadores de continuidade e seu impacto no planejamento de sistemas de distribuição. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Energia e Automação Elétrica, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.*, 139 f.
- DORIGO, BIRATTARI, & STÜTZLE. (2006). Ant colony optimization. *IEEE Computational Intelligence*, pp.28-39.
- DORIGO, J. F. (1997). Ant colonies for the travelling salesman problem. *IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, VOL. 1, NO. 1*, p.53-66.

- DORIGO, M., MANIEZZO, V., & COLORNI. (1996). A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Part B: Cybernetics, New York*, v. 26, n. 1, p. 29-41.
- GALLEGO, L. A., RIDER, M. J., LAVORATO, M., & PADILHA-FELTRIN. (2012, jan). An enhanced genetic algorithm to solve the static and multistage transmission network expansion planning. *Journal of Electrical and Computer Engineering, New York*, v. 2012, n. 5, pp. p. 1–12.
- GANGULY, S., & SAHOO, N. C. (2009). Multi-objective planning of electrical distribution systems using particle swarm optimization. *INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRIC POWER AND ENERGY CONVERSION SYSTEMS. Sharjah.Proceedings... New York: IEEE.*, p. 1–6.
- GHORBANI, M., HOSSEINIAN, S., & VAHIDI, B. (2008). Application of Ant Colony System algorithm to distribution networks reconfiguration for loss reduction. *11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment.*, p. 269-273.
- GLAMOCANIN, V. (1990). Optimal loss reduction of distribution networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, 774-782.
- GLOVER, F. (1986). Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers and Operations Research, New York*, v.13, n. 5, p. 533-349.
- Glover, F. (1995, August). Fundamental principles underlying tabu search as a strategy for combinatorial optimization problems. *ORSA Journal on computing*, pp. p. 190-206.
- GOMEZ, J. F., KHODR, H. M., OLIVEIRA, P. M., OCQUE, L., & YUSTA, J. M. (2004). Ant colony system algorithm for the planning of primary distribution circuits. *IEEE Transactions on Power Systems, Piscataway*, v. 19, n. 2, p.996-1004.
- GÖNEN, T., & FOOTE, B. L. (1983). Distribution-system planning using mixed-integer programming. *IEEE*.

- GOSWAMI, S. K. (1992). A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization. *IEEE Trans. Power Delivery*, p.1484-1491.
- GOSWAMI, S. K., & BASU, S. K. (1992). A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss mimization. *IEEE Transactions on Power Delivery*, p.1484-1490.
- GUIMARÃES, M. (2005). *Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando algoritmos de Busca Tabu*. Campinas: Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.
- GUIMARÃES, M. A., LORENZETI, J. F., & A., C. (2004c). Reconfiguration of distribution system for voltage stability margin enhancement using Tabu Search. *CONFERENCE ON POWER SYSTEM TECHNOLOGY - POWERCON - Singapore. Proceedings... New york: IEEE*, p. 1556-1561.
- HAFFNER, S., & BARRETO, S. (2006). Modelo multi-estágio de otimização para o planejamento da expansão de sistemas de distribuição. *Revista controle & automação*, 478 – 492.
- Holland, J. H. (1975). *daptation in Natural and Artificial Systems, Mich., Ann Arbor:Univ. of Michigan Press*. Michigan .
- HÖLLDOBLER, & WILSON. (1990). *The Ants*. Verlag, Berlin: --.
- HU, Z. (2008). Distribution network reconfiguration based on ant colony system algorithm. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 3., p. 1288 – 1295.
- JONNAVITHULA, S., & BILLINTON, R. (1996). Minimum cost analysis of feeder routing in distribution system planning. *IEEE Transactions on Power Delivery, Toronto, v. 11, n. 4.,* p. 1935-1940.
- KAGAN, N., SCHMIDT, H., OLIVEIRA, C., & KAGAN, N. (2009). Métodos de otimização aplicados a sistemas elétricos de potência. *São Paulo: Blucher,* 228p.
- KHOA, T. B. (2006). A hybrid ant colony search based reconfiguration of distribution network for loss reduction. . *IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America.* , p. 1-7.

- KIRKPATRICK, S., GELATT, C. D., & VECCHI, M. P. (1983). Optimization by Simulated Annealing. *Science, New Series, Vol. 220, No. 4598*, pp. 671-680.
- KNIGHT, U. G. (1960). The logical design of electrical networks using linear programming methods. *Proceedings of the IEE - Part A: Power Engineering, Stevenage, v. 107, n. 33*, p.306–314.
- L., C. D., KHAN, I., & RAVICHANDRAN, S. (2005). Distribution network reconfiguration for loss reduction using ant colony system algorithm. *Annual IEEE India Conference.*, p. 619 – 622.
- LACERDA, E. G., & CARVALHO, A. C. (1999). Sistemas inteligentes:aplica,ções a recursos hídricos e ciências ambientais. Introdu,ção aos AGs. *Disponível em: <http://www.dca.ufrn.br/estefane/metaheurísticas/ag.pdf>*.
- LOTERO, R., & CONTRERAS, J. (2011, Oct.). Distribution system planning with reliability. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2552 –2562.
- LUCERO, F. A. (2004). *Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica para a melhoria das condições de operação com relação à estabilidade de tensão*. Campinas: Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação , Universidade Estadual de Campinas.
- MERLIN, A., & BACK, H. (1975). Search for a minimal-loss operating spanning tree configuration in an urban power distribution system. *POWER SYSTEM COMPUTATION CONFERENCE*,, (pp. 1-18). Cambridg.
- MICHALEWICZ, Z. (1996). *Evolutionary Algorithms and Data Structures*. North Carolina.
- MIGUEZ, E., CIDRAS, J., DIAZ-DORADO, E., & GARCIA-DORNELAS, J. (2002). An improved branch-exchange algorithm for large-scale distribution network planning. *IEEE Transactions on Power Systems*, 931–936.
- MIRANDA, V., RANITO, J. V., & PROENÇA, L. M. (1994). Genetic algorithm in optimal multistage distribution network planning. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1927–1933.

- N., G. M. (2009a). Plataforma integrada para o panejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando metaheurísticas. *IEEE Transactions on Power Delivery*, p.1401-1407.
- NAHMAN, J., & PERIC, D. (2008). Optimal planning of radial distribution networks by simulated annealing technique. *IEEE Transactions on Power Systems, Piscataway*, v. 23, n. 2., p. 790–795.
- NORMAN BALABANIAN, T. B. (1969). *Electrical Network Theory*;. Mishawaka.
- OLIVEIRA, M. L. (2010). Planejamento Integrado da Expansão de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. *Planejamento Integrado da Expansão de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*. Campinas: Universidade Estadual de Campinas.
- PÁDUA, S. (2014). Planejamento de sistemas de distribuição de energia elétrica de média tensão através de um algoritmo busca dispersa. *Doutorado em Engenharia Elétrica - Universidade Estadual Paulista*. Ilha Solteira, São Paulo, Brasil.
- PARADA, V., FERLAND, J., ARIAS, M., & DANIELS, K. (2004). Optimization of electrical distribution feeders using simulated annealing. *IEEE Transactions on Power Delivery, Toronto*, v. 19, n. 3., p. 1135 – 1141.
- PEREIRA, F. (2010). Reconfiguração ótima de sistemas de distribuição de energia elétrica. *Reconfiguração ótima de sistemas de distribuição de energia elétrica*. São Carlos, São Paulo, Brasil.
- PEREIRA-JUNIOR, B. (2014). Planejamento de médio e longo prazo de sistemas de distribuição de energia elétrica com geradores distribuídos (GDs) considerando custos de confiabilidade, operação e expansão. *Doutorado em Engenharia Elétrica - Faculdade de Engenharia Elétrica*. São Paulo, Ilha Solteira, Brasil.
- PEREIRA-JUNIOR, B. (2014). Planejamento de médio e longo prazo de sistemas de distribuição de energia elétrica com geradores distribuídos (GDs) considerando custos de confiabilidade, operação e expansão. *Doutorado em Engenharia Elétrica - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.*, 194 f.

- RADHA, B., KING, R. T., & RUGHOOPUTH, C. S. (2003). A modified genetic algorithm for optimal electrical distribution network reconfiguration. *CONGRESS EVOLUTIONARY COMPUTATION*, pp. 1472-1479.
- RAMIREZ-ROSADO, I. J., & BERNAL-AGUSTIN, J. L. (Feb. 2001). Reliability and costs optimization for distribution networks expansion using an evolutionary algorithm. *IEEE Transactions on Power Systems*, 111–118.
- REEVES, C. (2003). Genetic algorithms. In: GLOVER, F.; KOCHENBERGER, G. (Ed.). *Handbook of metaheuristics*. Boston: Kluwer Academic, p. 55–104.
- RENDÓN, R. A., ZULUAGA, A. E., & OCAMPO, E. M. (2008). Técnicas metaheurísticas de optimización. 2. ed. Pereira (Colombia). *Universidad Tecnológica de Pereira*, 315 p.
- ROBBINS, H., & MONRO, S. (1951). A stochastic approximation method. *Annals of Mathematical Statistics.*, p. 400-407.
- ROMERO, R., & LAVORATO, M. (2012). Metaheurísticas em sistemas elétricos de potência: introdução ao estudo e aplicações. *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – SBSE*, p. 1-52.
- RUGTAICHAROENCHEEP, N., & SIRISUMRANNUKUL, S. (2010). Feeder reconfiguration for loss reduction in three phase distribution system under unbalanced loading conditions. *UNIVERSITIES POWER ENGINEERING CONFERENCE- UPEC*, pp. 1-6.
- SANCA, H. S. (2013). *Reconfiguração Ótima de sistemas de distribuição de energia elétrica aplicando o algoritmo MAX-MIN Ant System*. Salvador: Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Bahia.
- SARFI, R. J., SALAMA, M. M., & CHIKHANII, A. Y. (1994). survey of the state of the art in distribution system reconfiguration for system loss reduction. *Electric Power Systems Research*, 61-70.
- SARFI, R. S. (1994). A Survey of the in Distribution System Reconfiguration for System Loss Reduction. *Electric Power System Research*,, 61-70.

- SHIMOHAMMADI, D., & HONG, H. W. (1989). Reconfiguration of electric distribution for resistive line loss reduction. *IEEE Transactions on Power Delivery*, p.1492-1498.
- SHIRMOHAMMADI, D., & HONG, H. W. (1989). Reconfiguration of electric distribution for resistive line loss reduction. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1492-1498.
- SKOK, M., KRAJCAR, S., & SKRLEC, D. (2005). Dynamic planning of medium voltage open-loop distribution networks under uncertainty. *INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT SYSTEMS APPLICATION TO POWER SYSTEMS, 13, 2005, Arlington.Proceedings... New York: IEEE.*, p. 1–6.
- SOUZA, J. (2011). *Planejamento de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Através de um Modelo de Programação Linear Inteiro Misto (PLIM)*. Ilha Solteira - SP: Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista.
- STUTZLE, T., & HOOS, H. H.-M. (2000, april). Future generation computer systems. *Ieee International Conference On Evolutionary Computation (ICEC '97), Indianapolis,;*, pp. p.309-314.
- SU, C.-T., CHANG, C.-F., & CHIOU, J.-P. (2005). Distribution network reconfiguration for loss reduction by ant colony search algorithm. *Electric Power Systems Research, vol. 75, no. 2-3.*, p. 190-199.
- T, S., E, S. L., L, T. G., & B, O. H. (2010). RESTABELECIMENTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA. *XLIISBPO*, 837-848.
- TANOMARU, J. (1995). Motivação, fundamentos e aplicações de algoritmos genéticos. *CONGRESSO BRASILEIRO DE REDES NEURAIS*, 2 (p. 30p). Curitiba: Anais.
- TAYLOR, J. A., & HOVER, F. S. (2012). Convex models of distribution system reconfiguration. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1407-1413.

THOMAS A. FEO, K. S. (1996). A grasp for single machine scheduling with sequence dependent setup costs and linear delay penalties. *Computers & Operations Research*, Volume 23, p.881-895.

ZAPATA, C. (2011). *Confiabilidad en ingeniería*. Pereira / Colombia.

ZVIETCOVICH, W. G. (2006). Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando a metaheurística busca em vizinhança variável. *Mestrado em Engenharia Elétrica*. Ilha Solteira, São Paulo, Brasil: Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual de Paulsta - UNESP.

## ANEXO I - Resumo dos Resultados do PSDEE

Apresento o resumo de todos os resultados do PSDEE para sistemas de distribuição sugeridos na literatura obtidos pelo AG especializado e por outros autores da literatura especializada.

### SISTEMA DE 54 BARRAS

|                        | Custos (10 <sup>3</sup> R\$) |                 |                 | Total    |
|------------------------|------------------------------|-----------------|-----------------|----------|
|                        | Circuitos                    | Subestações     | Perdas          |          |
| Baquero, 2012          | 2.235,1                      | <b>3.641,84</b> | <b>1.351,10</b> | 7.228,00 |
| Camargo, 2014          | <b>2.124,45</b>              | <b>3.641,84</b> | 1.424,82        | 7.191,11 |
| AG-Especializado, 2017 | 2.220,9                      | <b>3.641,91</b> | 1.426,82        | 7.207,70 |

### SISTEMA DE 23 BARRAS

|                        | Custos (US\$)  |               |                |
|------------------------|----------------|---------------|----------------|
|                        | Circuitos      | Perdas        | Total          |
| Gomes, 2004            | 151.892        | 21.021        | 172.913        |
| Nahman e Peric, 2008   | 151.892        | 21.007        | 172.899        |
| Lavorato, 2010         | 151.892        | <b>20.217</b> | 172.109        |
| Souza, 2011            | 151.892        | <b>20.217</b> | 172.109        |
| Camargo, 2014          | <b>151.136</b> | <b>20.217</b> | <b>171.353</b> |
| AG-Especializado, 2017 | <b>151.136</b> | 20.245        | 171.590        |

### SISTEMA DE 136 BARRAS

|                        | Custos (US\$) |                  |                     |
|------------------------|---------------|------------------|---------------------|
|                        | Circuitos     | Perdas           | Total               |
| Camargo, 2014          | <b>4.000</b>  | <b>11.166,42</b> | <b>5.506.887,22</b> |
| AG-Especializado, 2017 | 4.100         | 11.673.36        | 5.756.893,12        |

## SISTEMA DE 417 BARRAS

|                        | Custos (US\$)   |               |                 |
|------------------------|-----------------|---------------|-----------------|
|                        | Circuitos + SE  | Perdas        | Total           |
| Baquero, 2012          | <b>3.264,24</b> | <b>626,68</b> | <b>3.890,90</b> |
| Camargo, 2014          | 3.394,74        | 665,55        | 4.060,29        |
| AG-Especializado, 2017 | 3.414,14        | 669,35        | 4.083,49        |

**ANEXO II - Dados do Sistema de 54 Barras.**

Tabela 15 - Dados de ramo do sistema de 54 barras

| circuito | Barra<br><i>i</i> | Barra<br><i>j</i> | $l_{ij}$<br>(km) | $tc_o$ | circuito | Barra<br><i>i</i> | Barra<br><i>j</i> | $l_{ij}$<br>(km) | $tc_o$ |
|----------|-------------------|-------------------|------------------|--------|----------|-------------------|-------------------|------------------|--------|
| 1        | 51                | 01                | 1,405            | 2      | 32       | 06                | 28                | 2,5              | 0      |
| 2        | 51                | 03                | 1,09             | 2      | 33       | 54                | 30                | 1,405            | 0      |
| 3        | 03                | 04                | 1,56             | 1      | 34       | 30                | 29                | 1,56             | 0      |
| 4        | 04                | 07                | 1,25             | 1      | 35       | 30                | 43                | 2,03             | 0      |
| 5        | 04                | 05                | 1,56             | 1      | 36       | 43                | 37                | 1,25             | 0      |
| 6        | 07                | 08                | 1,56             | 1      | 37       | 37                | 31                | 0,935            | 0      |
| 7        | 05                | 06                | 1,25             | 1      | 38       | 31                | 10                | 1,56             | 0      |
| 8        | 01                | 09                | 1,715            | 1      | 39       | 13                | 43                | 1,875            | 0      |
| 9        | 01                | 02                | 1,56             | 1      | 40       | 12                | 45                | 1,25             | 0      |
| 10       | 09                | 10                | 3,59             | 1      | 41       | 45                | 44                | 1,09             | 0      |
| 11       | 52                | 14                | 1,875            | 1      | 42       | 44                | 38                | 1,56             | 0      |
| 12       | 14                | 15                | 1,875            | 1      | 43       | 38                | 39                | 1,715            | 0      |
| 13       | 15                | 16                | 1,405            | 1      | 44       | 39                | 32                | 2,03             | 0      |
| 14       | 52                | 11                | 1,405            | 1      | 45       | 39                | 33                | 1,405            | 0      |
| 15       | 11                | 12                | 1,56             | 1      | 46       | 33                | 08                | 2,34             | 0      |
| 16       | 12                | 13                | 2,185            | 1      | 47       | 33                | 34                | 0,935            | 0      |
| 17       | 19                | 20                | 1,56             | 0      | 48       | 34                | 35                | 1,09             | 0      |
| 18       | 18                | 19                | 1,25             | 0      | 49       | 35                | 36                | 1,09             | 0      |
| 19       | 17                | 18                | 2,03             | 0      | 50       | 53                | 36                | 1,25             | 0      |
| 20       | 09                | 17                | 2,15             | 0      | 51       | 53                | 28                | 1,56             | 0      |
| 21       | 18                | 21                | 1,56             | 0      | 52       | 53                | 41                | 1,56             | 0      |
| 22       | 54                | 21                | 1,25             | 0      | 53       | 41                | 40                | 1,25             | 0      |
| 23       | 54                | 22                | 1,875            | 0      | 54       | 40                | 16                | 1,25             | 0      |
| 24       | 09                | 22                | 2,34             | 0      | 55       | 41                | 42                | 1,875            | 0      |
| 25       | 22                | 23                | 1,715            | 0      | 56       | 42                | 48                | 1,25             | 0      |
| 26       | 23                | 24                | 1,405            | 0      | 57       | 48                | 49                | 1,875            | 0      |
| 27       | 24                | 25                | 1,09             | 0      | 58       | 49                | 50                | 1,09             | 0      |
| 28       | 25                | 08                | 1,405            | 0      | 59       | 42                | 47                | 1,56             | 0      |
| 29       | 8                 | 27                | 1,875            | 0      | 60       | 47                | 46                | 1,56             | 0      |
| 30       | 27                | 26                | 1,715            | 0      | 61       | 46                | 14                | 1,715            | 0      |
| 31       | 27                | 28                | 1,56             | 0      | -        | -                 | -                 | -                | -      |

Fonte: Baquero (2012)

(continua)

| Barra<br><i>i</i> | $P_{D_i}$ (kW) |           |           | $Q_{D_i}$ (KVar) |           |           |
|-------------------|----------------|-----------|-----------|------------------|-----------|-----------|
|                   | Estágio 1      | Estágio 2 | Estágio 3 | Estágio 1        | Estágio 2 | Estágio 3 |
| 51                | 000            | 000       | 000       | 000              | 000       | 000       |
| 52                | 000            | 000       | 000       | 000              | 000       | 000       |
| 53                | 000            | 000       | 000       | 000              | 000       | 000       |
| 54                | 000            | 000       | 000       | 000              | 000       | 000       |
| 1                 | 2970           | 3420      | 3780      | 1650             | 1900      | 2100      |
| 2                 | 990            | 1170      | 1350      | 550              | 650       | 750       |
| 3                 | 360            | 450       | 630       | 200              | 250       | 350       |
| 4                 | 1260           | 1710      | 990       | 700              | 950       | 550       |
| 5                 | 1800           | 2070      | 2340      | 1000             | 1150      | 1300      |
| 6                 | 540            | 630       | 630       | 300              | 350       | 350       |
| 7                 | 180            | 450       | 900       | 100              | 250       | 500       |
| 8                 | 1350           | 1530      | 1710      | 750              | 850       | 950       |
| 9                 | 1710           | 1800      | 1080      | 950              | 1000      | 600       |
| 10                | 1800           | 2160      | 2610      | 1000             | 1200      | 1450      |
| 11                | 180            | 270       | 270       | 100              | 150       | 150       |
| 12                | 900            | 1440      | 1620      | 500              | 800       | 900       |
| 13                | 810            | 900       | 990       | 450              | 500       | 550       |
| 14                | 720            | 810       | 900       | 400              | 450       | 500       |
| 15                | 900            | 1080      | 1260      | 500              | 600       | 700       |
| 16                | 1170           | 1350      | 1710      | 650              | 750       | 950       |
| 17                | 450            | 540       | 630       | 250              | 300       | 350       |
| 18                | 810            | 900       | 1080      | 450              | 500       | 600       |
| 19                | 900            | 1080      | 1260      | 500              | 600       | 700       |
| 20                | 450            | 630       | 720       | 250              | 350       | 400       |
| 21                | 450            | 1440      | 1620      | 250              | 800       | 900       |
| 22                | 450            | 900       | 990       | 250              | 500       | 550       |
| 23                | 450            | 810       | 900       | 250              | 450       | 500       |
| 24                | 450            | 360       | 450       | 250              | 200       | 250       |
| 25                | 540            | 720       | 810       | 300              | 400       | 450       |
| 26                | 0              | 720       | 1080      | 0                | 400       | 600       |
| 27                | 0              | 1080      | 1350      | 0                | 600       | 750       |
| 28                | 360            | 450       | 630       | 200              | 250       | 350       |
| 29                | 540            | 810       | 1260      | 300              | 450       | 700       |
| 30                | 1800           | 2070      | 2340      | 1000             | 1150      | 1300      |
| 31                | 540            | 630       | 630       | 300              | 350       | 350       |
| 32                | 000            | 1350      | 1530      | 000              | 750       | 850       |
| 33                | 1620           | 2070      | 2610      | 900              | 1150      | 1450      |
| 34                | 810            | 900       | 1080      | 450              | 500       | 600       |
| 35                | 000            | 000       | 810       | 000              | 000       | 450       |
| 36                | 180            | 180       | 270       | 100              | 100       | 150       |
| 37                | 900            | 1440      | 1890      | 500              | 800       | 1050      |
| 38                | 000            | 0         | 990       | 000              | 000       | 550       |

| Barra<br><i>i</i> | $P_{D_i}$ (kW) |           |           | $Q_{D_i}$ (KVAr) |           |           |
|-------------------|----------------|-----------|-----------|------------------|-----------|-----------|
|                   | Estágio 1      | Estágio 2 | Estágio 3 | Estágio 1        | Estágio 2 | Estágio 3 |
| 39                | 720            | 810       | 900       | 400              | 450       | 500       |
| 40                | 900            | 1080      | 1260      | 500              | 600       | 700       |
| 41                | 270            | 450       | 810       | 150              | 250       | 450       |
| 42                | 000            | 000       | 1080      | 000              | 000       | 600       |
| 43                | 000            | 000       | 1170      | 000              | 000       | 650       |
| 44                | 450            | 900       | 1260      | 250              | 500       | 700       |
| 45                | 450            | 450       | 720       | 250              | 250       | 400       |
| 46                | 000            | 1440      | 1620      | 000              | 800       | 900       |
| 47                | 450            | 450       | 900       | 250              | 250       | 500       |
| 48                | 450            | 540       | 720       | 250              | 300       | 400       |
| 49                | 000            | 540       | 450       | 000              | 300       | 250       |
| 50                | 000            | 000       | 720       | 000              | 000       | 400       |

Fonte: Baquero (2012)

Tabela 16 - Dados de condutores do sistema de 54 barras

| Tipo Conductor | Capacidade (A) | Resistência ( $\Omega$ /Km) | Reatância ( $\Omega$ /Km) | Custo (R\$/Km) |
|----------------|----------------|-----------------------------|---------------------------|----------------|
| 1              | 150            | 0,3655                      | 0,2520                    | 20000          |
| 2              | 200            | 0,2921                      | 0,2466                    | 30000          |
| 3              | 250            | 0,2359                      | 0,2402                    | 40000          |
| 4              | 300            | 0,1932                      | 0,2279                    | 50000          |
| 5              | 350            | 0,1827                      | 0,1260                    | 60000          |
| 6              | 400            | 0,1460                      | 0,1233                    | 70000          |
| 7              | 500            | 0,1180                      | 0,1201                    | 80000          |
| 8              | 600            | 0,0966                      | 0,1140                    | 90000          |

Fonte: Baquero (2012)

Tabela 17 - Dados das SE's existentes do sistema de 54 barras

| Barra | Capacidade Inicial (MVA) | Capacidade Proposta (MVA) | Custo de expansão ( $10^3$ R\$) |
|-------|--------------------------|---------------------------|---------------------------------|
| 51    | 16,70                    | 33,4                      | 1000                            |
| 52    | 16,70                    | 33,4                      | 1000                            |

Fonte: Baquero (2012)

Tabela 18 - Dados das SE's existentes do sistema de 54 barras

| Barra | Capacidade Alternativa 1 (MVA) | Capacidade Alternativa 2 (MVA) | Custo de construção Alternativa 1 (10 <sup>3</sup> R\$) | Custo de construção Alternativa 2 (10 <sup>3</sup> R\$) |
|-------|--------------------------------|--------------------------------|---|---|
| 53    | 22,00                          | 30,00                          | 2000  | 3000  |
| 54    | 22,00                          | 30,00                          | 2400  | 3400  |

Fonte: Baquero (2012)

Tabela 19 - Custo com recondutoramento (103 R\$) - Sistema de 54 Barras

| Tipo condutor | 1 | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  |
|---------------|---|----|----|----|----|----|----|----|
| 1             | 0 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 |
| 2             | 0 | 0  | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 |
| 3             | 0 | 0  | 0  | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 |
| 4             | 0 | 0  | 0  | 0  | 60 | 70 | 80 | 90 |
| 5             | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 70 | 80 | 90 |
| 6             | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 80 | 90 |
| 7             | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 90 |
| 8             | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |

Fonte: Baquero (2012)

### ANEXO III - Dados do Sistema de 23 Barras.

Tabela 20 - Dados de ramo do sistema de 23 barras

| Barra<br><i>i</i> | $S_{D_i}$<br>(KVA) | Barra<br><i>i</i> | $S_{D_i}$<br>(KVA) |
|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|
| 1                 | 0,0                | 13                | 320,0              |
| 2                 | 0,0                | 14                | 320,0              |
| 3                 | 640,0              | 15                | 320,0              |
| 4                 | 320,0              | 16                | 320,0              |
| 5                 | 320,0              | 17                | 320,0              |
| 6                 | 320,0              | 18                | 320,0              |
| 7                 | 320,0              | 19                | 320,0              |
| 8                 | 320,0              | 20                | 320,0              |
| 9                 | 320,0              | 21                | 320,0              |
| 10                | 320,0              | 22                | 320,0              |
| 11                | 320,0              | 23                | 320,0              |
| 12                | 320,0              | -                 | -                  |

Fonte: Oliveira (2010)

Tabela 21 - Dados de ramo do sistema de 23 barras

| circuito | Barra<br><i>i</i> | Barra<br><i>j</i> | $l_{ij}$<br>(km) | $t_{co}$ | circuito | Barra<br><i>i</i> | Barra<br><i>j</i> | $l_{ij}$<br>(km) | $t_{co}$ |
|----------|-------------------|-------------------|------------------|----------|----------|-------------------|-------------------|------------------|----------|
| 1        | 1                 | 10                | 0,20209          | 0        | 19       | 10                | 20                | 0,69728          | 0        |
| 2        | 2                 | 8                 | 0,075604         | 0        | 20       | 11                | 13                | 0,50527          | 0        |
| 3        | 3                 | 8                 | 2,7079           | 0        | 21       | 11                | 21                | 0,63941          | 0        |
| 4        | 3                 | 9                 | 1,8202           | 0        | 22       | 11                | 22                | 0,69245          | 0        |
| 5        | 3                 | 16                | 4,2237           | 0        | 23       | 12                | 15                | 0,98085          | 0        |
| 6        | 4                 | 5                 | 0,9402           | 0        | 24       | 12                | 23                | 0,67855          | 0        |
| 7        | 4                 | 6                 | 1,5017           | 0        | 25       | 13                | 15                | 0,62291          | 0        |
| 8        | 4                 | 8                 | 2,3053           | 0        | 26       | 14                | 17                | 0,44821          | 0        |
| 9        | 4                 | 9                 | 3,4479           | 0        | 27       | 14                | 23                | 0,48604          | 0        |
| 10       | 5                 | 14                | 1,0162           | 0        | 28       | 15                | 18                | 0,57114          | 0        |
| 11       | 5                 | 23                | 0,64091          | 0        | 29       | 15                | 21                | 0,60687          | 0        |
| 12       | 6                 | 7                 | 0,81807          | 0        | 30       | 16                | 20                | 0,50185          | 0        |
| 13       | 6                 | 14                | 0,81772          | 0        | 31       | 16                | 22                | 0,94829          | 0        |
| 14       | 6                 | 16                | 1,1752           | 0        | 32       | 17                | 18                | 0,44113          | 0        |
| 15       | 7                 | 8                 | 0,68661          | 0        | 33       | 19                | 20                | 0,73027          | 0        |
| 16       | 8                 | 9                 | 2,0567           | 0        | 34       | 19                | 21                | 0,555            | 0        |
| 17       | 10                | 14                | 0,42971          | 0        | 35       | 19                | 22                | 0,58266          | 0        |
| 18       | 10                | 19                | 0,59489          | 0        | -        | -                 | -                 | -                | -        |

Fonte: Oliveira (2010)

Tabela 22 - Dados de condutores do sistema de 23 barras

| <b>Tipo</b> | <b>Capacidade<br/>(A)</b> | <b>Resistência<br/>(<math>\Omega</math>/Km)</b> | <b>Reatância<br/>(<math>\Omega</math>/Km)</b> | <b>Custo<br/>(US\$/Km)</b> |
|-------------|---------------------------|---|---|----------------------------|
| 1           | 230                       | 0,6045  | 0,429   | 10000                      |
| 4           | 340                       | 0,3017  | 0,402   | 40000                      |

Fonte: Oliveira (2010)

Tabela 23 - Dados de Dados de subestação existente do sistema de 23 barras

| <b>Barra</b> | <b>Capacidade<br/>Inicial<br/>(MVA)</b> | <b>Capacidade<br/>Proposta<br/>(MVA)</b> | <b>Custo de<br/>expansão<br/>(US\$)</b> |
|--------------|---|--|---|
| 1            | 10,00                                   | —  | —                                       |

Fonte: Oliveira (2010)

Tabela 24 - Dados de ramo do sistema de 23 barras

| <b>Barra</b> | <b>Capacidade<br/>Inicial<br/>(MVA)</b> | <b>Capacidade<br/>Proposta<br/>(MVA)</b> | <b>Custo de<br/>expansão<br/>(US\$)</b> |
|--------------|---|--|---|
| 1            | 4,00                                    | —  | —                                       |

Fonte: Oliveira (2010)

**ANEXO IV - Dados do Sistema de 136 Barras.**

Tabela 25 - Dados de barra do sistema de 136 barras

| (continua) |           |           |          |           |           |          |           |           |
|------------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|
| Barra      | $P_{D_i}$ | $Q_{D_i}$ | Barra    | $P_{D_i}$ | $Q_{D_i}$ | Barra    | $P_{D_i}$ | $Q_{D_i}$ |
| <i>i</i>   | (kW)      | (KVAr)    | <i>i</i> | (kW)      | (KVAr)    | <i>i</i> | (kW)      | (KVAr)    |
| 201        | 0,0000    | 0,0000    | 39       | 75,3160   | 36,8210   | 78       | 142,5200  | 60,4170   |
| 202        | 0,0000    | 0,0000    | 40       | 0,0000    | 0,0000    | 79       | 96,0420   | 40,7130   |
| 2          | 0,0000    | 0,0000    | 41       | 1,2540    | 0,5310    | 80       | 300,4500  | 127,3700  |
| 3          | 47,7800   | 19,0090   | 42       | 6,2740    | 2,6600    | 81       | 141,2400  | 59,8730   |
| 4          | 42,5510   | 16,9290   | 43       | 0,0000    | 0,0000    | 82       | 279,8500  | 118,6300  |
| 5          | 87,0220   | 34,6220   | 44       | 117,8800  | 49,9710   | 83       | 87,3120   | 37,0130   |
| 6          | 311,3100  | 123,8600  | 45       | 62,6680   | 25,5660   | 84       | 243,8500  | 103,3700  |
| 7          | 148,8700  | 59,2280   | 46       | 172,2900  | 73,0340   | 85       | 247,7500  | 105,0300  |
| 8          | 238,6700  | 94,9560   | 47       | 458,5600  | 194,3900  | 86       | 0,0000    | 0,0000    |
| 9          | 62,2990   | 24,7860   | 48       | 262,9600  | 111,4700  | 87       | 89,8780   | 38,1010   |
| 10         | 124,5900  | 49,5710   | 49       | 235,7600  | 99,9420   | 88       | 1137,3000 | 482,1100  |
| 11         | 140,1600  | 55,7680   | 50       | 0,0000    | 0,0000    | 89       | 458,3400  | 194,3000  |
| 12         | 116,8100  | 46,4740   | 51       | 109,2200  | 46,2980   | 90       | 385,2000  | 163,2900  |
| 13         | 249,2000  | 99,1450   | 52       | 0,0000    | 0,0000    | 91       | 0,0000    | 0,0000    |
| 14         | 291,4500  | 115,5900  | 53       | 72,8090   | 30,8650   | 92       | 79,6080   | 33,7470   |
| 15         | 303,7200  | 120,8400  | 54       | 258,4700  | 109,5700  | 93       | 87,3120   | 37,0130   |
| 16         | 215,3900  | 85,6950   | 55       | 69,1690   | 29,3220   | 94       | 0,0000    | 0,0000    |
| 17         | 198,5900  | 79,0070   | 56       | 21,8430   | 9,2600    | 95       | 74,0010   | 31,3700   |
| 18         | 0,0000    | 0,0000    | 57       | 0,0000    | 0,0000    | 96       | 232,0500  | 98,3690   |
| 19         | 0,0000    | 0,0000    | 58       | 20,5270   | 8,7020    | 97       | 141,8200  | 60,1190   |
| 20         | 0,0000    | 0,0000    | 59       | 150,5500  | 63,8190   | 98       | 0,0000    | 0,0000    |
| 21         | 30,1270   | 14,7290   | 60       | 220,6900  | 93,5520   | 99       | 76,4490   | 32,4080   |
| 22         | 230,9700  | 112,9200  | 61       | 92,3840   | 39,1630   | 100      | 0,0000    | 0,0000    |
| 23         | 60,2560   | 29,4590   | 62       | 0,0000    | 0,0000    | 101      | 51,3220   | 21,7560   |
| 24         | 230,9700  | 112,9200  | 63       | 226,6900  | 96,0980   | 102      | 59,8740   | 25,3810   |
| 25         | 120,5100  | 58,9150   | 64       | 0,0000    | 0,0000    | 103      | 9,0650    | 3,8430    |
| 26         | 0,0000    | 0,0000    | 65       | 294,0200  | 116,9700  | 104      | 2,0920    | 0,8870    |
| 27         | 56,9810   | 27,8570   | 66       | 83,0150   | 33,0280   | 105      | 16,7350   | 7,0940    |
| 28         | 364,6700  | 178,2800  | 67       | 83,0150   | 33,0280   | 106      | 1506,5000 | 638,6300  |
| 29         | 0,0000    | 0,0000    | 68       | 103,7700  | 41,2850   | 107      | 313,0200  | 132,6900  |
| 30         | 124,6500  | 60,9390   | 69       | 176,4100  | 70,1840   | 108      | 79,8310   | 33,8420   |
| 31         | 56,9810   | 27,8570   | 70       | 83,0150   | 33,0280   | 109      | 51,3220   | 21,7560   |
| 32         | 0,0000    | 0,0000    | 71       | 217,9200  | 86,6980   | 110      | 0,0000    | 0,0000    |
| 33         | 85,4730   | 41,7870   | 72       | 23,2940   | 9,2670    | 111      | 202,4400  | 85,8150   |
| 34         | 0,0000    | 0,0000    | 73       | 5,0750    | 2,0190    | 112      | 60,8230   | 25,8740   |
| 35         | 396,7400  | 193,9600  | 74       | 72,6380   | 28,8990   | 113      | 45,6180   | 19,3380   |
| 36         | 0,0000    | 0,0000    | 75       | 405,9900  | 161,5200  | 114      | 0,0000    | 0,0000    |
| 37         | 181,1500  | 88,5630   | 76       | 0,0000    | 0,0000    | 115      | 157,0700  | 66,5840   |
| 38         | 242,1700  | 118,3900  | 77       | 100,1800  | 42,4680   | 116      | 0,0000    | 0,0000    |

Tabela 26 - Dados de ramo do sistema de 136 barras

| (continua) |          |                          |                          |                  |          |          |          |                          |                          |                  |        |
|------------|----------|--------------------------|--------------------------|------------------|----------|----------|----------|--------------------------|--------------------------|------------------|--------|
| Circuito   |          |                          |                          |                  | Circuito |          |          |                          |                          |                  |        |
| <i>i</i>   | <i>j</i> | $R_{ij}$<br>( $\Omega$ ) | $X_{ij}$<br>( $\Omega$ ) | $l_{ij}$<br>(km) | $tc_m$   | <i>i</i> | <i>j</i> | $R_{ij}$<br>( $\Omega$ ) | $X_{ij}$<br>( $\Omega$ ) | $l_{ij}$<br>(km) | $tc_m$ |
| 201        | 2        | 0,56831                  | 0,49573                  | 0,83536          | 1        | 29       | 32       | 0,06027                  | 0,05257                  | 0,08019          | 1      |
| 2          | 3        | 0,00323                  | 0,00282                  | 0,00472          | 1        | 32       | 33       | 0,07850                  | 0,06848                  | 0,10708          | 1      |
| 3          | 4        | 0,38218                  | 0,33337                  | 0,56169          | 1        | 33       | 34       | 0,34547                  | 0,30135                  | 0,47116          | 1      |
| 4          | 5        | 0,17015                  | 0,14842                  | 0,25014          | 1        | 34       | 35       | 0,09423                  | 0,08220                  | 0,12849          | 1      |
| 5          | 6        | 0,26649                  | 0,23245                  | 0,39173          | 1        | 32       | 36       | 0,08036                  | 0,07009                  | 0,10692          | 1      |
| 6          | 7        | 0,27931                  | 0,24364                  | 0,41060          | 1        | 36       | 37       | 0,30618                  | 0,26708                  | 0,41762          | 1      |
| 7          | 8        | 0,19589                  | 0,17087                  | 0,28789          | 1        | 37       | 38       | 0,21985                  | 0,19177                  | 0,29983          | 1      |
| 7          | 9        | 0,06027                  | 0,05257                  | 0,08019          | 1        | 36       | 39       | 0,06027                  | 0,05257                  | 0,08015          | 1      |
| 9          | 10       | 0,43180                  | 0,37665                  | 0,58895          | 1        | 201      | 40       | 0,56831                  | 0,49573                  | 0,83536          | 1      |
| 9          | 11       | 0,11553                  | 0,10078                  | 0,15370          | 1        | 40       | 41       | 0,20226                  | 0,17643                  | 0,29733          | 1      |
| 11         | 12       | 0,32974                  | 0,28763                  | 0,44974          | 1        | 41       | 42       | 2,18602                  | 1,90684                  | 3,13230          | 1      |
| 11         | 13       | 0,67691                  | 0,59045                  | 0,96991          | 1        | 41       | 43       | 0,00323                  | 0,00282                  | 0,00472          | 1      |
| 11         | 14       | 0,12562                  | 0,10958                  | 0,16708          | 1        | 43       | 44       | 0,11876                  | 0,10359                  | 0,17463          | 1      |
| 14         | 15       | 0,41615                  | 0,36300                  | 0,56753          | 1        | 44       | 45       | 0,67521                  | 0,58898                  | 0,92090          | 1      |
| 14         | 16       | 0,06027                  | 0,05257                  | 0,08019          | 1        | 44       | 46       | 0,10916                  | 0,09522                  | 0,16046          | 1      |
| 16         | 17       | 0,24341                  | 0,21232                  | 0,33196          | 1        | 46       | 47       | 0,22477                  | 0,19607                  | 0,33037          | 1      |
| 201        | 18       | 0,56831                  | 0,49573                  | 0,83536          | 1        | 47       | 48       | 0,10593                  | 0,09240                  | 0,15574          | 1      |
| 18         | 19       | 0,00323                  | 0,00282                  | 0,00472          | 1        | 48       | 49       | 0,19589                  | 0,17087                  | 0,28789          | 1      |
| 19         | 20       | 0,38210                  | 0,33330                  | 0,56162          | 1        | 49       | 50       | 0,30150                  | 0,26300                  | 0,40097          | 1      |
| 20         | 21       | 0,18621                  | 0,16243                  | 0,27374          | 1        | 50       | 51       | 0,30142                  | 0,26292                  | 0,40089          | 1      |
| 21         | 22       | 0,58888                  | 0,51367                  | 0,80312          | 1        | 49       | 52       | 0,07705                  | 0,06721                  | 0,11327          | 1      |
| 21         | 23       | 0,31142                  | 0,27165                  | 0,45780          | 1        | 52       | 53       | 0,04494                  | 0,03920                  | 0,06607          | 1      |
| 23         | 24       | 0,25124                  | 0,21915                  | 0,34266          | 1        | 53       | 54       | 0,10271                  | 0,08959                  | 0,15102          | 1      |
| 23         | 25       | 0,04171                  | 0,03638                  | 0,06135          | 1        | 54       | 55       | 0,05139                  | 0,04483                  | 0,07551          | 1      |
| 25         | 26       | 0,07705                  | 0,06721                  | 0,11327          | 1        | 55       | 56       | 0,03534                  | 0,03082                  | 0,05191          | 1      |
| 26         | 27       | 0,03211                  | 0,02801                  | 0,04719          | 1        | 53       | 57       | 0,18621                  | 0,16243                  | 0,27374          | 1      |
| 27         | 28       | 0,12279                  | 0,10711                  | 0,16306          | 1        | 57       | 58       | 0,21203                  | 0,18495                  | 0,28912          | 1      |
| 28         | 29       | 0,02509                  | 0,02189                  | 0,03341          | 1        | 58       | 59       | 0,34547                  | 0,30135                  | 0,47116          | 1      |
| 29         | 30       | 0,15700                  | 0,13695                  | 0,21416          | 1        | 59       | 60       | 0,41615                  | 0,36300                  | 0,56753          | 1      |
| 30         | 31       | 0,32974                  | 0,28763                  | 0,44974          | 1        | 60       | 61       | 0,27480                  | 0,23970                  | 0,37479          | 1      |

|          |     |              |              |          |           |          |     |              |              | (conclusão) |           |
|----------|-----|--------------|--------------|----------|-----------|----------|-----|--------------|--------------|-------------|-----------|
| Circuito |     | $R_{ij}$     | $X_{ij}$     | $l_{ij}$ | $tc_{in}$ | Circuito |     | $R_{ij}$     | $X_{ij}$     | $l_{ij}$    | $tc_{in}$ |
| $i$      | $j$ | ( $\Omega$ ) | ( $\Omega$ ) | (km)     |           | $i$      | $j$ | ( $\Omega$ ) | ( $\Omega$ ) | (km)        |           |
| 61       | 62  | 0,17274      | 0,15068      | 0,23558  | 1         | 106      | 107 | 0,24591      | 0,21451      | 0,33280     | 1         |
| 48       | 63  | 0,23760      | 0,20726      | 0,34924  | 1         | 107      | 108 | 0,25866      | 0,22563      | 0,35001     | 1         |
| 202      | 64  | 0,01283      | 0,01119      | 0,01887  | 1         | 108      | 109 | 0,45536      | 0,39720      | 0,62108     | 1         |
| 64       | 65  | 0,46230      | 0,40325      | 0,67962  | 1         | 109      | 110 | 0,44753      | 0,39038      | 0,61037     | 1         |
| 65       | 66  | 0,65496      | 0,57131      | 0,96279  | 1         | 108      | 111 | 0,05510      | 0,04807      | 0,07459     | 1         |
| 66       | 67  | 0,56508      | 0,49291      | 0,83064  | 1         | 111      | 112 | 0,39259      | 0,34245      | 0,53541     | 1         |
| 67       | 68  | 0,56186      | 0,49010      | 0,82592  | 1         | 112      | 113 | 0,71450      | 0,62325      | 0,97444     | 1         |
| 68       | 69  | 0,29214      | 0,25483      | 0,42948  | 1         | 113      | 114 | 0,47109      | 0,41093      | 0,64249     | 1         |
| 69       | 70  | 0,46326      | 0,40410      | 0,63178  | 1         | 109      | 115 | 0,64383      | 0,56160      | 0,87807     | 1         |
| 69       | 71  | 0,09956      | 0,08684      | 0,14631  | 1         | 115      | 116 | 0,89506      | 0,78075      | 1,22070     | 1         |
| 71       | 72  | 0,58098      | 0,50678      | 0,79241  | 1         | 110      | 117 | 0,891998     | 0,77808      | 1,21300     | 1         |
| 72       | 73  | 0,84795      | 0,73965      | 1,15650  | 1         | 117      | 118 | 0,39259      | 0,34245      | 0,53541     | 1         |
| 71       | 74  | 0,11561      | 0,10085      | 0,16991  | 1         | 105      | 119 | 0,55225      | 0,48172      | 0,81176     | 1         |
| 74       | 75  | 0,97647      | 0,85176      | 1,39920  | 1         | 119      | 120 | 0,25043      | 0,21845      | 0,36812     | 1         |
| 202      | 76  | 0,01928      | 0,01682      | 0,02831  | 1         | 120      | 121 | 0,21195      | 0,18488      | 0,31150     | 1         |
| 76       | 77  | 1,24893      | 1,08942      | 1,83590  | 1         | 202      | 122 | 0,01928      | 0,01682      | 0,02831     | 1         |
| 77       | 78  | 0,38525      | 0,33605      | 0,56634  | 1         | 122      | 123 | 1,11088      | 0,96901      | 1,63300     | 1         |
| 78       | 79  | 0,35636      | 0,31085      | 0,52388  | 1         | 123      | 124 | 0,07705      | 0,06721      | 0,11327     | 1         |
| 79       | 80  | 0,08028      | 0,07002      | 0,11799  | 1         | 124      | 125 | 0,38839      | 0,33879      | 0,55651     | 1         |
| 80       | 81  | 0,65827      | 0,57420      | 0,87545  | 1         | 124      | 126 | 0,03534      | 0,03082      | 0,05191     | 1         |
| 81       | 82  | 0,36177      | 0,31557      | 0,48117  | 1         | 126      | 127 | 0,43971      | 0,38355      | 0,59966     | 1         |
| 82       | 83  | 0,47109      | 0,41093      | 0,64249  | 1         | 126      | 128 | 0,16693      | 0,14561      | 0,24542     | 1         |
| 82       | 84  | 0,11553      | 0,10078      | 0,15370  | 1         | 128      | 129 | 0,20226      | 0,17643      | 0,29733     | 1         |
| 84       | 85  | 0,47109      | 0,41093      | 0,64249  | 1         | 128      | 130 | 0,23760      | 0,20726      | 0,34924     | 1         |
| 202      | 86  | 0,01928      | 0,01682      | 0,02831  | 1         | 130      | 131 | 0,07382      | 0,06439      | 0,10855     | 1         |
| 86       | 87  | 0,71595      | 0,62452      | 1,05250  | 1         | 131      | 132 | 0,15733      | 0,13723      | 0,23125     | 1         |
| 87       | 88  | 0,12723      | 0,11098      | 0,17214  | 1         | 132      | 133 | 0,27609      | 0,24083      | 0,40588     | 1         |
| 87       | 89  | 0,75129      | 0,65534      | 1,10440  | 1         | 133      | 134 | 0,40195      | 0,35061      | 0,53462     | 1         |
| 89       | 90  | 0,05551      | 0,04842      | 0,07949  | 1         | 134      | 135 | 0,42204      | 0,36814      | 0,56136     | 1         |
| 90       | 91  | 0,13167      | 0,11485      | 0,19351  | 1         | 135      | 136 | 0,31151      | 0,27172      | 0,41434     | 1         |
| 91       | 92  | 0,56831      | 0,49573      | 0,83536  | 1         | 12       | 75  | 0,14522      | 0,12668      | 0,18000     | 0         |
| 92       | 93  | 0,14450      | 0,12604      | 0,21238  | 1         | 16       | 75  | 0,11295      | 0,09853      | 0,14000     | 0         |
| 93       | 94  | 0,22792      | 0,19881      | 0,33509  | 1         | 16       | 85  | 0,14522      | 0,12668      | 0,18000     | 0         |
| 94       | 95  | 0,31151      | 0,27172      | 0,41434  | 1         | 17       | 85  | 0,15329      | 0,13371      | 0,19000     | 0         |
| 95       | 96  | 0,23115      | 0,20163      | 0,30741  | 1         | 31       | 136 | 0,12102      | 0,10556      | 0,15000     | 0         |
| 96       | 97  | 0,28141      | 0,24547      | 0,37424  | 1         | 39       | 136 | 0,08875      | 0,07741      | 0,11000     | 0         |
| 94       | 98  | 0,17661      | 0,15405      | 0,25958  | 1         | 38       | 99  | 0,08875      | 0,07741      | 0,11000     | 0         |
| 98       | 99  | 0,23115      | 0,20163      | 0,33981  | 1         | 56       | 99  | 0,11295      | 0,09853      | 0,14000     | 0         |
| 202      | 100 | 0,01606      | 0,01400      | 0,02359  | 1         | 62       | 99  | 0,12102      | 0,10556      | 0,15000     | 0         |
| 100      | 101 | 0,28900      | 0,25209      | 0,42476  | 1         | 62       | 97  | 0,16136      | 0,14075      | 0,20000     | 0         |
| 101      | 102 | 0,20226      | 0,17643      | 0,29733  | 1         | 51       | 97  | 0,24204      | 0,21113      | 0,30000     | 0         |
| 102      | 103 | 1,68670      | 1,47128      | 2,41680  | 1         | 45       | 114 | 0,16136      | 0,14075      | 0,20000     | 0         |
| 102      | 104 | 0,78018      | 0,68054      | 1,14690  | 1         | 45       | 118 | 0,24204      | 0,21113      | 0,30000     | 0         |
| 104      | 105 | 1,19116      | 1,03903      | 1,75100  | 1         | 63       | 108 | 0,08068      | 0,07038      | 0,10000     | 0         |
| 105      | 106 | 0,78340      | 0,68335      | 1,15160  | 1         |          |     |              |              |             |           |

Tabela 27 - Dados de ramo do sistema de 136 barras

| <b>Tipo</b> | <b>Capacidade<br/>(A)</b> | <b>Resistência<br/>(<math>\Omega</math>/Km)</b> | <b>Reatância<br/>(<math>\Omega</math>/Km)</b> | <b>Custo<br/>(US\$/Km)</b> |
|-------------|---------------------------|---|---|----------------------------|
| 1           | 999                       | 0,80680   | 0,70376                                       | 4000                       |

Fonte: Oliveira (2010)

Tabela 28 - Dados dos condutores do sistema de 136 barras

| <b>Tipo</b> | <b>Capacidade<br/>(A)</b> | <b>Resistência<br/>(<math>\Omega</math>/Km)</b> | <b>Reatância<br/>(<math>\Omega</math>/Km)</b> | <b>Custo<br/>(US\$/Km)</b> |
|-------------|---------------------------|---|---|----------------------------|
| 1           | 999                       | 0,80680   | 0,70376                                       | 4000                       |

Fonte: Oliveira (2010)

Tabela 29 - Dados das subestações existentes do sistema de 136 barras

| <b>Barra</b> | <b>Capacidade<br/>Inicial<br/>(MVA)</b> | <b>Capacidade<br/>Proposta<br/>(MVA)</b> | <b>Custo de<br/>expansão<br/>(US\$)</b> |
|--------------|---|--|---|
| 201          | 15,00                                   | -  | -                                       |
| 202          | 10,00                                   | -  | -                                       |

Fonte: Oliveira (2010)

**ANEXO V - Dados do Sistema de 417 Barras.**

Tabela 30 - Dados de Barra do sistema de 417 barras

| (continua)        |                  |                    |                  |                    |                  |                    |
|-------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|
| Barra<br><i>i</i> | $P_{1i}$<br>(kW) | $Q_{1i}$<br>(KVAr) | $P_{2i}$<br>(kW) | $Q_{2i}$<br>(KVAr) | $P_{3i}$<br>(kW) | $Q_{3i}$<br>(KVAr) |
| 1                 | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 2                 | 73,2             | 35,4               | 97,6             | 47,2               | 122              | 59                 |
| 3                 | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 4                 | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 5                 | 68,4             | 33                 | 91,2             | 44                 | 114              | 55                 |
| 6                 | 30,6             | 15                 | 40,8             | 20                 | 51               | 25                 |
| 7                 | 49,8             | 24                 | 66,4             | 32                 | 83               | 40                 |
| 8                 | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 9                 | 73,2             | 35,4               | 97,6             | 47,2               | 122              | 59                 |
| 10                | 73,2             | 35,4               | 97,6             | 47,2               | 122              | 59                 |
| 11                | 46,2             | 22,2               | 61,6             | 29,6               | 77               | 37                 |
| 12                | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 13                | 40,8             | 19,8               | 54,4             | 26,4               | 68               | 33                 |
| 14                | 42,6             | 20,4               | 56,8             | 27,2               | 71               | 34                 |
| 15                | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 16                | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 17                | 46,2             | 22,2               | 61,6             | 29,6               | 77               | 37                 |
| 18                | 18               | 8,4                | 24               | 11,2               | 30               | 14                 |
| 19                | 7,8              | 3,6                | 10,4             | 4,8                | 13               | 6                  |
| 20                | 0,6              | 0                  | 0,8              | 0                  | 1                | 0                  |
| 21                | 116,4            | 56,4               | 155,2            | 75,2               | 194              | 94                 |
| 22                | 46,2             | 22,2               | 61,6             | 29,6               | 77               | 37                 |
| 23                | 46,2             | 22,2               | 61,6             | 29,6               | 77               | 37                 |
| 24                | 46,2             | 22,2               | 61,6             | 29,6               | 77               | 37                 |
| 25                | 73,2             | 35,4               | 97,6             | 47,2               | 122              | 59                 |
| 26                | 62,4             | 30,6               | 83,2             | 40,8               | 104              | 51                 |
| 27                | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 28                | 46,2             | 22,2               | 61,6             | 29,6               | 77               | 37                 |
| 29                | 145,8            | 70,8               | 194,4            | 94,4               | 243              | 118                |
| 30                | 46,2             | 22,2               | 61,6             | 29,6               | 77               | 37                 |
| 31                | 46,2             | 22,2               | 61,6             | 29,6               | 77               | 37                 |
| 32                | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 33                | 72,6             | 34,8               | 96,8             | 46,4               | 121              | 58                 |
| 34                | 116,4            | 56,4               | 155,2            | 75,2               | 194              | 94                 |
| 35                | 73,2             | 35,4               | 97,6             | 47,2               | 122              | 59                 |
| 36                | 46,2             | 22,2               | 61,6             | 29,6               | 77               | 37                 |
| 37                | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 38                | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 39                | 57,6             | 28,2               | 76,8             | 37,6               | 96               | 47                 |

| (continuação)     |                  |                    |                  |                    |                  |                    |
|-------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|
| Barra<br><i>i</i> | $P_{1i}$<br>(kW) | $Q_{1i}$<br>(KVAr) | $P_{2i}$<br>(kW) | $Q_{2i}$<br>(KVAr) | $P_{3i}$<br>(kW) | $Q_{3i}$<br>(KVAr) |
| 40                | 73,2             | 35,4               | 97,6             | 47,2               | 122              | 59                 |
| 41                | 42               | 20,4               | 56               | 27,2               | 70               | 34                 |
| 42                | 34,8             | 16,8               | 46,4             | 22,4               | 58               | 28                 |
| 43                | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 44                | 73,2             | 35,4               | 97,6             | 47,2               | 122              | 59                 |
| 45                | 73,2             | 35,4               | 97,6             | 47,2               | 122              | 59                 |
| 46                | 73,2             | 35,4               | 97,6             | 47,2               | 122              | 59                 |
| 47                | 51,6             | 25,2               | 68,8             | 33,6               | 86               | 42                 |
| 48                | 46,2             | 22,2               | 61,6             | 29,6               | 77               | 37                 |
| 49                | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 50                | 73,2             | 35,4               | 97,6             | 47,2               | 122              | 59                 |
| 51                | 73,2             | 35,4               | 97,6             | 47,2               | 122              | 59                 |
| 52                | 73,2             | 35,4               | 97,6             | 47,2               | 122              | 59                 |
| 53                | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 54                | 25,2             | 12                 | 33,6             | 16                 | 42               | 20                 |
| 55                | 73,2             | 35,4               | 97,6             | 47,2               | 122              | 59                 |
| 56                | 7,8              | 3,6                | 10,4             | 4,8                | 13               | 6                  |
| 57                | 46,2             | 22,2               | 61,6             | 29,6               | 77               | 37                 |
| 58                | 30               | 14,4               | 40               | 19,2               | 50               | 24                 |
| 59                | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 60                | 36               | 17,4               | 48               | 23,2               | 60               | 29                 |
| 61                | 42,6             | 20,4               | 56,8             | 27,2               | 71               | 34                 |
| 62                | 73,2             | 35,4               | 97,6             | 47,2               | 122              | 59                 |
| 63                | 46,2             | 22,2               | 61,6             | 29,6               | 77               | 37                 |
| 64                | 57               | 27,6               | 76               | 36,8               | 95               | 46                 |
| 65                | 72,6             | 34,8               | 96,8             | 46,4               | 121              | 58                 |
| 66                | 46,2             | 22,2               | 61,6             | 29,6               | 77               | 37                 |
| 67                | 61,8             | 30                 | 82,4             | 40                 | 103              | 50                 |
| 68                | 31,2             | 15                 | 41,6             | 20                 | 52               | 25                 |
| 69                | 34,2             | 16,2               | 45,6             | 21,6               | 57               | 27                 |
| 70                | 102,6            | 49,8               | 136,8            | 66,4               | 171              | 83                 |
| 71                | 72,6             | 34,8               | 96,8             | 46,4               | 121              | 58                 |
| 72                | 23,4             | 11,4               | 31,2             | 15,2               | 39               | 19                 |
| 73                | 71,4             | 34,8               | 95,2             | 46,4               | 119              | 58                 |
| 74                | 29,4             | 14,4               | 39,2             | 19,2               | 49               | 24                 |
| 75                | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 76                | 30               | 14,4               | 40               | 19,2               | 50               | 24                 |
| 77                | 26,4             | 12,6               | 35,2             | 16,8               | 44               | 21                 |
| 78                | 49,2             | 24                 | 65,6             | 32                 | 82               | 40                 |
| 79                | 79,2             | 38,4               | 105,6            | 51,2               | 132              | 64                 |
| 80                | 116,4            | 56,4               | 155,2            | 75,2               | 194              | 94                 |
| 81                | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 82                | 73,2             | 35,4               | 97,6             | 47,2               | 122              | 59                 |
| 83                | 1,8              | 0,6                | 2,4              | 0,8                | 3                | 1                  |

| (continuação)     |                  |                    |                  |                    |                  |                    |
|-------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|
| Barra<br><i>i</i> | $P_{1i}$<br>(kW) | $Q_{1i}$<br>(KVAr) | $P_{2i}$<br>(kW) | $Q_{2i}$<br>(KVAr) | $P_{3i}$<br>(kW) | $Q_{3i}$<br>(KVAr) |
| 84                | 31,2             | 15                 | 41,6             | 20                 | 52               | 25                 |
| 85                | 61,8             | 30                 | 82,4             | 40                 | 103              | 50                 |
| 86                | 12,6             | 6                  | 16,8             | 8                  | 21               | 10                 |
| 87                | 12,6             | 6                  | 16,8             | 8                  | 21               | 10                 |
| 88                | 12,6             | 6                  | 16,8             | 8                  | 21               | 10                 |
| 89                | 3                | 1,8                | 4                | 2,4                | 5                | 3                  |
| 90                | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 91                | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 92                | 12,6             | 6                  | 16,8             | 8                  | 21               | 10                 |
| 93                | 10,8             | 5,4                | 14,4             | 7,2                | 18               | 9                  |
| 94                | 73,2             | 35,4               | 97,6             | 47,2               | 122              | 59                 |
| 95                | 69,6             | 33,6               | 92,8             | 44,8               | 116              | 56                 |
| 96                | 4,2              | 1,8                | 5,6              | 2,4                | 7                | 3                  |
| 97                | 38,4             | 18,6               | 51,2             | 24,8               | 64               | 31                 |
| 98                | 29,4             | 14,4               | 39,2             | 19,2               | 49               | 24                 |
| 99                | 9,6              | 4,8                | 12,8             | 6,4                | 16               | 8                  |
| 100               | 46,2             | 22,2               | 61,6             | 29,6               | 77               | 37                 |
| 101               | 71,4             | 34,8               | 95,2             | 46,4               | 119              | 58                 |
| 102               | 42,6             | 20,4               | 56,8             | 27,2               | 71               | 34                 |
| 103               | 46,2             | 22,2               | 61,6             | 29,6               | 77               | 37                 |
| 104               | 116,4            | 56,4               | 155,2            | 75,2               | 194              | 94                 |
| 105               | 73,2             | 35,4               | 97,6             | 47,2               | 122              | 59                 |
| 106               | 33               | 16,2               | 44               | 21,6               | 55               | 27                 |
| 107               | 22,8             | 10,8               | 30,4             | 14,4               | 38               | 18                 |
| 108               | 13,2             | 6                  | 17,6             | 8                  | 22               | 10                 |
| 109               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 110               | 46,2             | 22,2               | 61,6             | 29,6               | 77               | 37                 |
| 111               | 73,2             | 35,4               | 97,6             | 47,2               | 122              | 59                 |
| 112               | 22,8             | 10,8               | 30,4             | 14,4               | 38               | 18                 |
| 113               | 73,2             | 35,4               | 97,6             | 47,2               | 122              | 59                 |
| 114               | 16,2             | 7,8                | 21,6             | 10,4               | 27               | 13                 |
| 115               | 38,4             | 18,6               | 51,2             | 24,8               | 64               | 31                 |
| 116               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 117               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 118               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 119               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 120               | 47,4             | 22,8               | 63,2             | 30,4               | 79               | 38                 |
| 121               | 148,2            | 71,4               | 197,6            | 95,2               | 247              | 119                |
| 122               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 123               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 124               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 125               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 126               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |

| (continuação)     |                  |                    |                  |                    |                  |                    |
|-------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|
| Barra<br><i>i</i> | $P_{1i}$<br>(kW) | $Q_{1i}$<br>(KVAr) | $P_{2i}$<br>(kW) | $Q_{2i}$<br>(KVAr) | $P_{3i}$<br>(kW) | $Q_{3i}$<br>(KVAr) |
| 127               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 128               | 46,2             | 22,2               | 61,6             | 29,6               | 77               | 37                 |
| 129               | 73,2             | 35,4               | 97,6             | 47,2               | 122              | 59                 |
| 130               | 37,2             | 18                 | 49,6             | 24                 | 62               | 30                 |
| 131               | 63               | 30,6               | 84               | 40,8               | 105              | 51                 |
| 132               | 73,2             | 35,4               | 97,6             | 47,2               | 122              | 59                 |
| 133               | 46,2             | 22,2               | 61,6             | 29,6               | 77               | 37                 |
| 134               | 46,2             | 22,2               | 61,6             | 29,6               | 77               | 37                 |
| 135               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 136               | 51               | 24,6               | 68               | 32,8               | 85               | 41                 |
| 137               | 4,8              | 2,4                | 6,4              | 3,2                | 8                | 4                  |
| 138               | 73,2             | 35,4               | 97,6             | 47,2               | 122              | 59                 |
| 139               | 21               | 10,2               | 28               | 13,6               | 35               | 17                 |
| 140               | 33               | 16,2               | 44               | 21,6               | 55               | 27                 |
| 141               | 91,8             | 44,4               | 122,4            | 59,2               | 153              | 74                 |
| 142               | 189,6            | 91,8               | 252,8            | 122,4              | 316              | 153                |
| 143               | 63               | 30,6               | 84               | 40,8               | 105              | 51                 |
| 144               | 12               | 6                  | 16               | 8                  | 20               | 10                 |
| 145               | 57               | 27,6               | 76               | 36,8               | 95               | 46                 |
| 146               | 22,8             | 10,8               | 30,4             | 14,4               | 38               | 18                 |
| 147               | 49,8             | 24                 | 66,4             | 32                 | 83               | 40                 |
| 148               | 30               | 14,4               | 40               | 19,2               | 50               | 24                 |
| 149               | 46,2             | 22,2               | 61,6             | 29,6               | 77               | 37                 |
| 150               | 73,2             | 35,4               | 97,6             | 47,2               | 122              | 59                 |
| 151               | 61,2             | 29,4               | 81,6             | 39,2               | 102              | 49                 |
| 152               | 36               | 17,4               | 48               | 23,2               | 60               | 29                 |
| 153               | 46,2             | 22,2               | 61,6             | 29,6               | 77               | 37                 |
| 154               | 116,4            | 56,4               | 155,2            | 75,2               | 194              | 94                 |
| 155               | 33,6             | 16,2               | 44,8             | 21,6               | 56               | 27                 |
| 156               | 73,2             | 35,4               | 97,6             | 47,2               | 122              | 59                 |
| 157               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 158               | 1,8              | 0,6                | 2,4              | 0,8                | 3                | 1                  |
| 159               | 0,6              | 0                  | 0,8              | 0                  | 1                | 0                  |
| 160               | 31,2             | 15                 | 41,6             | 20                 | 52               | 25                 |
| 161               | 116,4            | 56,4               | 155,2            | 75,2               | 194              | 94                 |
| 162               | 6                | 3                  | 8                | 4                  | 10               | 5                  |
| 163               | 76,8             | 37,2               | 102,4            | 49,6               | 128              | 62                 |
| 164               | 9,6              | 4,8                | 12,8             | 6,4                | 16               | 8                  |
| 165               | 22,2             | 10,8               | 29,6             | 14,4               | 37               | 18                 |
| 166               | 92,4             | 45                 | 123,2            | 60                 | 154              | 75                 |
| 167               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 168               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 169               | 46,8             | 22,8               | 62,4             | 30,4               | 78               | 38                 |

| (continuação)     |                  |                    |                  |                    |                  |                    |
|-------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|
| Barra<br><i>i</i> | $P_{1i}$<br>(kW) | $Q_{1i}$<br>(KVAr) | $P_{2i}$<br>(kW) | $Q_{2i}$<br>(KVAr) | $P_{3i}$<br>(kW) | $Q_{3i}$<br>(KVAr) |
| 170               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 171               | 16,2             | 7,8                | 21,6             | 10,4               | 27               | 13                 |
| 172               | 61,8             | 30                 | 82,4             | 40                 | 103              | 50                 |
| 173               | 73,2             | 35,4               | 97,6             | 47,2               | 122              | 59                 |
| 174               | 43,2             | 21                 | 57,6             | 28                 | 72               | 35                 |
| 175               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 176               | 73,2             | 35,4               | 97,6             | 47,2               | 122              | 59                 |
| 177               | 116,4            | 56,4               | 155,2            | 75,2               | 194              | 94                 |
| 178               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 179               | 46,2             | 22,2               | 61,6             | 29,6               | 77               | 37                 |
| 180               | 49,2             | 24                 | 65,6             | 32                 | 82               | 40                 |
| 181               | 31,8             | 15,6               | 42,4             | 20,8               | 53               | 26                 |
| 182               | 73,2             | 35,4               | 97,6             | 47,2               | 122              | 59                 |
| 183               | 38,4             | 18,6               | 51,2             | 24,8               | 64               | 31                 |
| 184               | 51,6             | 25,2               | 68,8             | 33,6               | 86               | 42                 |
| 185               | 49,2             | 24                 | 65,6             | 32                 | 82               | 40                 |
| 186               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 187               | 100,2            | 48,6               | 133,6            | 64,8               | 167              | 81                 |
| 188               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 189               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 190               | 78,6             | 38,4               | 104,8            | 51,2               | 131              | 64                 |
| 191               | 12,6             | 6                  | 16,8             | 8                  | 21               | 10                 |
| 192               | 12,6             | 6                  | 16,8             | 8                  | 21               | 10                 |
| 193               | 12,6             | 6                  | 16,8             | 8                  | 21               | 10                 |
| 194               | 12,6             | 6                  | 16,8             | 8                  | 21               | 10                 |
| 195               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 196               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 197               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 198               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 199               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 200               | 31,2             | 15                 | 41,6             | 20                 | 52               | 25                 |
| 201               | 121,2            | 58,8               | 161,6            | 78,4               | 202              | 98                 |
| 202               | 121,2            | 58,8               | 161,6            | 78,4               | 202              | 98                 |
| 203               | 43,8             | 21                 | 58,4             | 28                 | 73               | 35                 |
| 204               | 48,6             | 23,4               | 64,8             | 31,2               | 81               | 39                 |
| 205               | 69               | 33,6               | 92               | 44,8               | 115              | 56                 |
| 206               | 70,8             | 34,2               | 94,4             | 45,6               | 118              | 57                 |
| 207               | 190,8            | 92,4               | 254,4            | 123,2              | 318              | 154                |
| 208               | 96,6             | 46,8               | 128,8            | 62,4               | 161              | 78                 |
| 209               | 75,6             | 36,6               | 100,8            | 48,8               | 126              | 61                 |
| 210               | 35,4             | 17,4               | 47,2             | 23,2               | 59               | 29                 |
| 211               | 14,4             | 7,2                | 19,2             | 9,6                | 24               | 12                 |
| 212               | 14,4             | 7,2                | 19,2             | 9,6                | 24               | 12                 |

| (continuação)     |               |                    |               |                    |               |                    |
|-------------------|---------------|--------------------|---------------|--------------------|---------------|--------------------|
| Barra<br><i>i</i> | $P_i$<br>(kW) | $Q_{1i}$<br>(KVAr) | $P_i$<br>(kW) | $Q_{2i}$<br>(KVAr) | $P_i$<br>(kW) | $Q_{3i}$<br>(KVAr) |
| 213               | 3             | 1,2                | 4             | 1,6                | 5             | 2                  |
| 214               | 75,6          | 36,6               | 100,8         | 48,8               | 126           | 61                 |
| 215               | 33,6          | 16,2               | 44,8          | 21,6               | 56            | 27                 |
| 216               | 37,2          | 18                 | 49,6          | 24                 | 62            | 30                 |
| 217               | 0             | 0                  | 0             | 0                  | 0             | 0                  |
| 218               | 19,2          | 9                  | 25,6          | 12                 | 32            | 15                 |
| 219               | 94,8          | 46,2               | 126,4         | 61,6               | 158           | 77                 |
| 220               | 75,6          | 36,6               | 100,8         | 48,8               | 126           | 61                 |
| 221               | 121,2         | 58,8               | 161,6         | 78,4               | 202           | 98                 |
| 222               | 24,6          | 12                 | 32,8          | 16                 | 41            | 20                 |
| 223               | 48,6          | 23,4               | 64,8          | 31,2               | 81            | 39                 |
| 224               | 75,6          | 36,6               | 100,8         | 48,8               | 126           | 61                 |
| 225               | 121,2         | 58,8               | 161,6         | 78,4               | 202           | 98                 |
| 226               | 10,8          | 5,4                | 14,4          | 7,2                | 18            | 9                  |
| 227               | 121,2         | 58,8               | 161,6         | 78,4               | 202           | 98                 |
| 228               | 63,6          | 30,6               | 84,8          | 40,8               | 106           | 51                 |
| 229               | 105           | 51                 | 140           | 68                 | 175           | 85                 |
| 230               | 104,4         | 50,4               | 139,2         | 67,2               | 174           | 84                 |
| 231               | 67,8          | 33                 | 90,4          | 44                 | 113           | 55                 |
| 232               | 121,2         | 58,8               | 161,6         | 78,4               | 202           | 98                 |
| 233               | 0             | 0                  | 0             | 0                  | 0             | 0                  |
| 234               | 121,2         | 58,8               | 161,6         | 78,4               | 202           | 98                 |
| 235               | 241,8         | 117                | 322,4         | 156                | 403           | 195                |
| 236               | 121,2         | 58,8               | 161,6         | 78,4               | 202           | 98                 |
| 237               | 75,6          | 36,6               | 100,8         | 48,8               | 126           | 61                 |
| 238               | 0             | 0                  | 0             | 0                  | 0             | 0                  |
| 239               | 17,4          | 8,4                | 23,2          | 11,2               | 29            | 14                 |
| 240               | 5,4           | 2,4                | 7,2           | 3,2                | 9             | 4                  |
| 241               | 3             | 1,2                | 4             | 1,6                | 5             | 2                  |
| 242               | 0             | 0                  | 0             | 0                  | 0             | 0                  |
| 243               | 10,8          | 5,4                | 14,4          | 7,2                | 18            | 9                  |
| 244               | 27            | 13,2               | 36            | 17,6               | 45            | 22                 |
| 245               | 19,2          | 9,6                | 25,6          | 12,8               | 32            | 16                 |
| 246               | 36,6          | 18                 | 48,8          | 24                 | 61            | 30                 |
| 247               | 48,6          | 23,4               | 64,8          | 31,2               | 81            | 39                 |
| 248               | 75,6          | 36,6               | 100,8         | 48,8               | 126           | 61                 |
| 249               | 13,8          | 6,6                | 18,4          | 8,8                | 23            | 11                 |
| 250               | 8,4           | 4,2                | 11,2          | 5,6                | 14            | 7                  |
| 251               | 10,8          | 5,4                | 14,4          | 7,2                | 18            | 9                  |
| 252               | 75,6          | 36,6               | 100,8         | 48,8               | 126           | 61                 |
| 253               | 3             | 1,8                | 4             | 2,4                | 5             | 3                  |
| 254               | 15,6          | 7,8                | 20,8          | 10,4               | 26            | 13                 |
| 255               | 10,8          | 5,4                | 14,4          | 7,2                | 18            | 9                  |

| (continuação)     |                  |                    |                  |                    |                  |                    |
|-------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|
| Barra<br><i>i</i> | $P_{1i}$<br>(kW) | $Q_{1i}$<br>(KVAr) | $P_{2i}$<br>(kW) | $Q_{2i}$<br>(KVAr) | $P_{3i}$<br>(kW) | $Q_{3i}$<br>(KVAr) |
| 256               | 75,6             | 36,6               | 100,8            | 48,8               | 126              | 61                 |
| 257               | 48,6             | 23,4               | 64,8             | 31,2               | 81               | 39                 |
| 258               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 259               | 75,6             | 36,6               | 100,8            | 48,8               | 126              | 61                 |
| 260               | 24,6             | 12                 | 32,8             | 16                 | 41               | 20                 |
| 261               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 262               | 16,8             | 8,4                | 22,4             | 11,2               | 28               | 14                 |
| 263               | 18               | 8,4                | 24               | 11,2               | 30               | 14                 |
| 264               | 48,6             | 23,4               | 64,8             | 31,2               | 81               | 39                 |
| 265               | 121,2            | 58,8               | 161,6            | 78,4               | 202              | 98                 |
| 266               | 190,8            | 92,4               | 254,4            | 123,2              | 318              | 154                |
| 267               | 105,6            | 51                 | 140,8            | 68                 | 176              | 85                 |
| 268               | 75,6             | 36,6               | 100,8            | 48,8               | 126              | 61                 |
| 269               | 3,6              | 1,8                | 4,8              | 2,4                | 6                | 3                  |
| 270               | 18,6             | 9                  | 24,8             | 12                 | 31               | 15                 |
| 271               | 36               | 17,4               | 48               | 23,2               | 60               | 29                 |
| 272               | 33,6             | 16,2               | 44,8             | 21,6               | 56               | 27                 |
| 273               | 75,6             | 36,6               | 100,8            | 48,8               | 126              | 61                 |
| 274               | 70,8             | 34,2               | 94,4             | 45,6               | 118              | 57                 |
| 275               | 75,6             | 36,6               | 100,8            | 48,8               | 126              | 61                 |
| 276               | 121,2            | 58,8               | 161,6            | 78,4               | 202              | 98                 |
| 277               | 6                | 3                  | 8                | 4                  | 10               | 5                  |
| 278               | 75,6             | 36,6               | 100,8            | 48,8               | 126              | 61                 |
| 279               | 121,2            | 58,8               | 161,6            | 78,4               | 202              | 98                 |
| 280               | 190,8            | 92,4               | 254,4            | 123,2              | 318              | 154                |
| 281               | 49,2             | 24                 | 65,6             | 32                 | 82               | 40                 |
| 282               | 75,6             | 36,6               | 100,8            | 48,8               | 126              | 61                 |
| 283               | 13,2             | 6                  | 17,6             | 8                  | 22               | 10                 |
| 284               | 7,8              | 3,6                | 10,4             | 4,8                | 13               | 6                  |
| 285               | 42,6             | 20,4               | 56,8             | 27,2               | 71               | 34                 |
| 286               | 60,6             | 29,4               | 80,8             | 39,2               | 101              | 49                 |
| 287               | 67,8             | 32,4               | 90,4             | 43,2               | 113              | 54                 |
| 288               | 75,6             | 36,6               | 100,8            | 48,8               | 126              | 61                 |
| 289               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 290               | 20,4             | 10,2               | 27,2             | 13,6               | 34               | 17                 |
| 291               | 49,8             | 24                 | 66,4             | 32                 | 83               | 40                 |
| 292               | 35,4             | 17,4               | 47,2             | 23,2               | 59               | 29                 |
| 293               | 75,6             | 36,6               | 100,8            | 48,8               | 126              | 61                 |
| 294               | 87               | 42                 | 116              | 56                 | 145              | 70                 |
| 295               | 121,2            | 58,8               | 161,6            | 78,4               | 202              | 98                 |
| 296               | 30               | 14,4               | 40               | 19,2               | 50               | 24                 |
| 297               | 24,6             | 12                 | 32,8             | 16                 | 41               | 20                 |
| 298               | 121,2            | 58,8               | 161,6            | 78,4               | 202              | 98                 |

| (continuação)     |                  |                    |                  |                    |                  |                    |
|-------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|
| Barra<br><i>i</i> | $P_{1i}$<br>(kW) | $Q_{1i}$<br>(KVAr) | $P_{2i}$<br>(kW) | $Q_{2i}$<br>(KVAr) | $P_{3i}$<br>(kW) | $Q_{3i}$<br>(KVAr) |
| 299               | 46,2             | 22,2               | 61,6             | 29,6               | 77               | 37                 |
| 300               | 96,6             | 46,8               | 128,8            | 62,4               | 161              | 78                 |
| 301               | 286,2            | 138,6              | 381,6            | 184,8              | 477              | 231                |
| 302               | 40,8             | 19,8               | 54,4             | 26,4               | 68               | 33                 |
| 303               | 8,4              | 4,2                | 11,2             | 5,6                | 14               | 7                  |
| 304               | 2,4              | 1,2                | 3,2              | 1,6                | 4                | 2                  |
| 305               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 306               | 39,6             | 19,2               | 52,8             | 25,6               | 66               | 32                 |
| 307               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 308               | 36               | 17,4               | 48               | 23,2               | 60               | 29                 |
| 309               | 57               | 27,6               | 76               | 36,8               | 95               | 46                 |
| 310               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 311               | 11,4             | 5,4                | 15,2             | 7,2                | 19               | 9                  |
| 312               | 40,2             | 19,2               | 53,6             | 25,6               | 67               | 32                 |
| 313               | 10,8             | 5,4                | 14,4             | 7,2                | 18               | 9                  |
| 314               | 19,8             | 9,6                | 26,4             | 12,8               | 33               | 16                 |
| 315               | 12,6             | 6                  | 16,8             | 8                  | 21               | 10                 |
| 316               | 19,8             | 9,6                | 26,4             | 12,8               | 33               | 16                 |
| 317               | 25,2             | 12                 | 33,6             | 16                 | 42               | 20                 |
| 318               | 31,2             | 15                 | 41,6             | 20                 | 52               | 25                 |
| 319               | 25,8             | 12,6               | 34,4             | 16,8               | 43               | 21                 |
| 320               | 75,6             | 36,6               | 100,8            | 48,8               | 126              | 61                 |
| 321               | 64,2             | 31,2               | 85,6             | 41,6               | 107              | 52                 |
| 322               | 121,2            | 58,8               | 161,6            | 78,4               | 202              | 98                 |
| 323               | 75,6             | 36,6               | 100,8            | 48,8               | 126              | 61                 |
| 324               | 14,4             | 7,2                | 19,2             | 9,6                | 24               | 12                 |
| 325               | 60,6             | 29,4               | 80,8             | 39,2               | 101              | 49                 |
| 326               | 48,6             | 23,4               | 64,8             | 31,2               | 81               | 39                 |
| 327               | 93               | 45                 | 124              | 60                 | 155              | 75                 |
| 328               | 13,8             | 6,6                | 18,4             | 8,8                | 23               | 11                 |
| 329               | 18,6             | 9                  | 24,8             | 12                 | 31               | 15                 |
| 330               | 75,6             | 36,6               | 100,8            | 48,8               | 126              | 61                 |
| 331               | 7,8              | 3,6                | 10,4             | 4,8                | 13               | 6                  |
| 332               | 33,6             | 16,2               | 44,8             | 21,6               | 56               | 27                 |
| 333               | 72               | 34,8               | 96               | 46,4               | 120              | 58                 |
| 334               | 75,6             | 36,6               | 100,8            | 48,8               | 126              | 61                 |
| 335               | 241,8            | 117                | 322,4            | 156                | 403              | 195                |
| 336               | 48,6             | 23,4               | 64,8             | 31,2               | 81               | 39                 |
| 337               | 106,2            | 51,6               | 141,6            | 68,8               | 177              | 86                 |
| 338               | 90,6             | 43,8               | 120,8            | 58,4               | 151              | 73                 |
| 339               | 5,4              | 2,4                | 7,2              | 3,2                | 9                | 4                  |
| 340               | 17,4             | 8,4                | 23,2             | 11,2               | 29               | 14                 |
| 341               | 8,4              | 4,2                | 11,2             | 5,6                | 14               | 7                  |

| (continuação)     |                  |                    |                  |                    |                  |                    |
|-------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|
| Barra<br><i>i</i> | $P_{1i}$<br>(kW) | $Q_{1i}$<br>(KVAr) | $P_{2i}$<br>(kW) | $Q_{2i}$<br>(KVAr) | $P_{3i}$<br>(kW) | $Q_{3i}$<br>(KVAr) |
| 342               | 13,8             | 6,6                | 18,4             | 8,8                | 23               | 11                 |
| 343               | 27               | 13,2               | 36               | 17,6               | 45               | 22                 |
| 344               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 345               | 21,6             | 10,2               | 28,8             | 13,6               | 36               | 17                 |
| 346               | 3                | 1,2                | 4                | 1,6                | 5                | 2                  |
| 347               | 5,4              | 2,4                | 7,2              | 3,2                | 9                | 4                  |
| 348               | 48               | 23,4               | 64               | 31,2               | 80               | 39                 |
| 349               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 350               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 351               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 352               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 353               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 354               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 355               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 356               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 357               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 358               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 359               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 360               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 361               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 362               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 363               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 364               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 365               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 366               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 367               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 368               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 369               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 370               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 371               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 372               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 373               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 374               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 375               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 376               | 51,6             | 24,6               | 68,8             | 32,8               | 86               | 41                 |
| 377               | 51,6             | 24,6               | 68,8             | 32,8               | 86               | 41                 |
| 378               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 379               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 380               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 381               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 382               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 383               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 384               | 40,8             | 19,8               | 54,4             | 26,4               | 68               | 33                 |

| Barra<br><i>i</i> | (conclusão)      |                    |                  |                    |                  |                    |
|-------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|
|                   | $P_{1i}$<br>(kW) | $Q_{1i}$<br>(KVAr) | $P_{2i}$<br>(kW) | $Q_{2i}$<br>(KVAr) | $P_{3i}$<br>(kW) | $Q_{3i}$<br>(KVAr) |
| 385               | 9                | 4,2                | 12               | 5,6                | 15               | 7                  |
| 386               | 33,6             | 16,2               | 44,8             | 21,6               | 56               | 27                 |
| 387               | 7,2              | 3,6                | 9,6              | 4,8                | 12               | 6                  |
| 388               | 30               | 14,4               | 40               | 19,2               | 50               | 24                 |
| 389               | 69               | 33,6               | 92               | 44,8               | 115              | 56                 |
| 390               | 8,4              | 4,2                | 11,2             | 5,6                | 14               | 7                  |
| 391               | 3                | 1,2                | 4                | 1,6                | 5                | 2                  |
| 392               | 11,4             | 5,4                | 15,2             | 7,2                | 19               | 9                  |
| 393               | 20,4             | 10,2               | 27,2             | 13,6               | 34               | 17                 |
| 394               | 6                | 3                  | 8                | 4                  | 10               | 5                  |
| 395               | 24               | 11,4               | 32               | 15,2               | 40               | 19                 |
| 396               | 16,8             | 8,4                | 22,4             | 11,2               | 28               | 14                 |
| 397               | 8,4              | 4,2                | 11,2             | 5,6                | 14               | 7                  |
| 398               | 10,2             | 4,8                | 13,6             | 6,4                | 17               | 8                  |
| 399               | 24,6             | 12                 | 32,8             | 16                 | 41               | 20                 |
| 400               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 401               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 402               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 403               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 404               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 405               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 406               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 407               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 408               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 409               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 410               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 411               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 412               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 413               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 414               | 11,4             | 5,4                | 15,2             | 7,2                | 19               | 9                  |
| 415               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 416               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |
| 417               | 0                | 0                  | 0                | 0                  | 0                | 0                  |

Fonte: Baquero (2012)

Tabela 31 - Dados de ramo do sistema de 417 barras

| (continua) |                   |                   |                  |        |          |                   |                   |                  |        |
|------------|-------------------|-------------------|------------------|--------|----------|-------------------|-------------------|------------------|--------|
| circuito   | Barra<br><i>i</i> | Barra<br><i>j</i> | $l_{ij}$<br>(km) | $tc_o$ | circuito | Barra<br><i>i</i> | Barra<br><i>j</i> | $l_{ij}$<br>(km) | $tc_o$ |
| 1          | 383               | 67                | 0,085            | 0      | 43       | 262               | 263               | 0,188            | 0      |
| 2          | 88                | 66                | 0,295            | 0      | 44       | 78                | 82                | 0,66             | 0      |
| 3          | 224               | 223               | 0,19             | 0      | 45       | 62                | 60                | 0,3              | 0      |
| 4          | 20                | 71                | 0,53             | 0      | 46       | 23                | 28                | 0,26             | 0      |
| 5          | 65                | 383               | 0,095            | 0      | 47       | 261               | 262               | 0,216            | 2      |
| 6          | 2                 | 19                | 1,67             | 0      | 48       | 81                | 79                | 0,2              | 0      |
| 7          | 223               | 221               | 0,19             | 0      | 49       | 70                | 62                | 0,062            | 0      |
| 8          | 71                | 73                | 0,06             | 0      | 50       | 28                | 33                | 0,315            | 0      |
| 9          | 69                | 381               | 0,085            | 0      | 51       | 260               | 261               | 0,13             | 2      |
| 10         | 19                | 50                | 0,24             | 0      | 52       | 77                | 78                | 0,06             | 0      |
| 11         | 221               | 220               | 0,24             | 0      | 53       | 60                | 59                | 0,12             | 0      |
| 12         | 75                | 71                | 0,15             | 0      | 54       | 33                | 46                | 0,475            | 0      |
| 13         | 381               | 65                | 0,09             | 0      | 55       | 258               | 260               | 0,175            | 2      |
| 14         | 50                | 51                | 0,19             | 0      | 56       | 82                | 89                | 0,331            | 0      |
| 15         | 220               | 219               | 0,23             | 0      | 57       | 57                | 61                | 0,354            | 0      |
| 16         | 74                | 80                | 0,23             | 0      | 58       | 46                | 20                | 0,23             | 0      |
| 17         | 58                | 69                | 0,147            | 0      | 59       | 256               | 258               | 0,188            | 2      |
| 18         | 51                | 55                | 0,32             | 0      | 60       | 76                | 58                | 1,06             | 0      |
| 19         | 416               | 272               | 0,039            | 0      | 61       | 63                | 66                | 0,123            | 0      |
| 20         | 80                | 75                | 0,145            | 0      | 62       | 19                | 43                | 0,04             | 0      |
| 21         | 67                | 84                | 0,08             | 0      | 63       | 371               | 238               | 0,091            | 2      |
| 22         | 55                | 26                | 0,26             | 0      | 64       | 122               | 417               | 0,07             | 3      |
| 23         | 416               | 273               | 0,316            | 0      | 65       | 66                | 67                | 0,236            | 0      |
| 24         | 73                | 74                | 0,29             | 0      | 66       | 43                | 24                | 0,35             | 0      |
| 25         | 67                | 92                | 0,23             | 0      | 67       | 263               | 264               | 0,198            | 0      |
| 26         | 26                | 30                | 0,28             | 0      | 68       | 119               | 93                | 1,076            | 3      |
| 27         | 273               | 274               | 0,229            | 0      | 69       | 61                | 63                | 0,165            | 0      |
| 28         | 71                | 72                | 0,27             | 0      | 70       | 24                | 34                | 0,35             | 0      |
| 29         | 59                | 57                | 0,03             | 0      | 71       | 368               | 346               | 0,36             | 0      |
| 30         | 30                | 39                | 0,29             | 0      | 72       | 119               | 122               | 1,25             | 3      |
| 31         | 274               | 208               | 0,382            | 0      | 73       | 57                | 19                | 1,62             | 0      |
| 32         | 72                | 79                | 0,2              | 0      | 74       | 34                | 37                | 0,22             | 0      |
| 33         | 64                | 70                | 0,195            | 0      | 75       | 368               | 369               | 0,57             | 0      |
| 34         | 39                | 46                | 0,25             | 0      | 76       | 113               | 114               | 0,13             | 0      |
| 35         | 274               | 275               | 0,317            | 0      | 77       | 417               | 91                | 1,064            | 1      |
| 36         | 72                | 76                | 0,21             | 0      | 78       | 37                | 40                | 0,285            | 0      |
| 37         | 68                | 64                | 0,085            | 0      | 79       | 369               | 347               | 0,325            | 0      |
| 38         | 50                | 53                | 0,15             | 0      | 80       | 114               | 111               | 0,11             | 0      |
| 39         | 275               | 263               | 0,315            | 0      | 81       | 91                | 1                 | 0,933            | 1      |
| 40         | 76                | 77                | 0,14             | 0      | 82       | 40                | 42                | 0,32             | 0      |
| 41         | 58                | 68                | 0,058            | 0      | 83       | 382               | 250               | 0,03             | 0      |
| 42         | 53                | 23                | 0,2              | 0      | 84       | 93                | 112               | 0,09             | 0      |

| (continuação) |                   |                   |                               |                       |          |                   |                   |                               |                       |
|---------------|-------------------|-------------------|-------------------------------|-----------------------|----------|-------------------|-------------------|-------------------------------|-----------------------|
| circuito      | Barra<br><i>i</i> | Barra<br><i>j</i> | <i>l<sub>ij</sub></i><br>(km) | <i>t<sub>co</sub></i> | circuito | Barra<br><i>i</i> | Barra<br><i>j</i> | <i>l<sub>ij</sub></i><br>(km) | <i>t<sub>co</sub></i> |
| 85            | 91                | 86                | 0,044                         | 2                     | 128      | 103               | 104               | 0,17                          | 2                     |
| 86            | 42                | 47                | 0,22                          | 0                     | 129      | 18                | 7                 | 0,06                          | 0                     |
| 87            | 382               | 369               | 0,05                          | 0                     | 130      | 31                | 43                | 0,70                          | 0                     |
| 88            | 112               | 113               | 0,21                          | 0                     | 131      | 231               | 348               | 0,26                          | 2                     |
| 89            | 1                 | 16                | 0,24                          | 0                     | 132      | 83                | 103               | 0,20                          | 1                     |
| 90            | 47                | 49                | 0,2                           | 0                     | 133      | 13                | 15                | 0,27                          | 0                     |
| 91            | 207               | 276               | 0,184                         | 0                     | 134      | 36                | 31                | 0,29                          | 0                     |
| 92            | 105               | 94                | 0,23                          | 0                     | 135      | 348               | 206               | 0,11                          | 2                     |
| 93            | 5                 | 6                 | 0,11                          | 0                     | 136      | 104               | 107               | 0,18                          | 2                     |
| 94            | 19                | 32                | 0,18                          | 0                     | 137      | 1                 | 12                | 0,11                          | 2                     |
| 95            | 276               | 277               | 0,09                          | 0                     | 138      | 41                | 36                | 0,185                         | 0                     |
| 96            | 94                | 111               | 0,09                          | 0                     | 139      | 379               | 228               | 0,141                         | 2                     |
| 97            | 6                 | 2                 | 0,142                         | 0                     | 140      | 108               | 107               | 0,17                          | 2                     |
| 98            | 83                | 32                | 0,115                         | 1                     | 141      | 3                 | 11                | 0,23                          | 2                     |
| 99            | 276               | 278               | 0,132                         | 0                     | 142      | 45                | 41                | 0,07                          | 0                     |
| 100           | 93                | 110               | 0,18                          | 0                     | 143      | 228               | 227               | 0,216                         | 2                     |
| 101           | 17                | 4                 | 0,335                         | 0                     | 144      | 83                | 108               | 0,13                          | 1                     |
| 102           | 27                | 35                | 0,25                          | 0                     | 145      | 11                | 14                | 0,36                          | 2                     |
| 103           | 278               | 279               | 0,094                         | 0                     | 146      | 45                | 49                | 0,1                           | 0                     |
| 104           | 110               | 105               | 0,18                          | 0                     | 147      | 231               | 230               | 0,265                         | 2                     |
| 105           | 4                 | 5                 | 0,135                         | 0                     | 148      | 109               | 83                | 0,12                          | 0                     |
| 106           | 35                | 44                | 0,36                          | 0                     | 149      | 14                | 10                | 0,455                         | 2                     |
| 107           | 279               | 280               | 0,17                          | 0                     | 150      | 20                | 48                | 0,37                          | 0                     |
| 108           | 118               | 120               | 0,035                         | 2                     | 151      | 231               | 292               | 0,205                         | 0                     |
| 109           | 16                | 17                | 0,32                          | 0                     | 152      | 102               | 109               | 0,21                          | 0                     |
| 110           | 48                | 44                | 0,12                          | 0                     | 153      | 12                | 3                 | 0,155                         | 2                     |
| 111           | 280               | 234               | 0,135                         | 0                     | 154      | 38                | 29                | 0,32                          | 0                     |
| 112           | 93                | 118               | 0,29                          | 1                     | 155      | 292               | 235               | 0,19                          | 0                     |
| 113           | 1                 | 13                | 0,045                         | 0                     | 156      | 106               | 102               | 0,15                          | 0                     |
| 114           | 54                | 22                | 0,21                          | 0                     | 157      | 10                | 85                | 0,12                          | 2                     |
| 115           | 280               | 281               | 0,147                         | 0                     | 158      | 48                | 38                | 0,24                          | 0                     |
| 116           | 117               | 83                | 0,11                          | 1                     | 159      | 220               | 343               | 0,08                          | 0                     |
| 117           | 7                 | 8                 | 0,26                          | 0                     | 160      | 83                | 106               | 0,18                          | 0                     |
| 118           | 22                | 27                | 0,19                          | 0                     | 161      | 85                | 90                | 0,26                          | 0                     |
| 119           | 234               | 233               | 0,228                         | 0                     | 162      | 52                | 21                | 0,11                          | 0                     |
| 120           | 118               | 121               | 0,14                          | 1                     | 163      | 303               | 305               | 0,19                          | 0                     |
| 121           | 8                 | 2                 | 0,04                          | 0                     | 164      | 96                | 115               | 0,12                          | 0                     |
| 122           | 32                | 54                | 0,12                          | 0                     | 165      | 9                 | 10                | 0,16                          | 2                     |
| 123           | 234               | 235               | 0,115                         | 0                     | 166      | 29                | 25                | 0,15                          | 0                     |
| 124           | 121               | 117               | 0,55                          | 1                     | 167      | 377               | 376               | 0,305                         | 0                     |
| 125           | 15                | 18                | 0,43                          | 0                     | 168      | 83                | 98                | 0,36                          | 0                     |
| 126           | 20                | 49                | 0,10                          | 0                     | 169      | 2                 | 9                 | 0,295                         | 0                     |
| 127           | 207               | 235               | 0,21                          | 0                     | 170      | 25                | 52                | 0,275                         | 0                     |

| (continuação) |                   |                   |                  |           |          |                   |                   |                  |           |
|---------------|-------------------|-------------------|------------------|-----------|----------|-------------------|-------------------|------------------|-----------|
| circuito      | Barra<br><i>i</i> | Barra<br><i>j</i> | $l_{ij}$<br>(km) | $t_{c_0}$ | circuito | Barra<br><i>i</i> | Barra<br><i>j</i> | $l_{ij}$<br>(km) | $t_{c_0}$ |
| 171           | 303               | 377               | 0,161            | 0         | 214      | 159               | 180               | 0,25             | 2         |
| 172           | 100               | 95                | 0,29             | 0         | 215      | 383               | 242               | 0,622            | 0         |
| 173           | 9                 | 87                | 0,375            | 2         | 216      | 203               | 204               | 0,17             | 0         |
| 174           | 21                | 32                | 0,12             | 0         | 217      | 131               | 152               | 0,24             | 0         |
| 175           | 308               | 306               | 0,27             | 0         | 218      | 180               | 177               | 0,16             | 0         |
| 176           | 99                | 100               | 0,16             | 0         | 219      | 84                | 243               | 0,383            | 0         |
| 177           | 87                | 88                | 0,22             | 0         | 220      | 202               | 205               | 0,354            | 2         |
| 178           | 20                | 56                | 0,59             | 0         | 221      | 135               | 131               | 0,41             | 0         |
| 179           | 313               | 316               | 0,223            | 0         | 222      | 170               | 162               | 0,22             | 2         |
| 180           | 101               | 99                | 0,15             | 0         | 223      | 351               | 413               | 0,193            | 0         |
| 181           | 98                | 101               | 0,14             | 0         | 224      | 378               | 379               | 0,354            | 2         |
| 182           | 186               | 166               | 0,29             | 2         | 225      | 56                | 148               | 0,19             | 0         |
| 183           | 313               | 317               | 0,198            | 0         | 226      | 162               | 183               | 0,26             | 2         |
| 184           | 137               | 193               | 0,035            | 0         | 227      | 413               | 384               | 0,197            | 0         |
| 185           | 95                | 116               | 0,215            | 0         | 228      | 205               | 206               | 0,205            | 2         |
| 186           | 166               | 174               | 0,31             | 2         | 229      | 56                | 124               | 0,25             | 0         |
| 187           | 300               | 304               | 0,12             | 0         | 230      | 159               | 128               | 0,78             | 2         |
| 188           | 154               | 150               | 0,19             | 0         | 231      | 413               | 400               | 0,199            | 0         |
| 189           | 116               | 96                | 0,11             | 0         | 232      | 416               | 374               | 0,03             | 0         |
| 190           | 174               | 180               | 0,29             | 2         | 233      | 126               | 123               | 0,08             | 0         |
| 191           | 309               | 314               | 0,168            | 0         | 234      | 128               | 140               | 0,11             | 2         |
| 192           | 125               | 123               | 0,08             | 0         | 235      | 400               | 385               | 0,162            | 0         |
| 193           | 97                | 93                | 0,11             | 0         | 236      | 207               | 208               | 0,105            | 0         |
| 194           | 159               | 179               | 0,12             | 0         | 237      | 127               | 126               | 0,74             | 0         |
| 195           | 309               | 304               | 0,226            | 0         | 238      | 130               | 156               | 0,10             | 0         |
| 196           | 415               | 350               | 0,62             | 1         | 239      | 400               | 401               | 0,194            | 0         |
| 197           | 115               | 97                | 0,17             | 0         | 240      | 208               | 209               | 0,32             | 0         |
| 198           | 179               | 176               | 0,15             | 0         | 241      | 124               | 127               | 0,06             | 0         |
| 199           | 128               | 345               | 0,716            | 0         | 242      | 129               | 130               | 0,15             | 0         |
| 200           | 415               | 349               | 0,62             | 1         | 243      | 401               | 386               | 0,155            | 0         |
| 201           | 56                | 146               | 0,43             | 0         | 244      | 208               | 210               | 0,153            | 0         |
| 202           | 168               | 161               | 0,21             | 0         | 245      | 199               | 118               | 0,21             | 0         |
| 203           | 89                | 369               | 0,432            | 0         | 246      | 140               | 129               | 0,16             | 2         |
| 204           | 349               | 202               | 0,064            | 1         | 247      | 401               | 402               | 0,163            | 0         |
| 205           | 152               | 140               | 0,25             | 2         | 248      | 210               | 416               | 0,154            | 0         |
| 206           | 161               | 182               | 0,23             | 0         | 249      | 199               | 200               | 0,02             | 0         |
| 207           | 381               | 382               | 0,411            | 0         | 250      | 156               | 132               | 0,31             | 0         |
| 208           | 350               | 378               | 0,064            | 1         | 251      | 402               | 387               | 0,228            | 0         |
| 209           | 146               | 141               | 0,29             | 0         | 252      | 374               | 201               | 0,41             | 0         |
| 210           | 182               | 181               | 0,09             | 0         | 253      | 157               | 199               | 0,06             | 0         |
| 211           | 65                | 251               | 0,528            | 0         | 254      | 132               | 139               | 0,29             | 0         |
| 212           | 202               | 203               | 0,175            | 2         | 255      | 402               | 403               | 0,187            | 0         |
| 213           | 141               | 135               | 0,22             | 0         | 256      | 201               | 415               | 1,32             | 0         |

| (continuação) |                   |                   |                  |        |          |                   |                   |                  |        |
|---------------|-------------------|-------------------|------------------|--------|----------|-------------------|-------------------|------------------|--------|
| circuito      | Barra<br><i>i</i> | Barra<br><i>j</i> | $l_{ij}$<br>(km) | $tc_o$ | circuito | Barra<br><i>i</i> | Barra<br><i>j</i> | $l_{ij}$<br>(km) | $tc_o$ |
| 257           | 123               | 157               | 0,28             | 0      | 300      | 218               | 219               | 0,220            | 1      |
| 258           | 139               | 146               | 0,42             | 0      | 301      | 167               | 175               | 0,310            | 0      |
| 259           | 367               | 344               | 0,315            | 0      | 302      | 147               | 56                | 0,400            | 0      |
| 260           | 372               | 351               | 0,285            | 0      | 303      | 406               | 407               | 0,134            | 0      |
| 261           | 198               | 191               | 0,04             | 0      | 304      | 219               | 222               | 0,243            | 2      |
| 262           | 128               | 153               | 0,12             | 2      | 305      | 160               | 184               | 0,36             | 0      |
| 263           | 344               | 345               | 0,16             | 0      | 306      | 128               | 150               | 0,09             | 0      |
| 264           | 351               | 211               | 0,311            | 0      | 307      | 407               | 408               | 0,183            | 0      |
| 265           | 198               | 196               | 0,19             | 0      | 308      | 222               | 236               | 0,28             | 2      |
| 266           | 136               | 143               | 0,26             | 0      | 309      | 184               | 163               | 0,25             | 0      |
| 267           | 344               | 368               | 0,145            | 0      | 310      | 144               | 145               | 0,09             | 0      |
| 268           | 351               | 352               | 0,585            | 0      | 311      | 408               | 392               | 0,202            | 0      |
| 269           | 158               | 198               | 0,74             | 0      | 312      | 236               | 237               | 0,213            | 2      |
| 270           | 143               | 147               | 0,26             | 0      | 313      | 163               | 164               | 0,09             | 0      |
| 271           | 399               | 403               | 0,13             | 0      | 314      | 145               | 148               | 0,15             | 0      |
| 272           | 352               | 212               | 0,55             | 0      | 315      | 408               | 393               | 0,189            | 0      |
| 273           | 196               | 190               | 0,03             | 0      | 316      | 236               | 371               | 0,184            | 2      |
| 274           | 153               | 155               | 0,11             | 2      | 317      | 164               | 172               | 0,38             | 0      |
| 275           | 403               | 404               | 0,11             | 0      | 318      | 151               | 134               | 0,21             | 0      |
| 276           | 352               | 213               | 0,137            | 0      | 319      | 407               | 409               | 0,151            | 0      |
| 277           | 158               | 189               | 1,00             | 3      | 320      | 238               | 239               | 0,02             | 2      |
| 278           | 155               | 136               | 0,23             | 0      | 321      | 172               | 178               | 0,31             | 0      |
| 279           | 404               | 388               | 0,161            | 0      | 322      | 134               | 144               | 0,39             | 0      |
| 280           | 415               | 214               | 0,951            | 1      | 323      | 409               | 414               | 0,18             | 0      |
| 281           | 158               | 160               | 0,23             | 0      | 324      | 238               | 242               | 0,286            | 2      |
| 282           | 142               | 149               | 0,27             | 0      | 325      | 178               | 159               | 0,19             | 0      |
| 283           | 404               | 405               | 0,196            | 0      | 326      | 134               | 194               | 0,025            | 0      |
| 284           | 214               | 215               | 0,290            | 1      | 327      | 409               | 410               | 0,176            | 0      |
| 285           | 160               | 171               | 0,240            | 0      | 328      | 242               | 354               | 0,015            | 0      |
| 286           | 149               | 147               | 0,060            | 0      | 329      | 158               | 181               | 0,280            | 0      |
| 287           | 405               | 389               | 0,124            | 0      | 330      | 150               | 151               | 0,150            | 0      |
| 288           | 215               | 216               | 0,340            | 2      | 331      | 410               | 394               | 0,163            | 0      |
| 289           | 171               | 187               | 0,250            | 0      | 332      | 354               | 353               | 0,350            | 0      |
| 290           | 133               | 138               | 0,410            | 2      | 333      | 181               | 185               | 0,250            | 0      |
| 291           | 405               | 390               | 0,200            | 0      | 334      | 417               | 189               | 0,600            | 3      |
| 292           | 215               | 217               | 0,180            | 1      | 335      | 410               | 411               | 0,185            | 0      |
| 293           | 187               | 167               | 0,250            | 0      | 336      | 353               | 241               | 0,050            | 0      |
| 294           | 138               | 142               | 0,170            | 0      | 337      | 185               | 165               | 0,160            | 0      |
| 295           | 403               | 406               | 0,228            | 0      | 338      | 189               | 188               | 0,200            | 0      |
| 296           | 217               | 218               | 0,008            | 1      | 339      | 411               | 398               | 0,155            | 0      |
| 297           | 175               | 178               | 0,180            | 0      | 340      | 353               | 240               | 0,200            | 0      |
| 298           | 153               | 133               | 0,270            | 2      | 341      | 165               | 169               | 0,160            | 0      |
| 299           | 406               | 391               | 0,215            | 0      | 342      | 188               | 197               | 0,300            | 0      |

| (continuação) |                   |                   |                  |        |          |                   |                   |                  |        |
|---------------|-------------------|-------------------|------------------|--------|----------|-------------------|-------------------|------------------|--------|
| circuito      | Barra<br><i>i</i> | Barra<br><i>j</i> | $l_{ij}$<br>(km) | $tc_o$ | circuito | Barra<br><i>i</i> | Barra<br><i>j</i> | $l_{ij}$<br>(km) | $tc_o$ |
| 343           | 411               | 397               | 0,196            | 0      | 386      | 365               | 269               | 0,275            | 0      |
| 344           | 242               | 355               | 0,025            | 0      | 387      | 300               | 301               | 0,152            | 0      |
| 345           | 169               | 173               | 0,100            | 0      | 388      | 316               | 318               | 0,338            | 0      |
| 346           | 197               | 195               | 0,100            | 0      | 389      | 250               | 251               | 0,515            | 0      |
| 347           | 411               | 412               | 0,239            | 0      | 390      | 365               | 270               | 0,045            | 0      |
| 348           | 355               | 356               | 0,140            | 0      | 391      | 301               | 302               | 0,124            | 0      |
| 349           | 173               | 179               | 0,270            | 0      | 392      | 318               | 317               | 0,182            | 0      |
| 350           | 188               | 192               | 0,064            | 0      | 393      | 250               | 359               | 0,27             | 0      |
| 351           | 412               | 396               | 0,193            | 0      | 394      | 364               | 362               | 0,205            | 0      |
| 352           | 356               | 243               | 0,035            | 0      | 395      | 302               | 303               | 0,534            | 0      |
| 353           | 158               | 183               | 0,620            | 1      | 396      | 317               | 314               | 0,19             | 0      |
| 354           | 148               | 137               | 0,350            | 0      | 397      | 359               | 252               | 0,136            | 0      |
| 355           | 412               | 395               | 0,190            | 0      | 398      | 362               | 361               | 0,08             | 0      |
| 356           | 356               | 244               | 0,015            | 0      | 399      | 303               | 304               | 0,57             | 0      |
| 357           | 183               | 186               | 0,12             | 2      | 400      | 314               | 310               | 0,228            | 0      |
| 358           | 137               | 154               | 0,29             | 0      | 401      | 252               | 253               | 0,157            | 2      |
| 359           | 289               | 288               | 0,172            | 0      | 402      | 362               | 380               | 0,72             | 0      |
| 360           | 242               | 245               | 0,125            | 2      | 403      | 304               | 307               | 0,138            | 0      |
| 361           | 245               | 246               | 0,144            | 0      | 404      | 310               | 303               | 0,288            | 0      |
| 362           | 264               | 265               | 0,295            | 0      | 405      | 253               | 360               | 0,161            | 0      |
| 363           | 288               | 287               | 0,128            | 0      | 406      | 361               | 271               | 0,045            | 0      |
| 364           | 305               | 309               | 0,346            | 0      | 407      | 307               | 315               | 0,607            | 0      |
| 365           | 246               | 247               | 0,199            | 0      | 408      | 295               | 259               | 0,131            | 0      |
| 366           | 265               | 266               | 0,272            | 0      | 409      | 360               | 255               | 0,11             | 0      |
| 367           | 287               | 299               | 0,511            | 0      | 410      | 361               | 416               | 0,125            | 0      |
| 368           | 309               | 319               | 0,035            | 0      | 411      | 315               | 311               | 0,288            | 0      |
| 369           | 242               | 248               | 0,167            | 2      | 412      | 259               | 286               | 0,098            | 0      |
| 370           | 266               | 267               | 0,428            | 0      | 413      | 253               | 254               | 0,075            | 0      |
| 371           | 299               | 285               | 0,300            | 0      | 414      | 416               | 363               | 0,78             | 0      |
| 372           | 309               | 313               | 0,198            | 0      | 415      | 311               | 306               | 0,198            | 0      |
| 373           | 248               | 357               | 0,118            | 0      | 416      | 259               | 323               | 0,295            | 0      |
| 374           | 267               | 268               | 0,233            | 0      | 417      | 253               | 256               | 0,27             | 2      |
| 375           | 415               | 372               | 0,076            | 0      | 418      | 363               | 283               | 0,285            | 0      |
| 376           | 313               | 308               | 0,191            | 0      | 419      | 306               | 299               | 0,214            | 0      |
| 377           | 357               | 358               | 0,015            | 0      | 420      | 323               | 325               | 0,015            | 0      |
| 378           | 268               | 364               | 0,300            | 0      | 421      | 256               | 257               | 0,29             | 0      |
| 379           | 299               | 284               | 0,222            | 0      | 422      | 363               | 284               | 0,16             | 0      |
| 380           | 308               | 312               | 0,215            | 0      | 423      | 333               | 335               | 0,195            | 0      |
| 381           | 358               | 249               | 0,055            | 0      | 424      | 323               | 265               | 0,284            | 0      |
| 382           | 364               | 365               | 0,07             | 0      | 425      | 256               | 282               | 0,184            | 2      |
| 383           | 299               | 300               | 0,255            | 0      | 426      | 380               | 267               | 0,847            | 0      |
| 384           | 312               | 316               | 0,187            | 0      | 427      | 335               | 322               | 0,15             | 0      |
| 385           | 358               | 250               | 0,385            | 0      | 428      | 323               | 324               | 0,132            | 0      |

| (conclusão) |                   |                   |                               |                       |          |                   |                   |                               |                       |
|-------------|-------------------|-------------------|-------------------------------|-----------------------|----------|-------------------|-------------------|-------------------------------|-----------------------|
| circuito    | Barra<br><i>i</i> | Barra<br><i>j</i> | <i>l<sub>ij</sub></i><br>(km) | <i>tc<sub>o</sub></i> | circuito | Barra<br><i>i</i> | Barra<br><i>j</i> | <i>l<sub>ij</sub></i><br>(km) | <i>tc<sub>o</sub></i> |
| 429         | 282               | 281               | 0,227                         | 2                     | 452      | 321               | 328               | 0,086                         | 0                     |
| 430         | 267               | 326               | 0,105                         | 0                     | 453      | 227               | 370               | 0,16                          | 2                     |
| 431         | 335               | 336               | 0,177                         | 0                     | 454      | 294               | 293               | 0,062                         | 0                     |
| 432         | 323               | 322               | 0,24                          | 0                     | 455      | 339               | 340               | 0,075                         | 0                     |
| 433         | 281               | 233               | 0,19                          | 2                     | 456      | 328               | 329               | 0,073                         | 0                     |
| 434         | 326               | 327               | 0,15                          | 0                     | 457      | 370               | 373               | 0,135                         | 2                     |
| 435         | 336               | 337               | 0,08                          | 0                     | 458      | 293               | 291               | 0,251                         | 0                     |
| 436         | 322               | 321               | 0,185                         | 0                     | 459      | 340               | 341               | 0,31                          | 0                     |
| 437         | 233               | 232               | 0,095                         | 2                     | 460      | 329               | 330               | 0,114                         | 0                     |
| 438         | 267               | 296               | 0,138                         | 0                     | 461      | 373               | 226               | 0,01                          | 0                     |
| 439         | 337               | 338               | 0,115                         | 0                     | 462      | 267               | 291               | 0,27                          | 0                     |
| 440         | 321               | 320               | 0,26                          | 0                     | 463      | 333               | 334               | 0,153                         | 0                     |
| 441         | 232               | 375               | 0,04                          | 2                     | 464      | 330               | 331               | 0,075                         | 0                     |
| 442         | 296               | 295               | 0,138                         | 0                     | 465      | 373               | 225               | 0,008                         | 2                     |
| 443         | 338               | 264               | 0,186                         | 0                     | 466      | 291               | 289               | 0,046                         | 0                     |
| 444         | 320               | 298               | 0,192                         | 0                     | 467      | 340               | 367               | 0,49                          | 0                     |
| 445         | 229               | 230               | 0,156                         | 2                     | 468      | 328               | 332               | 0,16                          | 0                     |
| 446         | 295               | 294               | 0,203                         | 0                     | 469      | 225               | 224               | 0,075                         | 0                     |
| 447         | 264               | 366               | 0,024                         | 0                     | 470      | 289               | 290               | 0,015                         | 0                     |
| 448         | 298               | 295               | 0,104                         | 0                     | 471      | 375               | 229               | 0,095                         | 2                     |
| 449         | 229               | 227               | 0,09                          | 2                     | 472      | 332               | 333               | 0,114                         | 0                     |
| 450         | 295               | 297               | 0,103                         | 0                     | 473      | 367               | 342               | 0,025                         | 0                     |
| 451         | 366               | 339               | 0,003                         | 0                     | -        | -                 | -                 | -                             | -                     |

Fonte: Baquero (2012)

Tabela 32 - Dados de condutores do sistema de 417 barras

| Tipo<br>Condutor | Capacidade<br>(A) | Resistência<br>( $\Omega$ /Km) | Reatância<br>( $\Omega$ /Km) | Custo<br>(R\$/Km) |
|------------------|-------------------|--------------------------------|------------------------------|-------------------|
| 1                | 200               | 0,3655                         | 0,2520                       | 20000             |
| 2                | 300               | 0,2921                         | 0,2466                       | 30000             |
| 3                | 400               | 0,2359                         | 0,2402                       | 40000             |
| 4                | 500               | 0,1932                         | 0,2279                       | 50000             |

Fonte: Baquero (2012)

Tabela 33 - Dados de subestações existentes do sistema de 417 barras

| Barra | Capacidade<br>Inicial<br>(MVA) | Capacidade<br>Proposta<br>(MVA) | Custo<br>de expansão<br>(10 <sup>3</sup> R\$) |
|-------|--------------------------------|---------------------------------|---|
| 415   | 40,00                          | -                               | -   |
| 417   | 40,00                          | -                               | -   |

Fonte: Baquero (2012)

Tabela 34 - Dados de subestação proposta do sistema de 417 barras

| Barra | Capacidade<br>Alternativa 1<br>(MVA) | Capacidade<br>Alternativa 2<br>(MVA) | Custo de construção<br>Alternativa 1<br>(10 <sup>3</sup> R\$) | Custo de construção<br>Alternativa 2<br>(10 <sup>3</sup> R\$) |
|-------|--------------------------------------|--------------------------------------|---|---|
| 416   | 8,00                                 | 40,00                                | 2000  | 6000  |

Fonte: Baquero (2012)

Tabela 35 - Custo com recondutoramento do sistema de 417 barras

| Tipo de condutor | 1 | 2  | 3  | 4  |
|------------------|---|----|----|----|
| 1                | 0 | 30 | 40 | 50 |
| 2                | 0 | 0  | 40 | 50 |
| 3                | 0 | 0  | 0  | 50 |
| 4                | 0 | 0  | 0  | 0  |

Fonte: Baquero (2012)

**ANEXO VI - Dados do Sistema de 417 Barras.**

Tabela 36 - Dados de barra do sistema de 27 barras

| Barra<br><i>i</i> | $S_{D_i}$ (kVA) |           |           | Número de consumidores |           |           |
|-------------------|-----------------|-----------|-----------|------------------------|-----------|-----------|
|                   | Estágio 1       | Estágio 2 | Estágio 3 | Estágio 1              | Estágio 2 | Estágio 3 |
| 1                 | 1200            | 1200      | 1200      | 100                    | 100       | 100       |
| 2                 | 0               | 1200      | 1200      | 0                      | 10        | 10        |
| 3                 | 0               | 0         | 1200      | 0                      | 0         | 50        |
| 4                 | 1200            | 1200      | 1200      | 10                     | 10        | 10        |
| 5                 | 1200            | 1200      | 1200      | 50                     | 50        | 50        |
| 6                 | 1200            | 1200      | 1200      | 30                     | 30        | 30        |
| 7                 | 0               | 1200      | 1200      | 0                      | 10        | 10        |
| 8                 | 1200            | 1200      | 1200      | 50                     | 50        | 50        |
| 9                 | 0               | 1200      | 2400      | 0                      | 50        | 100       |
| 10                | 0               | 0         | 2400      | 0                      | 0         | 10        |
| 11                | 1200            | 1200      | 2400      | 50                     | 50        | 70        |
| 12                | 0               | 1200      | 1200      | 0                      | 50        | 50        |
| 13                | 1200            | 1200      | 2400      | 10                     | 10        | 15        |
| 14                | 0               | 0         | 2400      | 0                      | 0         | 15        |
| 15                | 0               | 0         | 2400      | 0                      | 0         | 15        |
| 16                | 1200            | 1200      | 1200      | 50                     | 50        | 50        |
| 17                | 0               | 1200      | 2400      | 0                      | 10        | 15        |
| 18                | 0               | 0         | 1200      | 0                      | 0         | 20        |
| 19                | 1200            | 1200      | 1200      | 10                     | 10        | 10        |
| 20                | 0               | 1200      | 1200      | 0                      | 50        | 50        |
| 21                | 1200            | 1200      | 1200      | 100                    | 100       | 100       |
| 22                | 0               | 0         | 1200      | 0                      | 0         | 10        |
| 23                | 0               | 0         | 1200      | 0                      | 0         | 10        |
| 24                | 1200            | 1200      | 1200      | 50                     | 50        | 50        |
| 25                | 0               | 0         | 0         | 0                      | 0         | 0         |
| 26                | 0               | 0         | 0         | 0                      | 0         | 0         |
| 27                | 0               | 0         | 0         | 0                      | 0         | 0         |

Fonte: Adaptado de Lotero e Contreras (2011)

Tabela 37 - Custos dos circuitos por tipo do sistema de 27 barras ( $10^3$  US\$)

| Circuito | Barra    | Barra    | $c_{ij}$ | $c_{ij}$ | $c_{ij}$ |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|          | <i>i</i> | <i>j</i> | Cond. 1  | Cond. 2  | Cond. 3  |
| 1        | 1        | 2        | 00       | -        | -        |
| 2        | 2        | 3        | 00       | -        | -        |
| 3        | 3        | 4        | 00       | -        | -        |
| 4        | 5        | 1        | 00       | 20       | 38       |
| 5        | 5        | 6        | 00       | 21       | 39       |
| 6        | 25       | 5        | 00       | 18       | 36       |
| 7        | 12       | 16       | 00       | 22       | 40       |
| 8        | 26       | 12       | 00       | 19       | 37       |
| 9        | 4        | 8        | 90       | 110      | -        |
| 10       | 5        | 10       | 92       | 112      | -        |
| 11       | 6        | 7        | 94       | 114      | -        |
| 12       | 7        | 8        | 96       | 116      | -        |
| 13       | 7        | 26       | 300      | 320      | -        |
| 14       | 8        | 12       | 98       | 118      | -        |
| 15       | 9        | 10       | 100      | 120      | -        |
| 16       | 9        | 13       | 102      | 122      | -        |
| 17       | 9        | 25       | 305      | 325      | -        |
| 18       | 10       | 11       | 104      | 124      | -        |
| 19       | 11       | 22       | 106      | 126      | -        |
| 20       | 11       | 26       | 310      | 330      | -        |
| 21       | 13       | 14       | 108      | 128      | -        |
| 22       | 20       | 25       | 315      | 335      | -        |
| 23       | 14       | 15       | 110      | 130      | -        |
| 24       | 15       | 16       | 112      | 132      | -        |
| 25       | 1        | 17       | 108      | 128      | -        |
| 26       | 3        | 19       | 92       | 112      | -        |
| 27       | 7        | 19       | 112      | 132      | -        |
| 28       | 17       | 18       | 90       | 110      | -        |
| 29       | 25       | 18       | 300      | 320      | -        |
| 30       | 13       | 20       | 102      | 122      | -        |
| 31       | 10       | 21       | 92       | 112      | -        |
| 32       | 14       | 21       | 110      | 130      | -        |
| 33       | 27       | 21       | 300      | 320      | -        |
| 34       | 10       | 22       | 90       | 110      | -        |
| 35       | 22       | 23       | 106      | 126      | -        |
| 36       | 27       | 23       | 300      | 320      | -        |
| 37       | 15       | 23       | 106      | 126      | -        |
| 38       | 23       | 24       | 94       | 114      | -        |
| 39       | 12       | 24       | 102      | 122      | -        |

Fonte: Adaptado de Lotero e Contreras (2011)

Tabela 38 - Dados de condutores do sistema do sistema de 27 barras

| <b>Tipo Conductor</b> | <b>Capacidade (A)</b> | <b>Resistência (<math>\Omega</math>)</b> | <b>Reatância (<math>\Omega</math>)</b> |
|-----------------------|-----------------------|--|--|
| 1                     | 434,7826              | 0,76                                     | 0,6499                                 |
| 2                     | 695,6525              | 0,44                                     | 0,5444                                 |
| 3                     | 869,5652              | 0,25                                     | 0,4330                                 |

Fonte: Adaptado de Lotero e Contreras (2011)

Tabela 39 - Dados de subestações existentes do sistema do sistema de 27 barras

| <b>Barra</b> | <b>Capacidade Inicial (MVA)</b> | <b>Capacidade Proposta 1 (MVA)</b> | <b>Capacidade Proposta 2 (MVA)</b> | <b>Custo Alternativa 1 (US\$)</b> | <b>Custo Alternativa 2 (US\$)</b> |
|--------------|---------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 25           | 15,00                           | 22,50                              | 27,00                              | 425000                            | 650000                            |
| 26           | 15,00                           | 22,50                              | 27,00                              | 445000                            | 670000                            |

Fonte: Adaptado de Lotero e Contreras (2011)

Tabela 40 - Dados de subestação proposta do sistema do sistema de 27 barras

| <b>Barra</b> | <b>Capacidade Alternativa 1 (MVA)</b> | <b>Capacidade Alternativa 2 (MVA)</b> | <b>Custo de construção Alternativa 1 (US\$)</b> | <b>Custo de construção Alternativa 2 (US\$)</b> |
|--------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---|---|
| 27           | 7,50                                  | 12,00                                 | 445000  | 670000  |

Fonte: Adaptado de Lotero e Contreras (2011)