

**JOHNNY EDWARD VILLAVICENCIO TAFUR**

**FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA  
PLANEJAMENTO E AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE  
MEDIÇÃO PARA ESTIMAÇÃO DE ESTADO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre, Área de concentração: Aplicações (Computação em Potência).

Orientadores:

Prof. Julio Cesar Stacchini de Souza, D.Sc.

Prof. Milton Brown do Coutto Filho, D.Sc.

**Niterói**

**2006**

Ficha Catalográfica elaborada pela Biblioteca da Escola de Engenharia e Instituto de  
Computação da UFF

V727 Villavicencio Tafur, Johnny Edward.  
Ferramenta computacional para planejamento e avaliação de  
sistemas de medição para estimação de estado / Johnny  
Edward Villavicencio Tafur. – Niterói, RJ : [s.n.], 2006.  
130 f.  
Orientadores: Julio César Stacchini de Souza e Milton Brown do  
Coutto Filho.  
Dissertação (Mestrado em Computação) - Universidade Federal  
Fluminense, 2006.

**FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA  
PLANEJAMENTO E AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO  
PARA ESTIMAÇÃO DE ESTADO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre, Área de concentração: Aplicações (Computação em Potência).

Aprovada em 24 de Julho de 2006

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Julio Cesar Stacchini de Souza, D. Sc. – Orientador  
UFF – Universidade Federal Fluminense

---

Prof. Milton Brown Do Coutto Filho, D. Sc. – Orientador  
UFF – Universidade Federal Fluminense

---

Prof. Marcus Theodor Schilling, D. Sc.  
UFF – Universidade Federal Fluminense

---

Prof<sup>a</sup> Carmen Lucia Tancredo Borges, D. Sc.  
COPPE/UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

---

Prof. Armando Martins Leite da Silva, Ph. D.  
UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá

A meus queridos pais Lucila e Jorge e a minha querida irmã Erika, pela orientação, apoio, incentivo e compreensão.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, por sua constante presença em minha vida, guiando-me sempre em todos os momentos da minha vida.

Aos meus orientadores, Prof. Julio César Stacchini de Souza e Prof. Milton Brown Do Coutto Filho, pelo acompanhamento e orientação técnica.

À Márcia Regina, pelo carinho, compreensão, apoio e dedicação.

Aos amigos, pelo incentivo e companheirismo em todas as minhas conquistas.

A todos aqueles que direta ou indiretamente colaboraram na execução deste trabalho.

## RESUMO

A Estimação de Estado compreende aplicativos responsáveis pela construção de uma base de dados completa e confiável a ser utilizada por funções avançadas em um Sistema de Gerenciamento de Energia. A redundância dos dados é fundamental para o sucesso da Estimação de Estado. Com um nível adequado de redundância, a Estimação de Estado pode lidar com o problema da detecção, identificação e eliminação de erros grosseiros, além de permitir que a perda temporária de medidas não comprometa a qualidade/confiabilidade das estimativas produzidas. A redundância é avaliada considerando-se número, tipo e distribuição topológica dos pontos de medição.

Sistemas de medição altamente redundantes são sempre desejáveis. Uma vez que a quantidade de dados está diretamente relacionada ao investimento em equipamentos de medição e transmissão de informações, muitas vezes a redundância sofre cortes quando da revisão gerencial de alocação de fundos. Por outro lado, durante a operação dos sistemas, mudanças na configuração da rede ou um funcionamento temporariamente inadequado do sistema de aquisição de dados reduzem o nível de redundância para a Estimação de Estado. Até mesmo *níveis críticos* podem ser alcançados, caracterizando situações de *perda iminente de observabilidade* e conseqüente desempenho inadequado de rotinas de processamento de erros grosseiros.

Este trabalho descreve o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para o planejamento e avaliação de sistemas de medição destinados à função Estimação de Estado. Tal ferramenta visa facilitar a análise de diversas alternativas de interesse de um projetista, oriundas da necessidade de conciliação de aspectos conflitantes como o atendimento a requisitos de desempenho da Estimação de Estado frente a custos associados.

## **ABSTRACT**

State Estimation is responsible for constructing a complete and reliable database, which will be used by other functions in an Energy Management System. Data redundancy is crucial for the success of state Estimation. With an adequate redundancy, State Estimation can detect, identify and suppress bad data. Besides, the quality/reliability of the estimated quantities is not affected in case of a temporary loss of measurements. Redundancy level is evaluated considering the number, type and location of meters in the network.

Metering systems with a high redundancy level are always desirable. As it is related to the investments on metering and communication equipments, many times redundancy level is reduced due to financial constraints. On the other hand, during power systems operation, topology changes or data acquisition system malfunctions may also reduce the data redundancy for State Estimation. Even critical levels may be reached, where loss of observability is imminent and bad data processing routines do not work properly.

This work describes the development of a computational tool for the design and evaluation of metering systems. The developed tool aims to help the designer on the analyses of different metering plans, taking into account the need to establish adequate trade-offs between the expected performance of the State Estimation function employs and the associated investments costs.

| <b>ÍNDICE</b>                          | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| <b>Capítulo 1 INTRODUÇÃO</b>           |             |
| 1.1 Considerações Gerais               | 1           |
| 1.2 Desenvolvimento Histórico          | 3           |
| 1.3 Objetivo                           | 9           |
| 1.4 Estrutura da Dissertação           | 10          |
| <b>Capítulo 2 ESTIMAÇÃO DE ESTADO</b>  |             |
| 2.1 Introdução                         | 12          |
| 2.2 Etapas                             | 13          |
| 2.2.1 Pré-filtragem                    | 13          |
| 2.2.2 Observabilidade                  | 13          |
| 2.2.3 Filtragem                        | 13          |
| 2.2.4 Análise de Resíduos              | 14          |
| 2.3 Estimação de Estado Não Linear     | 15          |
| 2.4 Estimação de Estado Linear         | 17          |
| 2.5 Análise de Observabilidade da Rede | 18          |
| 2.6 Filtragem do Estado                | 21          |
| 2.7 Detecção de Erros                  | 22          |
| 2.8 Análise de Resíduos                | 23          |
| 2.9 Conclusões                         | 24          |
| <b>Capítulo 3 ALGORITMOS GENÉTICOS</b> |             |
| 3.1 Introdução                         | 25          |
| 3.2 Conceitos Básicos                  | 27          |
| 3.3 Operações                          | 29          |
| 3.4 Componentes                        | 30          |
| 3.4.1 Módulo de Avaliação              | 31          |
| 3.4.2 Módulo de Estruturação           | 31          |
| 3.4.3 Módulo de Reprodução             | 33          |
| 3.5 Parâmetros                         | 35          |
| 3.5.1 Tamanho da População             | 35          |
| 3.5.2 Taxa de Cruzamento               | 36          |
| 3.5.3 Taxa de Mutação                  | 36          |
| 3.6 Características                    | 36          |

|   |    |
|---|----|
| 3.7 Conclusões  | 37 |
| <b>Capítulo 4 PLANEJAMENTO E AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO</b> |    |
| 4.1 Introdução  | 38 |
| 4.2 Formulação do Problema  | 38 |
| 4.3 Definição de Requisitos                                       | 40 |
| 4.4 Consideração de Áreas de Interesse                            | 42 |
| 4.5 Atendimento aos Requisitos de Desempenho                      | 42 |
| 4.5.1 Observabilidade   | 43 |
| 4.5.2 Ausência de Medidas Críticas                                | 43 |
| 4.5.3 Ausência de Conjuntos Críticos                              | 43 |
| 4.5.4 Comentários   | 44 |
| 4.6 Consideração de Múltiplos Cenários Topológicos de Interesse   | 45 |
| 4.6.1 Observabilidade   | 45 |
| 4.6.2 Ausência de Medidas Críticas                                | 46 |
| 4.6.3 Ausência de Medidas em Conjuntos Críticos                   | 46 |
| 4.7 Definição da Função de Aptidão                                | 47 |
| 4.8 Codificação da solução  | 50 |
| 4.9 Conclusões  | 51 |
| <b>Capítulo 5 IMPLEMENTAÇÃO DO APLICATIVO PLANMED</b>             |    |
| 5.1 Introdução  | 52 |
| 5.2 Etapa Inicial   | 52 |
| 5.3 Assistente para Configuração de Cenários Topológicos          | 54 |
| 5.3.1 Definição do Cenário Principal.                             | 55 |
| 5.3.2 Organização do Mapa Topológico                              | 58 |
| 5.3.3 Cenários alternativos                                       | 59 |
| 5.3.4 Áreas de Interesse  | 61 |
| 5.3.5 Medidores Existentes  | 63 |
| 5.3.6 Definição de Custos e Resumo do Caso em Estudo              | 63 |
| 5.4 Planejamento do Sistema de Medição                            | 64 |
| 5.4.1 Requisitos para a Avaliação Cada Cenário Topológico.        | 65 |
| 5.4.2 Escolha das Áreas de Interesse consideradas prioritárias.   | 67 |
| 5.4.3 Definição de Parâmetros                                     | 68 |
| 5.4.4 Escolha do Tipo de Avaliação                                | 70 |
| 5.4.5 Execução do AG  | 71 |

|   |     |
|---|-----|
| 5.4.6 Resultado Gráfico                               | 74  |
| 5.5 Avaliação do Sistema de Medição                   | 76  |
| 5.6 Conclusões  | 82  |
| <b>Capítulo 6 SIMULAÇÕES E TESTES</b>                 |     |
| 6.1 Introdução  | 83  |
| 6.2 Simulação com o Sistema IEEE-14                   | 84  |
| 6.2.1 Sem Considerar Áreas de Interesse               | 86  |
| 6.2.2 Considerando Áreas de Interesse                 | 90  |
| 6.2.3 Considerando Cenários Alternativos de Interesse | 103 |
| 6.3 Simulação com o Sistema IEEE-118                  | 108 |
| 6.3.1 Sem Considerar Áreas de Interesse               | 110 |
| 6.3.2 Considerando Áreas de Interesse                 | 111 |
| 6.4 Análise Comparativa das Simulações                | 118 |
| 6.4.1 Sistema IEEE-14                                 | 118 |
| 6.4.2 Sistema IEEE-118                                | 118 |
| 6.5 Comentário sobre o Resultado das Simulações       | 119 |
| <b>Capítulo 7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b>      |     |
| 7.1 Conclusões  | 121 |
| 7.2 Principais Contribuições                          | 122 |
| 7.3 Propostas para Trabalhos Futuros                  | 123 |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>                     | 124 |

## LISTA DE FIGURAS

Pág.

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.1: Etapas básicas do processo de EE.   | 4  |
| Figura 3.1: Algoritmo Genético básico.  | 30 |
| Figura 3.2: Representação Gráfica da Roleta.  | 32 |
| Figura 3.3: Exemplo de cruzamento do cromossomo.  | 34 |
| Figura 3.4: Exemplo de mutação do cromossomo.   | 35 |
| Figura 5.1: Ícone de acesso ao aplicativo PLANMED.  | 53 |
| Figura 5.2: Opções iniciais do aplicativo PLANMED.  | 53 |
| Figura 5.3: Opções do menu principal do aplicativo PLANMED.   | 54 |
| Figura 5.4: Opção “Assistente para configuração de cenários topológicos”.                                       | 55 |
| Figura 5.5: Janela para a definição do Cenário Principal.   | 55 |
| Figura 5.6: Opção para adição de barras no mapa topológico.   | 56 |
| Figura 5.7: Exemplo da conexão da barra 1 com as barras 2 e 3.  | 56 |
| Figura 5.8: Conexões e medidores que se referem a uma mesmo ramo de transmissão.                                | 57 |
| Figura 5.9: Tipos de medidores e suas representações.   | 57 |
| Figura 5.10: Opção para criação de um cenário topológico através de arquivos txt.                               | 58 |
| Figura 5.11: Janela para o ajuste de visualização.  | 58 |
| Figura 5.12: Opções para o ajuste da visualização da topologia da rede.   | 59 |
| Figura 5.13: Janela para definição de cenários alternativos.  | 60 |
| Figura 5.14: Opção para adição de um novo cenário topológico.   | 60 |
| Figura 5.15: Representação da saída de serviço de linhas de transmissão para um cenário topológico alternativo. | 61 |
| Figura 5.16: Janela para especificação de áreas de interesse.   | 61 |
| Figura 5.17: Opção para adição de uma nova área.  | 62 |
| Figura 5.18: Exemplo do agrupamento de barras em áreas de interesse.  | 62 |
| Figura 5.19: Exemplo do agrupamento das barras em áreas de interesse.   | 63 |
| Figura 5.20: Janela do Resumo e definição de custos do cenário topológico.                                      | 64 |
| Figura 5.21: Opção para iniciar o sistema de planejamento do sistema de medição.                                | 64 |
| Figura 5.22: Janela principal da opção de Planejamento.   | 65 |
| Figura 5.23: Lista de cenários topológicos e as opções disponíveis  |    |

|   |    |
|---|----|
| para avaliação.   | 66 |
| Figura 5.24: Linhas fora de serviço que diferenciam o Cenário 1 com o Cenário 2.                    | 67 |
| Figura 5.25: Seleção de áreas de interesse consideradas no planejamento.                            | 67 |
| Figura 5.26: Definição de parâmetros do AG e do sistema planejador.                                 | 68 |
| Figura 5.27: Principais opções no planejamento do sistema de medição.                               | 71 |
| Figura 5.28: Janela para execução do Planejamento no AG.  | 71 |
| Figura 5.29: Controle da Execução do Algoritmo Genético.  | 72 |
| Figura 5.30: Processo evolutivo do custo obtido no algoritmo genético em cada geração.              | 73 |
| Figura 5.31: Controle da execução do Algoritmo Genético.  | 74 |
| Figura 5.32: Mensagem indicando o término do planejamento.  | 74 |
| Figura 5.33: Resultado da execução do Planejamento.   | 75 |
| Figura 5.34: Opção para exportar o resultado do planejamento.                                       | 75 |
| Figura 5.35: Opção para a avaliação de sistemas de medição.   | 76 |
| Figura 5.36: Janela principal da opção para a avaliação de sistemas de medição.                     | 77 |
| Figura 5.37: Seleção de medidores existentes no cenário topológico.                                 | 78 |
| Figura 5.38: Seleção de medidores existentes no cenário topológico.                                 | 78 |
| Figura 5.39: Resultado parcial do processo de avaliação.  | 79 |
| Figura 5.40: Janela do resultado da avaliação.  | 80 |
| Figura 5.41: Representação de Medidas Críticas.   | 80 |
| Figura 5.42: Representação de Medidas em Conjuntos Críticos.  | 80 |
| Figura 5.43: Opções para apresentação dos resultados da avaliação.                                  | 81 |
| Figura 5.44: Tipos de representações para os resultados da avaliação.                               | 81 |
| Figura 6.1: Sistema IEEE de 14 barras e 20 ramos.   | 84 |
| Figura 6.2: Parâmetros do Algoritmo Genético para o sistema IEEE-14.                                | 85 |
| Figura 6.3: Parâmetros do sistema de planejamento.  | 85 |
| Figura 6.4: Opções principais do sistema de planejamento para o sistema IEEE-14.                    | 86 |
| Figura 6.5: Resultado do atendimento ao requisito de observabilidade, sistema IEEE-14.              | 87 |
| Figura 6.6: Resultado do atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas, sistema IEEE-14. | 88 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 6.7: Resultado do atendimento ao requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos, sistema IEEE-14.                               | 89  |
| Figura 6.8: Cenário topológico considerando três áreas de interesse, sistema IEEE-14.  | 90  |
| Figura 6.9: Resultado do atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas na área 1.   | 91  |
| Figura 6.10: Resultado da do atendimento ao requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos na área 1.                                  | 92  |
| Figura 6.11: Resultado do atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas na área 2.  | 93  |
| Figura 6.12: Resultado do atendimento ao requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos na área 2.                                     | 94  |
| Figura 6.13: Resultado do atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas na área 3.  | 95  |
| Figura 6.14: Resultado do atendimento ao requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos na área 3.                                     | 96  |
| Figura 6.15: Resultado do atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas nas áreas 1 e 2.  | 97  |
| Figura 6.16: Resultado do atendimento ao requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos nas áreas 1 e 2.                               | 98  |
| Figura 6.17: Resultado do atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas nas áreas 2 e 3.  | 99  |
| Figura 6.18: Resultado da do atendimento ao requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos nas áreas 2 e 3.                            | 100 |
| Figura 6.19: Resultado do atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas nas áreas 1 e 3.  | 101 |
| Figura 6.20: Resultado do atendimento ao requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos nas áreas 1 e 3.                               | 102 |
| Figura 6.21: Resultado do atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas nos grupos A, B e C de cenários topológicos alternativos.   | 104 |
| Figura 6.22: Resultado do atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas no grupo A e requisito de observabilidade nos grupos B e C. | 105 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 6.23: Resultado do atendimento ao requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos nos grupos A e B e ausência de medidas críticas no grupo C. | 106 |
| Figura 6.24: Resultado do atendimento ao requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos no grupo A e observabilidade nos grupos B e C.              | 107 |
| Figura 6.25: Sistema IEEE-118   | 108 |
| Figura 6.26: Parâmetros do Algoritmo Genético do sistema IEEE-118.  | 109 |
| Figura 6.27: Parâmetros do Sistema de Planejamento.   | 109 |
| Figura 6.28: Análise comparativa dos requisitos de ausência de medidas críticas e ausência de medidas em conjuntos críticos do sistema IEEE-14.             | 118 |
| Figura 6.29: Análise comparativa dos requisitos de ausência de medidas críticas e ausência de medidas em conjuntos críticos do sistema IEEE-118.            | 119 |

| <b>LISTA DE TABELAS</b>   | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| Tabela 3.1: Exemplo para ilustrar a seleção por roleta.   | 32          |
| Tabela 6.1: Resultado para o requisito de observabilidade.  | 87          |
| Tabela 6.2: Resultado para o requisito de ausência de medidas críticas.   | 88          |
| Tabela 6.3: Resultado para o requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos.  | 89          |
| Tabela 6.4: Atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas na área 1.   | 91          |
| Tabela 6.5: Resultado para o requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos na área 1.                                    | 92          |
| Tabela 6.6: Resultado para o requisito de ausência de medidas críticas na área 2.   | 93          |
| Tabela 6.7: Resultado para o requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos na área 2.                                    | 94          |
| Tabela 6.8: Resultado para o requisito de ausência de medidas críticas na área 3.   | 95          |
| Tabela 6.9: Resultado para o requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos na área 3.                                    | 96          |
| Tabela 6.10: Resultado para o requisito de ausência de medidas críticas nas áreas 1 e 2.  | 97          |
| Tabela 6.11: Resultado para o requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos nas áreas 1 e 2.                             | 98          |
| Tabela 6.12: Resultado para o requisito de ausência de medidas críticas nas áreas 2 e 3.  | 99          |
| Tabela 6.13: Resultado para o requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos nas áreas 2 e 3.                             | 100         |
| Tabela 6.14: Resultado para o requisito de ausência de medidas críticas nas áreas 1 e 3.  | 101         |
| Tabela 6.15: Resultado para o requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos nas áreas 1 e 3.                             | 102         |
| Tabela 6.16: Cenários alternativos.   | 106         |
| Tabela 6.17: Resultado para o requisito de ausência de medidas críticas nos grupos A, B e C de cenários topológicos alternativos. | 104         |

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 6.18: Resultado para o requisito de ausência de medidas críticas para o grupo A e observabilidade nos grupos B e C.                       | 105 |
| Tabela 6.19: Resultado para o requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos nos grupos A e B e ausência de medidas críticas no grupo C. | 106 |
| Tabela 6.20: Resultado para o requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos no grupo A e observabilidade nos grupos B e C.              | 107 |
| Tabela 6.21: Resultado para o requisito de observabilidade.  | 110 |
| Tabela 6.22: Resultado para o requisito de ausência de medidas críticas.   | 110 |
| Tabela 6.23: Resultado para o requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos sem áreas.  | 110 |
| Tabela 6.24: Resultado para o requisito de ausência de medidas críticas na área 1.   | 111 |
| Tabela 6.25: Resultado para o requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos na área 1.  | 112 |
| Tabela 6.26: Resultado para o requisito de ausência de medidas críticas na área 2.   | 112 |
| Tabela 6.27: Resultado para o requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos na área 2.  | 113 |
| Tabela 6.28: Resultado para o requisito de ausência de medidas críticas na área 3.   | 113 |
| Tabela 6.29: Resultado para o requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos na área 3.  | 114 |
| Tabela 6.30: Resultado para o requisito de ausência de medidas críticas nas áreas 1 e 2.   | 114 |
| Tabela 6.31: Resultado para o requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos nas áreas 1 e 2.  | 115 |
| Tabela 6.32: Resultado para o requisito de ausência de medidas críticas nas áreas 2 e 3.   | 115 |
| Tabela 6.33: Resultado para o requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos nas áreas 2 e 3.  | 116 |
| Tabela 6.34: Resultado para o requisito de ausência de medidas críticas nas áreas 1 e 3.   | 116 |

Tabela 6.35: Resultado para o requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos nas áreas 1 e 3.

117

## LISTA DOS PRINCIPAIS SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

|                  |   |
|------------------|---|
| $nb$             | número de barras  |
| $m$              | número de medidas   |
| $n$              | número de variáveis de estado                               |
| $z$              | vetor das medidas   |
| $x$              | vetor de estado   |
| $\hat{x}$        | vetor de estado filtrado                                    |
| $\hat{z}$        | vetor de medidas filtradas                                  |
| $h$              | vetor das funções não lineares que relaciona $x$ e $z$      |
| $\varepsilon$    | vetor de erros ou incertezas nas medidas                    |
| $R$              | matriz de covariância de $\varepsilon$                      |
| $E\{.\}$         | operador valor esperado                                     |
| $H$              | matriz jacobiana  |
| $G$              | matriz ganho  |
| $r$              | vetor dos resíduos  |
| $r_N$            | resíduo normalizado   |
| $E$              | matriz de covariância dos resíduos                          |
| $U$              | matriz identidade   |
| $C_{med}$        | custo dos medidores a instalar                              |
| $C_{UTR}$        | custo das unidades terminais remotas a instalar             |
| $P_{obs}$        | penalidade imposta a planos de medição não observáveis      |
| $N_{med}$        | número de medidas críticas presentes em um plano de medição |
| $P_{med}$        | penalidade associada à presença de medidas críticas.        |
| $N_{med_{conj}}$ | número total de medidas pertencentes a conjuntos críticos   |
| $P_{conj}$       | penalidade associada à presença de conjuntos críticos       |

|            |   |
|------------|---|
| $P_{area}$ | peso da prioridade da área de interesse                       |
| mCrit      | número de medidas críticas pertencentes a um plano de medição |
| cCrit      | número de medidas em conjuntos críticos de plano de medição   |
| SCADA      | Supervisory Control and Data Acquisition                      |
| EE         | Estimação de Estado   |
| COS        | Centro(s) de Operação de Sistemas                             |
| EG         | Erro Grosseiro  |
| MQP        | Mínimos Quadrados Ponderados                                  |
| UTR        | Unidade Terminal Remota                                       |
| AG         | Algoritmo Genético  |
| SGE        | Sistema de Gerenciamento de Energia                           |

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

---

### 1.1 Considerações Gerais

Mudanças ocorridas no setor elétrico alteraram significativamente a forma de atuação das empresas de energia elétrica. Tais mudanças originaram-se principalmente no desejo governamental de introduzir agentes privados no setor, justificado em parte pelo atendimento a consumidores que buscam por mais de uma opção de fornecimento do serviço, contratado a preços atraentes. Surgiu então um ambiente de negócios, com novas regras de conduta, em essência marcado pela competição de seus participantes que procuram entregar mais mercadorias (blocos de energia), oferecidas em espaço de tempo mais curto, usando menos recursos (capital, pessoal, instalações e equipamentos).

No que concerne aos Centros de Operação de Sistemas (COS), uma nova geração de ferramentas para Sistemas de Gerenciamento de Energia (SGE) vem sendo desenvolvida, levando em conta dificuldades tais como: captura em tempo real de dados provenientes de diversas fontes, com a devida correção de possíveis erros; ajustes de algoritmos necessários ao reparo de possíveis falhas de convergência e produção de resultados com significado prático; avaliação de custos e riscos de cada decisão a ser seguida, etc.

A função Estimação de Estado (EE) tornou-se de fundamental importância para a operação em tempo real dos sistemas de potência atuais, por ser capaz de fornecer dados confiáveis para outras funções avançadas (e.g., aquelas que se ocupam das tarefas de segurança e otimização),

integrantes de SGE [Wu90]. Desde sua origem [Schw70], o problema da EE em sistemas de potência vem sendo estudado intensivamente sob diversos ângulos [Cout90]. Buscando um refinamento do processo de estimação, Alsaç e outros [Alsa98] propuseram um processo de EE generalizada em que a configuração e parâmetros da rede sob supervisão passaram a integrar o estado a ser estimado.

A EE atua basicamente como um filtro para suavizar erros estatisticamente pequenos, corriqueiros, inerentes à medição; suprimir erros grosseiros (EGs), eventuais causados pelo funcionamento inadequado do sistema de aquisição de dados. Como parte do processo de estimação, determina-se também a configuração atual da rede elétrica e sua observabilidade [Mont99].

A redundância dos dados é um dos principais requisitos para o sucesso da EE. O termo redundância refere-se a um excedente de medidas realizadas no sistema em relação a um número mínimo necessário para estimar todas as variáveis de estado. Com um nível adequado de redundância, a EE pode lidar com o problema da detecção, identificação e eliminação de EGs, bem como permitir que a perda temporária de medidas não comprometa a qualidade e confiabilidade das estimativas produzidas. A redundância é avaliada considerando-se o número, tipo e distribuição topológica de medidores na rede sob supervisão [Sarm94].

Na EE, processar dados com alto grau de redundância é sempre desejável, contudo nem sempre possível, já que isto requer elevados investimentos para a aquisição de equipamentos de medição e transmissão de informações. Por outro lado, durante a operação, muitas vezes a função EE enfrenta condições de redução de redundância [Cout99] em virtude da indisponibilidade de medidas, o que ocorre naturalmente devido a: perda de dados; eliminação de medidas portadoras de EGs; manutenção de unidades terminais remotas (UTRs); reconfigurações da rede; etc. Até mesmo níveis críticos de redundância podem ser alcançados [Cout01a], caracterizando situações de perda iminente de observabilidade [Cout01b] e conseqüente

desempenho inadequado de rotinas de processamento de EGs [Mat00]. Tais níveis de redundância estão associados à presença de medidas e conjuntos críticos [Simo90]. Uma medida torna-se crítica se sua ausência do conjunto de dados processados leva a rede supervisionada à perda de observabilidade. Um conjunto crítico é definido como sendo aquele formado por um grupo de medidas no qual a remoção de qualquer uma destas, tornam críticas todas as remanescentes do grupo.

As principais implicações da presença de medidas críticas e conjuntos críticos no processo de EE são [Simo90]:

- Condições de perda iminente de observabilidade são reveladas;
- EGs em medidas críticas não são detectados pela análise de resíduos da estimação;
- Um EG em qualquer uma das medidas pertencentes a um conjunto crítico não é corretamente identificado pela análise de resíduos.

A presente dissertação trata do problema de como planejar a configuração/expansão de sistemas de medição com um mínimo custo. A solução deste problema deve se caracterizar pela obtenção da melhor distribuição de medidores na rede de interesse, permitindo a construção de um processo bem sucedido de EE, avaliado segundo os requisitos de observabilidade e confiabilidade dos resultados produzidos, considerando os custos de medição envolvidos.

Na próxima seção será apresentado um levantamento sobre as principais publicações relativas ao problema do planejamento de sistemas de medição.

## **1.2 Desenvolvimento Histórico**

Os COS atuais mostram o progresso significativo alcançado pela área de tecnologia da informação. Computadores com alta capacidade de processamento e armazenamento de informações, distribuídos em rede, com

facilidades gráficas, permitiram o aprimoramento dos SGEs. As funções básicas de tais sistemas dizem respeito a: aquisição e visualização de informações sobre a rede elétrica supervisionada em tempo real; tratamento de mensagens e alarmes; telecomando de abertura/fechamento de chaves e disjuntores, etc.

Os aplicativos de Análise de Redes são os que apresentam funcionalidades mais reconhecidas, estando sempre entre os requisitados pelas empresas de energia elétrica na implementação de um SGE. Para se executar qualquer programa de Análise de Redes, deve-se conhecer a configuração atual da rede sob supervisão. O programa Configurador da Rede é o responsável por esta tarefa, processando as informações relativas às conexões físicas dos elementos que compõem a rede e os estados (aberto/fechado) destas (telessinalizações). Conhecida a configuração da rede, passa-se à obtenção do estado operativo do sistema, caracterizado pelas tensões nodais complexas (ângulo e magnitude das tensões das barras). O programa responsável por tal tarefa denomina-se Estimador de Estado.

A função EE processa periodicamente medidas de fluxo e injeção de potência ativa e reativa, assim como de magnitude de tensão. Tradicionalmente, o processo de estimação é realizado através do Método dos Mínimos Quadrados Ponderados [Bose87, Mont99]. Para que este processamento seja efetivo é necessário que o referido conjunto de medidas seja redundante o suficiente para que sejam obtidas estimativas confiáveis e que correspondam a toda rede supervisionada. Distribuir tais medidas, considerando tipo e quantidade, é o problema que se busca resolver nesta dissertação.

O problema do planejamento de sistemas de medição para fins de supervisão em tempo-real é bastante complexo. Isto decorre não apenas da dimensão do problema (de natureza combinatória, em razão do elevado número de possíveis configurações do sistema de medição), como também da necessidade de se estabelecer um compromisso entre o desempenho do Estimador de Estado e o custo do sistema de medição necessário para garantir

tal desempenho. Medidas devem ser localizadas em diversos pontos do sistema e integradas ao sistema de aquisição de dados (SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition) para que os dados obtidos em tempo-real cheguem ao COS para processamento. Estas medidas são determinadas em termos do tipo, distribuição topológica e redundância, considerando os seguintes requisitos:

- Observabilidade – de forma a permitir que o sistema seja supervisionado como um todo;
- Confiabilidade – para tornar possível a detecção, identificação e supressão de EGs;
- Qualidade – de modo a garantir certo nível de precisão para as grandezas estimadas;
- Robustez – para assegurar um nível de redundância, através do qual os requisitos anteriores (observabilidade, confiabilidade e qualidade) ainda sejam atendidos, caso exista indisponibilidade de medidas, mudanças na configuração da rede e/ou funcionamento inadequado do sistema de aquisição de dados;
- Custo – para que o total de investimento no sistema de medição (medidores, UTRs, sistemas de comunicação, etc.) seja minimizado.

Desta forma, o planejamento de um sistema de medição é uma tarefa de vital importância e uma das mais difíceis para a construção de um processo bem sucedido de EE, não apenas pelo porte do problema, como também pelo caráter antagônico existente entre o custo de investimentos e demais requisitos. Assim sendo, muitas vezes a formulação do problema de localização ótima de medidores tem sido realizada de forma não rigorosa ou incompleta [Clem90].

A literatura técnica aponta uma série de métodos que abordam o problema da localização de medidores para a EE. A seguir, passam a ser apontados aqueles com citação recorrente pelos pesquisadores da área.

Os primeiros métodos propostos para projetar um sistema de medição consideraram o desempenho da EE avaliado através de critérios tais como: matriz de covariância do erro na estimação do estado [Schw70], condicionamento numérico da matriz ganho [Edel75] e disponibilidade de pontos de medição [Aria75]. Em [Hand75], foi proposto um critério para a seleção de medidores que permite aumentar a capacidade de processamento de EGs. Tais métodos adotaram a técnica da tentativa e erro para selecionar pontos de medição, não garantindo que o ótimo global fosse alcançado. Além disso, o requisito de custo foi tratado como um problema em separado.

Uma abordagem mais ampla em relação às anteriormente citadas, em princípio permitindo considerar aspectos técnicos e financeiros, foi proposta em [Kogl75]. O requisito de qualidade é definido em termos de grandezas de interesse estabelecidas pelo projetista do sistema e o processo de otimização conduzido através da eliminação sistemática de possíveis medidas do sistema. Em [Aam83], o método de Koglin é estendido para a obtenção de um sistema de medição mais adequado em termos da indisponibilidade de medidas e confiabilidade. Nesta referência encontra-se também uma comparação entre alguns métodos para a localização de medidores. Em [Park88], utilizou-se o algoritmo de Koglin para considerar conjuntamente os requisitos de qualidade e custo.

Outras referências do período inicial de pesquisa em localização ótima de medidores são [Fetz75] e [Phua77]. Fetzter desenvolveu um método no qual um sistema de medição é ampliado a partir de medidas selecionadas através dos autovalores de uma matriz de observabilidade para a rede supervisionada. Phua e Dillon introduziram um método com base em um critério de avaliação de entropia, através do qual, os requisitos de qualidade e custo foram explicitamente considerados.

Em [Clem82, 83] foi proposto um método de reforço de um sistema de medição, baseado na observabilidade topológica da rede supervisionada. Com o mesmo objetivo, em [Mont85a,b], foi apresentada uma teoria completa sobre observabilidade de uma rede, seguida de um algoritmo para a identificação de

ilhas observáveis e seleção de um conjunto mínimo de medidas adicionais para restabelecer a observabilidade da rede.

Em [Korr84], um sistema de medição é aperfeiçoado levando em conta os requisitos de observabilidade, confiabilidade e robustez. Em [Sarm94], é proposto um método para alocação de unidades terminais remotas (UTRs) que considera a observabilidade da rede, a existência de medidas críticas e a perda de pontos de medição.

Em [Bara95], é apresentado um método para localização de medidores que combinam os requisitos de qualidade, confiabilidade, robustez e custo. Tal método compreende três etapas: na primeira delas, um conjunto mínimo de medidas é selecionado, observando-se o requisito de qualidade; em seguida, medidores são adicionados para cobrir o requisito de indisponibilidade de UTRs; finalizando, mais medidores são selecionados para garantir a confiabilidade do processo de estimação.

Em [Çeli95], um algoritmo para alocação incremental de medidas é proposto, de forma a obter estimativas de melhor qualidade para as variáveis de estado. Nele, barras com estimativas de baixa qualidade são identificadas a partir das variâncias do erro na estimação dos componentes do estado. Uma lista de medidas-candidatas é sugerida para reduzir tais variâncias.

Para planejar um novo sistema de medição ou reforçar algum já existente, em [Crai90] pode-se encontrar um enfoque algébrico para a determinação da robustez do sistema. Expressões gerais para a obtenção do número mínimo de medidas necessárias à realização de uma estimação adequada, caso ocorra a indisponibilidade de uma ou várias medidas, são apresentadas e discutidas.

Em [Abur99], encontra-se um método para o projeto de sistemas de medição que não apenas torna o sistema supervisionado observável, mas também preserva a observabilidade, caso ocorram mudanças na topologia da rede. A solução para o problema é obtida através da construção de um

algoritmo de programação linear que fornece uma configuração de medidores para o sistema completamente observável. Em uma segunda etapa, é proposto um procedimento sistemático de adicionar um número mínimo de medidas que assegure a observabilidade, mesmo na ocorrência de uma contingência simples de qualquer ramo da rede. Em um trabalho posterior [Magn00], os autores propuseram um método para atualização de um sistema de medição que garanta a condição de observabilidade, mesmo que ocorra a perda de um ramo da rede ou de uma medida. O método é numérico e toma por base a triangularização da matriz Jacobiana do processo de estimação resultante da modificação provocada por uma alteração no cenário topológico.

Recentemente, trabalhos de pesquisa de aplicações de Algoritmos Genéticos (AGs) em problemas de sistemas de potência têm surgido de forma constante como revelam as referências [Srin96] e [Mira96]. Em [Gold89], encontram-se os aspectos teóricos que permitem utilizar com sucesso AGs em diversos problemas de modelagem complexa, sendo suficientemente flexível para acomodar quase todas as funções-critério usadas em projetos de sistemas. Em [Ricc99a,b], é proposto um método de solução para o problema da localização de medidores através de AGs. Tal método contempla os requisitos de qualidade, disponibilidade de medições e custo. Já em [Cose00], são propostos planos de medição observáveis, livres de medidas e conjuntos críticos.

Na referencia [Souz03], o uso de AGs garantem um alto grau de confiabilidade no planejamento de um sistema de medição especificamente para um cenário topológico, garantindo a ausência de medidas críticas e conjuntos críticos a um mínimo custo. Em um trabalho posterior [Souz05], foi proposta uma metodologia capaz de realizar o planejamento de sistemas de medição considerando a minimização do custo de investimento e o requisito de confiabilidade, para diferentes cenários topológicos de uma rede elétrica.

Outro método heurístico para a solução do problema de localização ótima de medidores se encontra em [Mori99]. O problema é formulado como o de otimização combinatória, com solução proposta pelo enfoque da Busca

Tabu (BT) [Glov89,90]. O objetivo a ser alcançado foi o de minimizar os termos diagonais da matriz de covariância dos resíduos.

Em [Anto01], propõe-se uma função objetivo simples, considerando a distribuição e o custo de instalação de medidores, cuja minimização alcança-se através da técnica de Recozimento Simulado (*Simulated Annealing*) [Laar87]. Em [Anto00] também foi utilizada a técnica da otimização microcanônica [Barn87].

Do levantamento bibliográfico apresentado sobre o problema da localização de medidores para a EE, pode-se concluir que:

- Trata-se de um problema de otimização bastante complexo, se considerados todos os requisitos necessários a um planejamento adequado de pontos de medição;
- Técnicas que utilizam metaheurísticas aparentam ser mais apropriadas a projetos de sistemas, em virtude de suas características: simplicidade, flexibilidade e robustez. Dentre estas, aquelas que se apóiam em AGs destacam-se como as mais promissoras.

### **1.3 Objetivo**

O objetivo desta dissertação é estender a pesquisa realizada em [Souz05] e desenvolver uma ferramenta computacional para o planejamento e avaliação de sistemas de medição destinados à função EE. Tal ferramenta visa facilitar a análise das diversas alternativas de interesse de um projetista, oriundas da necessidade de conciliação de aspectos conflitantes como o atendimento a requisitos de desempenho da EE frente aos custos associados. A referida extensão diz respeito à redução de custos do sistema de medição através das considerações de áreas prioritárias para supervisão.

O planejamento de sistemas de medição será formulado como um problema de otimização, utilizando-se AGs, e buscando-se encontrar uma configuração de medidores de mínimo custo e redundância adequada, para a

qual requisitos de observabilidade, ausência de medidas e conjuntos críticos sejam atendidos, considerando um ou mais cenários topológicos de interesse. Para uma determinada rede, pode-se também definir áreas de interesse para priorização de investimentos. O planejamento pretendido pode também ser realizado considerando a presença de pontos de medição previamente instalados (expansão do sistema de medição).

No que diz respeito à ferramenta computacional a ser apresentada, busca-se o desenvolvimento de um ambiente interativo de modo a criar facilidades ao usuário, em termos de manipulação de janelas, na entrada de dados numéricos e gráficos para:

- Definição e alterações do sistema topológico a ser supervisionado;
- Definição dos requisitos serem atendidos, assim como os cenários e áreas de interesse;
- Definição de parâmetros associados aos operadores genéticos e à função de aptidão;
- Visualização e análise de resultados.

#### **1.4 Estrutura da Dissertação**

Neste trabalho constam seis capítulos resumidamente descritos a seguir:

Capítulo 2: Revisão de aspectos básicos do problema de Estimação de Estado em centros de operação de sistemas, visando caracterizar alguns elementos necessários a construção de planos de medição adequados.

Capítulo 3: Principais conceitos dos Algoritmos Genéticos, a serem aplicados no problema de otimização referente ao planejamento de sistemas de medição.

Capítulo 4: Metodologia para o planejamento de sistemas de medição utilizando Algoritmos Genéticos.

Capítulo 5: Ferramenta computacional para o planejamento e avaliação de sistemas de medição (PLANMED).

Capítulo 6: Descreve-se os resultados de simulações realizadas com a metodologia e ferramenta apresentadas nos Capítulos 4 e 5, considerando os sistemas IEEE-14 e 118 barras.

Capítulo 7: Principais conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 2

### ESTIMAÇÃO DE ESTADO

---

#### 2.1 Introdução

A concepção do problema de EE em sistemas de potência foi feita por Schweppe nos anos 70 [Schw70]. Na atualidade, a EE pode ser considerada como uma ferramenta fundamental em qualquer SGE.

A Estimação de Estado tem como objetivo processar dados analógicos (medidas) e digitais (status) de uma rede elétrica, obtidos através de um sistema de aquisição de dados (SCADA), para obter o estado mais provável de operação de um sistema elétrico.

A implementação da função de EE fornece ao operador condições de:

- Monitorar o sistema de forma adequada, evitando que sejam tomadas decisões baseadas em medidas errôneas;
- Determinar todas as grandezas de interesse para a operação, mesmo aquelas que não sejam medidas;
- Obter informações completas e confiáveis sobre o sistema para uso de outras funções de supervisão e controle.

Como mencionado anteriormente, a EE atua como um filtro para suavizar erros estatisticamente pequenos, corriqueiros, inerentes à medição, e principalmente, para suprimir EGs eventuais, causados por um funcionamento inadequado do sistema de aquisição de dados. Como parte do processo de

estimação também é determinada a configuração atual da rede elétrica e sua observabilidade. Para cumprir este objetivo, o processo de EE requer fundamentalmente medidas redundantes (fluxos e injeções de potência, magnitudes de tensão) e indicações corretas de *status* (estado) de chaves e disjuntores de acordo com a configuração da rede.

## **2.2 Etapas**

O processo de EE em sistemas de potência pode ser descrito pelas seguintes etapas: Pré-filtragem, Observabilidade, Filtragem e Análise de Resíduos.

### **2.2.1 Pré-filtragem**

Consiste na verificação de limites de aceitabilidade para valores das grandezas. Desta maneira medidas com erros que ultrapassem limites físicos de equipamentos deverão ser eliminadas.

### **2.2.2 Observabilidade**

Avalia-se para o conjunto de medidas disponíveis em um dado instante, se a Estimação de Estado é possível em toda a rede. Caso não seja possível observar a rede como um todo, identificam-se as ilhas observáveis e as medidas (não disponíveis) necessárias para tornar o sistema completamente observável (pseudomedidas).

### **2.2.3 Filtragem**

Etapa onde a estimativa do estado de operação é efetivamente obtida, a partir do conhecimento de um conjunto de grandezas medidas e da configuração da rede.

#### 2.2.4 Análise de Resíduos

Nesta etapa são realizados testes estatísticos para se detectar e identificar possíveis erros na configuração da rede e EGs nas grandezas medidas.

As informações processadas pelo Estimador de Estado encontram-se usualmente em duas bases de dados conforme descreve-se a seguir:

Base de dados estática:

- Parâmetros elétricos dos elementos da rede (linhas de transmissão, transformadores, elementos *shunt*, etc.);
- Conexões entre terminais de todos os elementos.

Base de dados dinâmica:

- Magnitudes de tensão e corrente;
- Injeção de potência ativa e reativa;
- Fluxo de potência ativa e reativa;
- Estado atual de chaves e disjuntores.

Deve-se ressaltar que os resultados do processo de EE são fundamentais para a execução das demais funções de análise de redes em tempo real [Wu90], tais como: análise de segurança, controle corretivo, etc.

A Figura 2.1 resume a seqüência de etapas do processo de EE descritas anteriormente.

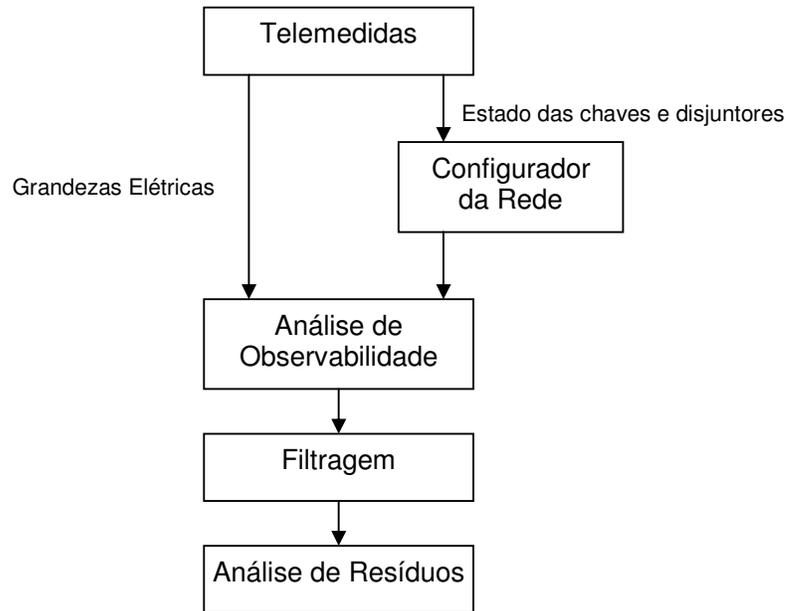


Figura 2.1: **Etapas básicas do processo de EE.**

### 2.3 Estimação de Estado Não Linear

De uma forma geral, o estado de um sistema de potência é caracterizado pelo módulo e ângulo das tensões das barras do sistema. A relação entre medidas e estado verdadeiro é estabelecida pela seguinte equação:

$$z = h(x) + \varepsilon \quad (2.1)$$

Onde:

- $z$  - vetor de medidas, de dimensão  $(m \times 1)$ ;  $m$ =número de medidas;
- $h(.)$  - vetor de funções não-lineares, de dimensão  $(m \times 1)$ , que relacionam o estado verdadeiro com medidas não corrompidas;
- $x$  - vetor de estado, de dimensão  $(n \times 1)$ , representando módulos e ângulos das tensões nodais;
- $n$  =  $2n_b - 1$  (uma barra do sistema é considerada como referência angular e, portanto, seu ângulo não faz parte do processo de estimação);  $n_b$  = número de barras da rede;

- $\varepsilon$  - vetor de erros ou incertezas associadas às medidas  $z$ , modelado como variável aleatória com distribuição normal, de valor esperado zero e matriz de covariância  $R$ ;
- $R = E [\varepsilon \cdot \varepsilon^T] = \text{diag.} (\sigma_i^2)$ , sendo  $E [.]$  o operador esperado  $\sigma_i^2$  variância da  $i$ -ésima medida.

O método normalmente empregado para o processo de EE [Bose87] é o dos Mínimos Quadrados Ponderados (MQP) que utiliza a seguinte função objetivo:

$$J(x) = \sum_{i=1}^m \varepsilon_i^2 \cdot \alpha_i = \sum_{i=1}^m (z_i - h_i(x))^2 \alpha_i \quad (2.2)$$

Sendo:

- $J(x)$  = função objetivo;
- $z_i$  =  $i$ -ésima medida;
- $\alpha_i$  = peso atribuído à  $i$ -ésima medida;
- $m$  = número de medidas.

Em notação matricial:

$$J(x) = [z - h(x)]^T R^{-1} [z - h(x)] \quad (2.3)$$

O problema consiste em obter uma estimativa para o estado  $\hat{x}$  que minimize a função objetivo estabelecida em (2.3):

$$J(\hat{x}) = \underset{x}{\text{Min}} \{ [z - h(x)]^T R^{-1} [z - h(x)] \} \quad (2.4)$$

Para minimizá-la a seguinte condição deve ser atendida:

$$\left. \frac{\partial J(x)}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}} = 0 \quad (2.5)$$

Aplicando a condição (2.5) em (2.3), vem:

$$H^T R^{-1} [z - h(\hat{x})] = 0 \quad (2.6)$$

Definindo  $f(x) = H^T R^{-1} [z - h(x)]$  e usando o método de Newton-Raphson para encontrar  $\hat{x}$  em (2.6), chega-se ao seguinte processo iterativo:

$$x^{(i+1)} = x^{(i)} + K^i \cdot [z - h(x^i)] \quad (2.7)$$

Sendo:

$i$  = contador de iterações;

$K = G^{-1} H^T R^{-1}$

$G = [H^T R^{-1} H]$  matriz Ganho, avaliada em  $x = x^i$ ;

$H = \partial h / \partial x$ , matriz Jacobiano.

A convergência do processo estabelecido por (2.7) é avaliada verificando se a norma do vetor desvio  $|\Delta x^{(i)}| = |x^{(i+1)} - x^{(i)}|$  atende a uma tolerância pré-estabelecida.

## 2.4 Estimação de Estado Linear

Tal classe de estimadores é construída a partir da linearização das equações das medidas.

Para uma determinada configuração da rede elétrica, o estado operativo do sistema e as telemidas a serem processadas se relacionam através de:

$$z = Hx + \varepsilon \quad (2.8)$$

Sendo:

$z$  - vetor de medidas, de dimensão  $(m \times 1)$ ;

$x$  - vetor de estado verdadeiro, de dimensão  $(n \times 1)$ ;

$\varepsilon$  - vetor de erros associados às medidas  $z$ ;

$H$  - matriz Jacobiana de dimensão  $(m \times n)$ , obtida através da linearização das equações de fluxo de potência.

A função objetivo segundo o Método dos Mínimos Quadrados Ponderados (MQP) assume a seguinte forma:

$$J(x) = [z - Hx]^T R^{-1} [z - Hx] \quad (2.9)$$

Busca-se então, a partir da função objetivo definida por (2.9), obter o vetor de estado  $\hat{x}$  que minimize a referida função:

$$-2[z - H\hat{x}]^T R^{-1} H = 0^T \quad (2.10)$$

$$H^T R^{-1} [z - H\hat{x}] = 0 \quad (2.11)$$

$$\hat{x} = G^{-1} H^T R^{-1} z \quad (2.12)$$

Sendo:

$$G = (H^T R^{-1} H) \quad (2.13)$$

A utilização de Estimadores Lineares é mais simples, apresenta um baixo custo computacional e pode ser atraente para a análise de observabilidade e identificação de medidas e conjuntos críticos, problemas que podem ser enfocados sobre o ponto de vista estrutural [Simo90].

## 2.5 Análise de Observabilidade da Rede

O Estimador de Estado tem como parte integrante um módulo para a análise da observabilidade da rede que permite informar se é possível estimar o estado do sistema como um todo, a partir de dados colhidos em tempo real [Mont85]. O sucesso do processo de EE depende da disponibilidade de um conjunto de medidas em quantidade suficiente (redundância de medidas) e da sua adequada distribuição pela rede.

Se  $n$  variáveis devem ser observadas, então deverão existir pelo menos  $n$  equações lineares independentes relacionando tais variáveis. Antes da etapa de filtragem deve-se verificar as condições de observabilidade da rede sob

supervisão, considerando as telemidas recebidas para processamento. A análise da observabilidade consiste portanto em:

- Verificar a existência de telemidas suficientes para garantir a observabilidade de toda a rede;
- Identificar, quando a rede não for observável, em quais áreas é possível estimar o estado;
- Escolher um conjunto mínimo de pseudomedidas que permita estimar o estado de toda a rede, sem alterar os resultados das áreas que eram observáveis originalmente.

Quando a rede não for observável como um todo, mas apenas partes dela, essas partes são denominadas ilhas observáveis. Deve-se diferenciar o conceito de ilha observável do conceito de ilha física de um sistema. Uma ilha física é uma parte conectada de uma rede, que opera de forma independente em relação às demais ilhas do sistema. Uma ilha observável é uma ilha do sistema para a qual os fluxos de potência/corrente em todos os seus ramos podem ser calculados, a partir das medidas disponíveis. Logo, o sistema é dito observável se os fluxos de potência/corrente podem ser calculados em todos os ramos. Uma ilha física pode conter uma ou mais ilhas observáveis, além de um ou mais ramos e nós não observáveis. A utilização de pseudomedidas [Cout99][Mira00] pode melhorar a observabilidade de uma ilha física ou até mesmo restaurar a observabilidade do sistema. Estas pseudomedidas são providas através de informações adicionais obtidas através de dados típicos/históricos, previsão de carga, etc. Estas informações podem ser utilizadas como medidas fictícias em regiões da rede que apresentam deficiência de medição, particularmente em pontos onde a introdução de uma medida causará a melhoria da observabilidade. Assim, pode-se aumentar a redundância dos dados a serem processados durante a EE, benefício importante para a etapa de detecção e identificação de EGs.

A observabilidade de uma rede depende unicamente do conjunto de medidas disponíveis para a EE, de sua localização geográfica e da topologia da rede, independentemente das condições de operação. Durante a

supervisão em tempo real, este conjunto de medidas pode ainda sofrer alterações, devido a problemas, tais como: falhas no sistema de telecomunicações, perdas de UTRs; perdas de telemedidas; descarte de medidas com EGs e mudanças na topologia da rede.

Existem duas abordagens para a realização da análise da observabilidade [Mont99]. A primeira utiliza uma análise topológica, enquanto a segunda se baseia em operações numéricas. A análise topológica envolve métodos combinatórios complexos e procedimentos lógicos, não sendo, no entanto, influenciada por problemas devidos a erros numéricos. A observabilidade numérica por sua vez baseia-se na aritmética de ponto flutuante e sua determinação está inserida no próprio processo de EE.

Neste trabalho a análise de observabilidade será tratada do ponto de vista numérico, por ser mais simples e utiliza rotinas de cálculo já construídas para o processo de EE.

A verificação de deficiência de medidas para a observabilidade é realizada levando-se em conta o desacoplamento entre os conjuntos de grandezas  $P - \theta$  (potência ativa – ângulo) e  $Q - V$  (potência reativa – magnitudes de tensão) [Clem83]. Considerando medidas tomadas aos pares (ativa e reativa), pode-se fazer a análise apenas pelo conjunto  $P - \theta$ . Por simplicidade de notação, a partir deste ponto o subscrito  $P\theta$  será omitido.

Como o que se deseja verificar é a interdependência de natureza estrutural entre os componentes do vetor de estado e de medidas, as simplificações a seguir serão adotadas:

- $R = U$  (matriz identidade)
- $B_{ik} = 1$  (parâmetro de elemento que liga as barras  $i$  e  $k$  da rede);
- Elementos de  $H$  associados a  $l$ -ésima medida:

$$\begin{aligned} \text{Fluxo } P_{ik} &\Rightarrow H(l,i) = -b_{ik} & H(l,k) &= -b_{ik} \\ \text{Injeção } P_i &\Rightarrow H(l,i) = \sum_k b_{ik}, i \neq k & H(l,k) &= -b_{ik} \end{aligned}$$

Sendo  $k =$  índice das barras ligadas à barra  $i$ .

As colunas de  $H$  são correspondentes aos ângulos das barras; a referência angular não pertence à matriz.

Diz-se que um sistema é observável se a matriz de ganho  $G=H^T H$  for inversível, o que pode ser verificado durante sua fatoração pela ausência de pivôs nulos. O sobrescrito  $T$  representa transposição matricial.

Além da verificação binária (sim ou não), diferentes graus de observabilidade, associados ao nível de criticabilidade das medidas processadas podem ser estabelecidos. A identificação de medidas e conjuntos críticos permite que se avaliem melhor as condições de observabilidade de um sistema sob supervisão, além de revelar em que medidas não será possível garantir a confiabilidade do processo de estimação. Uma medida é definida como crítica se sua ausência do conjunto de medidas disponíveis para o processamento torna o sistema não observável. O mesmo conceito de criticabilidade individual de medidas pode ser estendido para grupos de medidas. Um conjunto crítico é definido como sendo um conjunto formado por medidas não críticas, na qual a eliminação de qualquer medida a ele pertencente torna as demais críticas [Cout01].

## 2.6 Filtragem do Estado

A estimativa do estado  $\hat{x}$  que minimiza  $J(x)$  pode ser obtida por:

$$H^T R^{-1} [z - h(\hat{x})] = 0 \quad (2.14)$$

$$\hat{x} = G^{-1} H^T R^{-1} z \quad (2.15)$$

Onde  $G = (H^T R^{-1} H)$  é conhecida por matriz-ganho.

As equações (2.14) e (2.15) são idênticas às (2.6) e (2.12), respectivamente, tendo sido aqui repetidas para facilitar a leitura deste documento.

Aplicando o operador valor esperado à (2.1) e usando (2.15), o vetor de medidas filtradas pode ser obtido:

$$\hat{z} = H\hat{x} \quad (2.16)$$

## 2.7 Detecção de Erros

A presença de medidas contendo EGs pode comprometer o processo de EE, tornando seus resultados não confiáveis. Por essa razão, é necessário ter meios para detectar a presença de tais erros, identificar a medida portadora de erro, eliminá-la ou, se possível, substituí-la. Alguns procedimentos simples podem ser capazes de identificar medidas com EGs em certas situações. Alguns desses procedimentos são:

- Verificação do estado de chaves/disjuntores do circuito onde a medida de fluxo é tomada;
- Comparação dos valores das medidas com limites de escala;
- Comparação entre valores de fluxo nos dois extremos de um circuito;

Os procedimentos acima consistem de testes preliminares de consistência muito simples e capazes de descartar medidas flagrantemente errôneas. Porém, em certos casos pode não ser possível identificar medidas espúrias utilizando tais procedimentos. Nesses casos, a detecção e identificação de medidas portadoras de erros grosseiros devem ser realizadas durante o processo de EE [Souz96].

No método dos MQP a detecção da presença de uma ou mais medidas com erro grosseiro pode ser realizada através de um teste que utiliza a função objetivo  $J(x)$ . Na ausência de medidas com EGs,  $J(x)$  terá distribuição Chi-

quadrado. Para realizar o teste em  $J(x)$ , adota-se um parâmetro  $\lambda$  (nível de detecção) tal que:

- Se  $J(x) \leq \lambda$ , então não existem medidas com EGs;
- Se  $J(x) > \lambda$ , então existem medidas com EGs;

O valor de  $\lambda$  define uma probabilidade de se formar uma decisão errada, isto é, considerar que não haja medidas com EGs, quando na verdade existem. Na prática, a distribuição Chi-quadrado é aproximada pela distribuição Normal.

## 2.8 Análise de Resíduos

Após a estimação das medidas realiza-se a avaliação da consistência dos resultados obtidos, através da análise dos resíduos. O vetor dos resíduos da estimação  $r$  é definido como a diferença entre o valor medido e o correspondente valor estimado:

$$r = z - \hat{z} \quad (2.17)$$

$$r = z - h(\hat{x}) \quad (2.18)$$

O vetor dos resíduos  $r$  pode ser interpretado como uma variável aleatória com Distribuição Normal, valor esperado zero e matriz de covariância  $E$ , dada por:

$$E = R - H (H^T R^{-1} H)^{-1} H^T \quad (2.19)$$

Na presença de apenas um EG, a medida errônea é aquela que apresenta o maior resíduo normalizado [Hand75]. Isto justifica a utilização do teste dos resíduos normalizados com um método de detecção e identificação de EGs.

O vetor dos resíduos  $r$  é normalizado e submetido ao seguinte teste de validação:

$$r_N(i) = \frac{|r(i)|}{\sigma_E(i)} \leq \gamma \quad (2.20)$$

$$\sigma_E(i) = \sqrt{E(i,i)} \quad (2.21)$$

Onde  $\sigma_E(i)$  representa o desvio padrão da  $i$ -ésima componente do vetor dos resíduos e  $\gamma$ , o limite de detecção. Resíduos normalizados que violam o limite estabelecido indicam a presença de EGs.

Embora existam outros testes para a avaliação dos resultados do processo de filtragem, e.g., o teste  $J(x)$  e dos resíduos ponderados [Hand75], neste trabalho será utilizado o teste dos resíduos normalizados, por ser o mais confiável.

Após a detecção da presença de EGs no conjunto de medidas é necessário realizar-se a identificação e a eliminação/substituição das medidas portadoras destes erros. Deve-se lembrar que a eliminação de medidas pode provocar perda de observabilidade do sistema ou surgimento de medidas e conjuntos críticos, trazendo dificuldades para o processo de EE. Isto porque a capacidade do estimador em detectar e identificar EGs através do teste dos resíduos normalizados se esgota em situações de baixa redundância (níveis críticos).

## 2.9 Conclusões

Neste capítulo foram descritas as principais etapas envolvidas no processo de EE. Conforme descrito, a redundância dos dados a serem processados é um requisito fundamental para o sucesso de qualquer projeto e implementação da função de EE em COS. Em situações de baixa redundância, a capacidade de processar eficientemente EGs ou até mesmo estimar o estado do sistema pode ser comprometida. Em geral, tais situações estão associadas à presença de medidas e conjuntos críticos ou perda de observabilidade do sistema. Sistemas de medição devem ser projetados de modo a fazer frente a situações como estas.

## CAPÍTULO 3

### ALGORITMOS GENÉTICOS

---

#### 3.1 Introdução

Charles Darwin construiu a “Teoria da Evolução”, na qual afirma que as espécies naturais vão evoluindo para se adaptar ao meio em que vivem. Aqueles indivíduos que melhor se adaptarem terão maior probabilidade de procriar e sobreviver até a idade adulta, fazendo assim com que suas características genéticas passem de geração em geração.

Os Algoritmos Genéticos (AGs) constituem uma classe de procedimentos estocásticos de Inteligência Artificial, baseados no modelo de evolução de sistemas naturais: preservação de informação genética, e busca de sobrevivência através da adaptação ao ambiente [Mic96]. Foram concebidos por Holland [Hol75] com o intuito de simular a evolução de um conjunto de indivíduos vivos em um ambiente natural, percebendo-se posteriormente, seu potencial como uma técnica para otimização global.

Antes do desenvolvimento dos AGs, diversos cientistas da computação utilizavam outros sistemas evolucionários para resolver problemas de otimização em Engenharia [Mich96]. Posteriormente, a inovação em submeter, seqüencialmente, um conjunto de indivíduos a um vetor de operações ditas genéticas [Gold89], distinguiu os AGs dos algoritmos evolucionários até então existentes.

Algumas vantagens a eles comumente associadas são:

- Possibilitam a busca global em funções multimodais;
- Permitem o tratamento simultâneo de variáveis reais e inteiras;
- Dispensam a avaliação de derivadas, sendo aplicáveis a funções não diferenciáveis ou não convexas.

Por outro lado, em decorrência de sua natureza probabilística, não há garantia da obtenção da solução ótima, já tendo sido relatadas simulações nas quais um ótimo local, não global, foi obtido [Gold89].

Segundo [Mich96], o sucesso ou insucesso do AG depende da sua capacidade em equilibrar dois objetivos aparentemente antagônicos: i) exploração de várias regiões do domínio; ii) perpetuação das informações contidas na população vigente.

Estudos valiosos de caráter tanto experimental quanto teórico têm sido desenvolvidos no sentido de melhorar o entendimento dos operadores genéticos. Por muito tempo, o Teorema Fundamental dos Algoritmos Genéticos [Hold75] constituiu a base teórica para análise dos AGs, entretanto este teorema tem limitações que são pouco perceptíveis à primeira vista. De fato, alheios a algumas sutilezas presentes no teorema fundamental dos Algoritmos Genéticos, usuários dos AGs valeram-se, indevidamente, deste teorema para justificar alguns de seus resultados.

A limitação do teorema fundamental dos AGs motivou trabalhos recentes que procuraram aprimorar seu entendimento teórico tratando-os como processos estocásticos modelados analiticamente. Os resultados obtidos por estes trabalhos, embora representem um avanço teórico notável em relação à base originalmente proposta, ainda não explicam satisfatoriamente o modo como os operadores genéticos atuam, não permitindo estabelecer estratégias práticas definitivas de ajuste dos parâmetros dos AGs.

### 3.2 Conceitos Básicos

Os AGs são uma família de modelos computacionais inspirados na evolução, os quais modelam uma solução, para um problema específico, em uma estrutura de dados como a de um cromossomo. Neles se aplicam operadores que recombinaem estas estruturas preservando informações críticas durante o processo de busca por uma melhor solução.

Os AGs combinam o princípio da sobrevivência dos mais aptos com trocas de informações genéticas entre indivíduos para o desenvolvimento de métodos de otimização simples e robustos. A estratégia de busca é paralela e estruturada, mas aleatória, voltada em direção ao reforço da busca de pontos de “alta aptidão”, ou seja, de pontos nos quais a função a ser minimizada (ou maximizada) tem valores relativamente baixos (ou altos).

Através de processos iterativos, são exploradas informações históricas para encontrar novos pontos de busca onde são esperados melhores desempenhos. Cada iteração é chamada de geração.

Numa população de candidatos, são aplicados os princípios de seleção e se determinam quais indivíduos conseguirão se reproduzir, gerando um número determinado de descendentes para a próxima geração, como uma probabilidade determinada pelo seu índice de aptidão. Aqueles indivíduos com maior adaptação têm maiores chances de se reproduzir.

Este processo adaptativo pode ser usado para resolver problemas de otimização combinatória, sobre um complexo espaço de busca, formulados como:

$$\begin{aligned} & \text{Max } f(x) \\ & \text{s/a } g_i(x) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \\ & \quad h_j(x) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, r \\ & \quad x \in S \end{aligned}$$

Onde:

$f(x)$  - função objetivo

$g_i(x)$  - restrição de igualdade

$h_j(x)$  - restrição de desigualdade

$x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  - conjunto de variáveis do problema

S - espaço de busca n-dimensional

Na representação de um problema busca-se codificar as informações de maneira análoga aos cromossomos biológicos. A maior parte das representações são genóticas, utilizando vetores de tamanho finito e um alfabeto finito.

Na representação através de vetores binários, cada elemento de um vetor denota a presença (1) ou ausência (0) de uma determinada característica (genótipo). Estes elementos também podem ser combinados formando as características reais do indivíduo (fenótipo). Na representação em vetores binários, as operações padrão podem ser utilizadas, facilitando o seu emprego em diferentes classes de problemas.

O critério de seleção vai fazer com que, depois de muitas gerações, o conjunto inicial de indivíduos gere indivíduos mais aptos. Através dos operadores genéticos, uma dada população, consegue gerar populações sucessivas que melhorem sua aptidão com o tempo. Os operadores principais são: cruzamento e mutação. Com estes operadores se obtém uma geração totalmente nova, mas que possui, de alguma forma, características de adaptação adquiridas através das gerações. O operador de elitismo é utilizado para prevenir que os melhores indivíduos não desapareçam da população pela manipulação dos operadores genéticos. Assim, eles podem ser simplesmente repetidos a cada nova geração.

### 3.3 Operações

Algoritmos Genéticos baseiam-se em um critério de seleção em que, depois de muitas gerações, o conjunto inicial gere indivíduos mais aptos. A maioria dos métodos de seleção são projetados para escolher preferencialmente indivíduos com maiores graus de aptidão, embora não exclusivamente, a fim de manter a diversidade da população.

Um conjunto de operações é necessário para que, dada uma população, se consiga gerar populações sucessivas que (espera-se) melhorem sua aptidão com o tempo. Estes operadores são: cruzamento (*crossover*), inversão de partes do cromossomo e mutação. Eles são utilizados para assegurar que a nova geração seja totalmente nova, mas possua, de alguma forma, características de seus pais, ou seja, a população se diversifica e mantém características de adaptação adquiridas pelas gerações anteriores. Para prevenir que os melhores indivíduos não desapareçam da população pela manipulação dos operadores genéticos, eles podem ser automaticamente colocados na próxima geração, através da reprodução elitista. As mutações propiciam certa variação e ocasionalmente introduzem alterações benéficas aos cromossomos. A inversão é um mecanismo de alteração pela inversão do código do cromossomo. O cruzamento é responsável pelo intercâmbio de material genético proveniente dos cromossomos geradores. Usando o cruzamento, as chances das características ideais se perpetuarem durante o processamento aumentam devido aos pais com graus de adaptações maiores se reproduzirem com maior frequência. Esse ciclo é repetido um determinado número de vezes.

A Figura 3.1 apresenta em linhas gerais um Algoritmo Genético Básico.

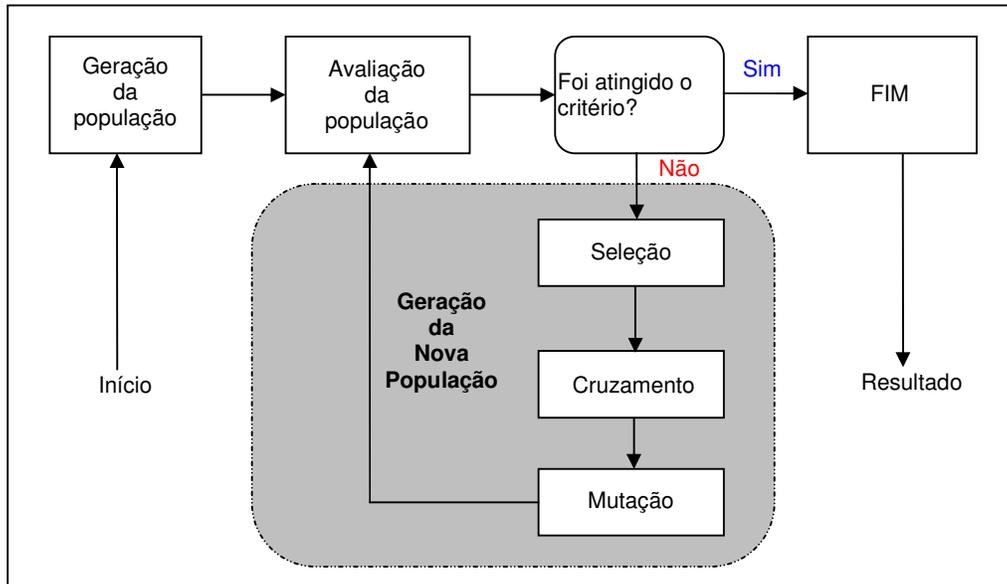


Figura 3.1: **Algoritmo Genético básico.**

Este processo apresenta os seguintes passos:

1. Gera-se uma população inicial aleatoriamente.
2. Avaliam-se os indivíduos da população, de acordo com a função de aptidão (*fitness*).
3. Verifica-se se algum critério de parada é satisfeito (número máximo de gerações ou interrupção pelo usuário).
4. Executam-se as operações de seleção, cruzamento e mutação para gerar uma nova população.
5. A nova população voltará a ser avaliada conforme o passo 2, até se cumpram os critérios estabelecidos.

### 3.4 Componentes

Um AG possui várias tarefas que precisam ser realizadas para a solução de um determinado problema. A seguir, será apresentada mais detalhadamente a função de cada um deles.

### 3.4.1 Módulo de Avaliação

O módulo de avaliação representa a ligação entre o algoritmo e o problema. Neste módulo encontra-se a função de avaliação (*Fitness*).

### 3.4.2 Módulo de Estruturação

Este módulo é responsável pelas seguintes tarefas:

a) Representação

Dados representados em forma binária, facilitando o processo de seleção e reprodução dos indivíduos.

b) Inicialização

A inicialização da primeira população, denominada primeira geração, geralmente é aleatória, mas também pode partir de um conjunto pré-definido de indivíduos.

c) Seleção dos pais

Para escolher os indivíduos na população que criarão os descendentes para a próxima geração, existem muitos mecanismos de seleção, sendo as mais utilizadas a técnica da roleta e torneio. A probabilidade de seleção  $P_{sel}$  de um cromossomo  $S_i$  é dada por:

$$P_{sel}(S_i) = \frac{a(S_i)}{\sum_{j=1}^n a(S_j)} \quad (3.1)$$

Onde:

$P_{sel}(S_i)$  é a probabilidade de seleção do cromossomo  $S_i$ ;

$a(S_j)$  representa a adequação do cromossomo  $S_j$ .

c.1) Roleta

Inicialmente proposto por Goldberg [Gold89], é um método bastante simples que consiste em criar uma roleta na qual cada cromossomo possui um segmento proporcional à sua aptidão.

Suponha uma população de 6 cromossomos cuja aptidão é dada por uma função qualquer (neste caso, simplesmente a conversão de binário para decimal) conforme mostrado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: **Exemplo para ilustrar a seleção por roleta.**

| No | Cromossomo   | Aptidão    | % do total   |
|----|--------------|------------|--------------|
| 1  | 0101101      | 45         | 13,2         |
| 2  | 1011001      | 89         | 26,2         |
| 3  | 1111101      | 125        | 36,7         |
| 4  | 0010101      | 21         | 6,1          |
| 5  | 0110100      | 52         | 15,2         |
| 6  | 0001001      | 9          | 2,6          |
|    | <b>Total</b> | <b>341</b> | <b>100,0</b> |

Com os valores percentuais constantes na quarta coluna da tabela, pode-se elaborar a roleta apresentada na Figura 3.2. Esta roleta irá ser girada 6 vezes para efetuar a seleção da população auxiliar (amostra) levando em conta que, os indivíduos com maior área na roleta têm, conseqüentemente, maiores chances de serem selecionados mais vezes que os indivíduos menos aptos.

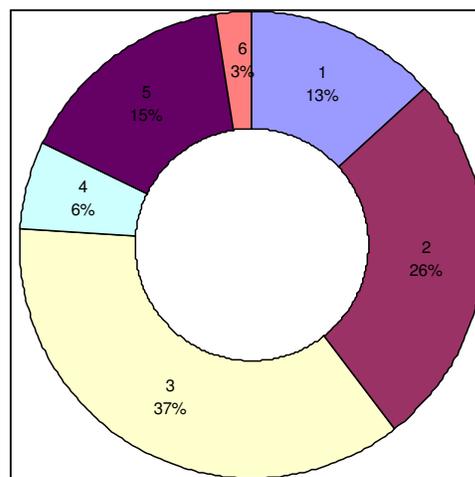


Figura 3.2: **Representação Gráfica da Roleta.**

### c.2) Torneio

Neste método cada elemento da amostra é selecionado elegendo-se o melhor indivíduo de um conjunto de  $z$  elementos tomados aleatoriamente na população base. Isto é repetido quantas vezes forem necessárias para completar a amostra. O valor do parâmetro  $z$  costuma ser um valor inteiro pequeno em relação ao tamanho total da população base, sendo em geral 2 ou 3.

Usualmente adotam-se também estratégias de seleção que levem em conta o elitismo, onde se busca garantir que o melhor (ou melhores) indivíduo de uma geração esteja presente na geração seguinte. Neste caso, estes indivíduos são sempre selecionados e simplesmente copiados para a próxima geração.

### 3.4.3 Módulo de Reprodução

O módulo de reprodução é utilizado nos indivíduos “pais” selecionados para efetuar a reprodução, garantindo a próxima geração de indivíduos. Geralmente, são utilizados os operadores de mutação e de cruzamento em um ponto, descritos a seguir.

#### a) Cruzamento

O operador de cruzamento em um ponto corresponde a uma divisão do material genético dos pais em um ponto aleatório para misturá-los e gerar o novo cromossomo que pertencerá ao filho. A seleção natural responde pelo ajuste dos cromossomos e a seleção dos pais, enquanto que a mutação e o cruzamento respondem pela diversidade genética dos filhos. Uma observação importante a respeito do cruzamento é que se pode gerar filhos completamente diferentes dos pais e mesmo assim contendo diversas características em comum. Outra questão é que o cruzamento não modifica um bit na posição em que os pais têm o mesmo valor, considerada uma

característica cada vez mais importante com o passar das gerações. Um exemplo deste operador pode ser visto na Figura 3.3:

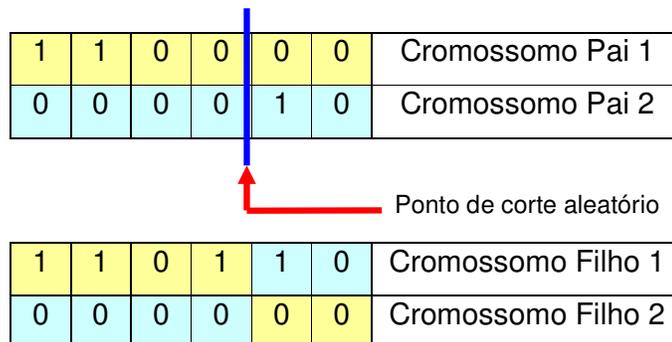


Figura 3.3: **Exemplo de cruzamento do cromossomo.**

São utilizadas também algumas variações desta técnica. Em uma delas, pode haver troca de material genético entre os indivíduos em vários pontos, comumente chamado de *Cruzamento em Multi-Ponto*. Em outra variação chamada *Cruzamento Uniforme*, não são utilizados pontos de cruzamento, mas se determina, através de um parâmetro global, que é a probabilidade de cada variável ser trocada entre os pais.

#### b) Mutação

O operador de mutação é necessário para a introdução e manutenção da diversidade genética da população, alterando arbitrariamente um ou mais componentes de uma dada estrutura fornecendo assim, meios para introdução de novos elementos na população. Desta forma se assegura que a probabilidade de se chegar a qualquer ponto do espaço de busca nunca será zero, além de contornar o problema de mínimos locais, pois com este mecanismo, altera-se levemente a direção da busca. O operador de mutação é aplicado aos indivíduos com uma probabilidade dada pela taxa de mutação; geralmente se utiliza uma taxa de mutação pequena (<1%), pois é um operador genético secundário.

A mutação na representação binária é realizada pela troca de 1 por 0 ou vice-versa, conforme pode ser notado no cromossomo na Figura 3.4.

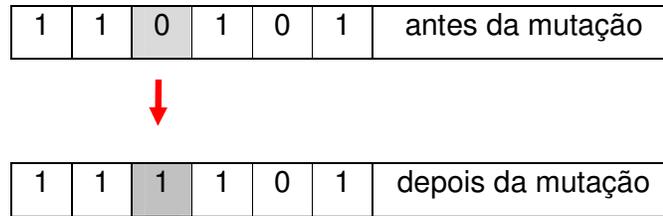


Figura 3.4: **Exemplo de mutação do cromossomo.**

c) **Elitismo**

A técnica mais utilizada para melhorar a convergência dos AGs é a reprodução elitista que tem como objetivo prevenir que os melhores indivíduos não desapareçam da população pela manipulação dos operadores genéticos. Assim esta técnica força o AG a reter um certo número de “melhores” indivíduos para ser colocados na próxima geração.

### **3.5 Parâmetros**

É importante também analisar de que maneira alguns parâmetros influenciam no comportamento dos AGs, para que se possa estabelecê-los conforme as necessidades do problema e dos recursos disponíveis.

#### **3.5.1 Tamanho da População**

O tamanho da população afeta o desempenho global e a eficiência dos AGs. Com uma população pequena o desempenho pode cair, pois deste modo a população fornece uma pequena cobertura do espaço de busca do problema. Uma grande população geralmente fornece uma cobertura representativa do domínio do problema, além de prevenir convergências prematuras para soluções locais ao invés de globais. No entanto, ao se trabalhar com grandes

populações, são maiores os requisitos computacionais e pode se ter uma convergência mais lenta.

### 3.5.2 Taxa de Cruzamento

Quanto maior for esta taxa, mais rapidamente novas estruturas serão introduzidas na população. Mas se esta for muito alta, estruturas com boas aptidões poderão ser retiradas mais rapidamente do processo evolutivo. Assim, a maior parte da população será substituída podendo ocorrer perda de estruturas de alta aptidão. Com um valor baixo para tal taxa, o algoritmo pode tornar-se muito lento.

### 3.5.3 Taxa de Mutação

Uma baixa taxa de mutação previne que uma dada posição fique estancada em um valor além de possibilitar que se chegue em qualquer ponto do espaço de busca. Com uma taxa muito alta a busca se torna essencialmente aleatória.

## 3.6 Características

A seguir, apresenta-se uma breve descrição das diferenças essenciais entre AGs e outras técnicas de otimização.

- a) Utilizam uma forma codificada dos valores de uma função, em vez dos valores reais. Esse tipo de codificação apresenta inúmeras vantagens no decorrer do processo de otimização, tornando as operações genéticas mais fáceis de serem executadas;
- b) Usam um conjunto, ou população, de pontos para conduzir uma busca e não somente um ponto isolado do espaço de busca. Isto dá aos AGs a capacidade de pesquisar em espaços ruidosos com vários pontos ótimos locais. Os AGs observam diferentes áreas do espaço do problema de uma só vez e usam todas estas informações para se guiarem, permitindo uma melhor busca pelo ótimo global.

- c) Usam somente informações geradas por si mesmos para se guiarem pelo espaço de busca. Muitas outras técnicas necessitam de uma grande variedade de informações para se guiarem. O método *hill-climbing* requer derivadas, por exemplo. A única informação utilizada pelos AGs é uma medida de adaptabilidade de cada ponto no espaço (as vezes conhecida como valor da função objetivo). Uma vez conhecido este valor sobre um ponto, os AGs podem usá-lo para continuar a busca pelo valor ótimo.
- d) Possuem natureza probabilística, não determinística. Isto é resultado direto das técnicas randômicas usadas pelos AGs.
- e) São inerentemente paralelos. Esta é uma das mais importantes e poderosa característica dos AGs. Desta maneira tratam um grande número de pontos (*strings*) simultaneamente.

### **3.7 Conclusões**

O AG é um representante de uma família de modelos computacionais inspirados na evolução. Eles modelam uma solução, para um problema específico, em uma estrutura de dados como a de um cromossomo e utilizam operadores que recombina estas estruturas preservando informações críticas durante o processo de busca por uma melhor solução. Estes algoritmos são utilizados para lidar com problemas complexos de otimização combinatória, como aquele aqui tratado.

# PLANEJAMENTO E AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO

---

### 4.1 Introdução

A redundância dos dados é fundamental para um processo adequado de EE. O termo redundância refere-se a um excedente de medidas tomadas no sistema em relação a um número mínimo necessário para estimar todas as variáveis de estado.

Quanto maior e mais qualificada for a redundância, maiores serão as chances de se constituir um processo de EE bem sucedido. De forma antagônica, crescem os investimentos em medição e, portanto, uma solução de compromisso entre redundância e custos associados deve ser encontrada.

A alocação de pontos de medição em redes de transmissão pode ser vista como um problema de otimização, onde o objetivo é obter uma solução que minimize os custos de investimento em UTRs e medidores e para garantir um desempenho desejável para a função EE.

Adiante será apresentada uma metodologia que permitirá estabelecer pontos de medição a um custo mínimo.

### 4.2 Formulação do Problema

O planejamento de sistemas de medição pode ser representado por um problema de otimização formulado como:

$$\text{Min } (C_{med} + C_{UTR}) \quad (4.1)$$

Sujeito a requisitos de desempenho

Onde:

$C_{med}$  - custo dos medidores a instalar

$C_{UTR}$  - custo das UTRs a instalar

Os requisitos de desempenho referem-se à quantidade, tipo e localização geográfica de medidores na rede, de modo a garantir um desempenho esperado para o processo de EE. Neste trabalho os requisitos estabelecidos são: observabilidade, ausência de medidas críticas; ausência de conjuntos críticos para o sistema de medição.

Quando o requisito de desempenho visa garantir apenas a observabilidade da rede [Clem90], isto implica na distribuição de pontos de medição de modo a cobrir a rede supervisionada como um todo. Por outro lado, quando também se requer a ausência de medidas e conjuntos críticos [Ayre86], garante-se que o sistema pode ainda ser observado mesmo no caso da perda de medidas e EGs podem ser detectados/identificados, conferindo também uma menor confiabilidade ao processo de supervisão no que diz respeito ao tratamento de EGs. Porém, em tais situações sistemas de medição mais redundantes são requeridos, implicando maiores investimentos. Considerando então os requisitos de observabilidade e ausência de medidas e conjuntos críticos, o problema (4.1) pode ser formulado como:

$$\text{Min } (C_{med} + C_{UTR})$$

Sujeito a:

requisito de observabilidade (4.2)

requisito de ausência de medidas críticas

requisito de ausência de conjuntos críticos

Na metodologia proposta é possível tratar o problema (4.2) de forma tal que o atendimento aos requisitos pode ser feito apenas parcialmente. A flexibilização do atendimento aos requisitos permite uma melhor exploração da

relação de compromisso entre o custo de investimentos e a qualidade do plano de medição (do ponto de vista da supervisão da rede).

A supervisão de uma rede que apresente diversas configurações e áreas de interesse também pode ser tratada pela metodologia proposta. A consideração, de maneira independente, dos requisitos de desempenho e de diferentes cenários topológicos com áreas de interesse, tem impacto direto sobre o nível de redundância do plano de medição e conseqüentemente sobre seu custo. Assim, análises do tipo custo *versus* benefício podem ser realizadas, permitindo ao planejador de um sistema de medição mais elementos para à tomada de decisão.

O problema de localização ótima de pontos de medição na rede, formulado em (4.2), é de natureza combinatória, sendo adequado tratá-lo através de algoritmos de busca global, como por exemplo os AGs.

### **4.3 Definição de Requisitos**

Conforme mencionado no Capítulo 1, deseja-se dispor de um sistema de medição que permita uma supervisão confiável, caracterizada pelos seguintes requisitos:

#### **a) Precisão**

Este requisito diz respeito à obtenção de estimativas (estado/medidas) com certo grau de precisão pré-estabelecido. O atendimento a tal requisito depende da redundância do sistema de medição e da qualidade dos equipamentos envolvidos no processo de aquisição de dados. Neste trabalho, não será considerado explicitamente o requisito precisão de estimativas.

#### **b) Observabilidade**

Busca-se que o processo de EE se estenda por toda rede. A observabilidade de uma rede depende da configuração do sistema de medição,

ou seja, dos tipos de medidores disponíveis e da sua localização na rede. Assim, deve-se projetar um sistema de medição que garanta tal requisito para um ou mais cenários topológicos assumidos para a rede em estudo.

#### c) Confiabilidade

Eventualmente, uma ou mais medidas podem apresentar EGs. Tais erros, quando não detectados, podem comprometer a qualidade da supervisão do sistema. Métodos para detecção e identificação de medidas portadoras de EGs foram apresentados, sendo a eficácia desses métodos dependente do conjunto de medidas disponíveis. Deve-se conceber um sistema de medição que permita o tratamento adequado de EGs, evitando-se condições de redundância crítica em que haverá falha de detecção/identificação de tais erros.

#### d) Robustez

Este requisito é importante para assegurar que os requisitos anteriores ainda sejam atendidos caso existam alterações topológicas e/ou indisponibilidade de medidas.

#### e) Custo

No planejamento de sistemas de medição, assim, deve-se considerar que os recursos financeiros para implantação de tal sistema sejam restritos. Logo, além dos requisitos de desempenho do processo de EE deve-se considerar também o requisito de custo, ou seja, os objetivos desejados devem ser atingidos a um custo mínimo. Existem vários custos associados à implantação de medição em uma subestação, tais como: sistema de comunicação, UTR, telessinalização e telemedição. Portanto, é necessário que tais custos sejam considerados, de forma a se avaliar o custo total associado a cada solução proposta.

Percebe-se que o requisito de custo se contrapõe aos demais requisitos: A mais redundância, melhor desempenho da EE, porém maiores custos. Os recursos financeiros devem então ser minimizados de modo a atender os objetivos desejados, o que se constitui em uma tarefa bastante complexa.

#### **4.4 Consideração de Áreas de Interesse**

Uma forma de se planejar com escassez de recursos financeiros consiste em se priorizar investimento em áreas da rede. Assim, pode-se projetar sistemas de medição em que o requisito observabilidade seja atendido em toda a rede e os requisitos de ausência de medidas e conjuntos críticos sejam atendidos em áreas específicas da rede em função da prioridade da sua supervisão. Com isto, o custo total de investimento deverá ser menor do que aquela em que os requisitos mencionados sejam atendidos considerando toda a rede. A consideração de diferentes prioridades para as áreas do sistema será apresentada nas seções seguintes.

#### **4.5 Atendimento aos Requisitos de Desempenho**

Conforme descrito anteriormente, os AGs necessitam apenas do valor da função objetivo (aptidão) para guiar o processo de busca pela solução ótima. Quando a função de aptidão é bem construída, a solução ótima deverá refletir adequadamente o compromisso entre o custo e os requisitos esperados.

Na formulação proposta neste trabalho, os requisitos considerados são: observabilidade, ausência de medidas e conjuntos críticos para um ou mais cenários topológicos e áreas de interesse. A avaliação do atendimento ao requisito de observabilidade é realizada através da verificação da não singularidade da matriz de ganho da EE (conforme descrito na seção 2.5). Para a avaliação da ausência de medidas críticas e conjuntos críticos será considerada a metodologia apresentada em [Cout01a]. Para cada um destes requisitos, a função de aptidão (objetivo) pode ser construída conforme será descrito a seguir.

#### 4.5.1 Observabilidade

Para cada cromossomo (solução proposta), este requisito é avaliado durante a fatoração da matriz de Ganho. Caso seja detectada a não observabilidade do sistema, uma penalidade adicional elevada é agregada ao custo do sistema de medição proposto. Com isto o problema passa a ser formulado como:

$$\text{Min} (C_{med} + C_{UTR} + k \times P_{obs}) \quad (4.3)$$

Onde  $P_{obs}$  é uma penalidade aplicada a planos de medição não observáveis, para os quais se faz  $k=1$ ; para cenários observáveis faz-se  $k=0$ .

#### 4.5.2 Ausência de Medidas Críticas

A incorporação deste requisito é feita da seguinte forma:

$$\text{Min} (C_{med} + C_{UTR} + N_{med} \times P_{med}) \quad (4.4)$$

Onde a variável  $P_{med}$  representa uma penalidade associada à presença de medidas críticas e  $N_{med}$  representa o número de medidas críticas propostas no plano de medição. Caso se deseje considerar o requisito de ausência de medidas críticas apenas em áreas de interesse consideradas prioritárias, o número de medidas críticas  $N_{med}$  passa a ser dado por:

$$N_{med} = \sum_{n=1}^{mCrit} P_{area}(n) \quad (4.5)$$

Onde  $mCrit$  representa o número de medidas críticas presentes em um plano de medição proposto;  $P_{area}(n) = 1$ , se a área onde está localizada a  $n$ -ésima medida for prioritária, e  $P_{area}(n) = 0$ , caso contrário.

#### 4.5.3 Ausência de Conjuntos Críticos

A incorporação deste requisito é feita da seguinte forma:

$$\text{Min} (C_{med} + C_{UTR} + N_{med} \times P_{med} + N_{med_{conj}} \times P_{conj}) \quad (4.6)$$

Onde  $P_{conj}$  representa a penalidade associada à presença de conjuntos críticos e  $N_{med_{conj}}$  representa o número total de medidas pertencentes aos conjuntos críticos. A flexibilização de tal requisito em função da prioridade de diferentes áreas de interesse pode ser realizada utilizando-se a expressão (4.7):

$$N_{med_{conj}} = \sum_{n=1}^{c_{Crit}} P_{area}(n) \quad (4.7)$$

Onde  $c_{Crit}$  representa o número de medidas pertencentes a um conjunto crítico presentes em um plano de medição proposto; sendo  $P_{area}(n) = 1$ , se a área associada à  $n$ -ésima medida pertencente à conjunto crítico for prioritária, e  $P_{area}(n) = 0$ , caso contrário.

#### 4.5.4 Comentários

A vantagem da utilização de  $N_{med}$  na formulação apresentada é que isto permite avaliar adequadamente as aptidões de cromossomos que representam planos de medição onde medidas críticas estão presentes em maior ou menor quantidade. É importante ressaltar que o requisito de ausência de medidas críticas só pode ser verificado para sistemas observáveis. A utilização de  $N_{med_{conj}}$  é vantajosa em relação à simples contagem do número de conjuntos críticos, pois estes podem apresentar diferentes tamanhos. Da mesma forma, a simples indicação da existência ou não de conjuntos críticos não seria adequada.

As penalidades  $P_{med}$  e  $P_{conj}$  têm a função de forçar o atendimento ao requisito de ausência de medidas e conjuntos críticos. Um valor muito elevado para esta penalidade implica em um valor também muito elevado para a função custo a ser minimizado em (4.4) e (4.5). Neste caso, a minimização da função custo se dará com a eliminação das medidas e conjuntos críticos e, conseqüentemente, com maior redundância e maior custo do plano de medição, com mais UTRs e medidores. Por outro lado, um baixo valor para a

penalidade  $P_{med}$  e  $P_{conj}$  pode não garantir a obtenção de um plano de medição sem medidas e conjuntos críticos, porém com menor custo de investimento em UTRs e medidores. No limite, com  $P_{med} = 0$  e  $P_{conj} = 0$ , existe apenas a preocupação de observabilidade da rede. Neste caso a solução ótima obtida indicará a quantidade mínima de UTRs e medidores (com as respectivas localizações) que garanta a observabilidade, porém com todas as medidas sendo críticas e imprescindíveis.

É possível depreender da discussão sobre a penalidade  $P_{med}$  que esta pode ser utilizada para flexibilizar o atendimento aos requisitos de desempenho. A atribuição de diferentes valores para  $P_{med}$  leva a diferentes relações de compromisso entre o custo do plano de medição (quantidade de UTRs e medidores) e o atendimento aos requisitos de desempenho. Isto é particularmente importante quando existem restrições de investimento, devendo-se projetar o plano de medição mais adequado com os recursos disponíveis.

#### 4.6 Consideração de Múltiplos Cenários Topológicos de Interesse

Nos sistemas de potência, alterações topológicas ocorrem durante sua operação. Portanto, é interessante que o atendimento aos requisitos de desempenho seja feito não apenas para um único cenário topológico da rede, mas sim para um conjunto de cenários topológicos de interesse. O atendimento aos requisitos de redundância para diferentes configurações da rede leva o problema a ser formulado como descrito a seguir.

##### 4.6.1 Observabilidade

Considerando a existência de outros cenários topológicos, o problema (4.3) passa a ser formulado como:

$$Min [C_{med} + C_{UTR} + \sum_{i=1}^{NC} (k_i \times P_{obs}(i))] \quad (4.8)$$

Onde NC é o número total de cenários topológicos de interesse,  $P_{obs}$  uma penalidade aplicada à observabilidade de planos de medição, considerando-se  $k_i = 1$ , se o i-ésimo cenário for não observável, e  $k_i = 0$ , caso contrário.

#### 4.6.2 Ausência de Medidas Críticas

Considerando a existência de outros cenários topológicos, o problema (4.4) passa a ser reformulado como:

$$Min [C_{med} + C_{UTR} + \sum_{i=1}^{NC} (N_{med}(i) \times P_{med}(i))] \quad (4.9)$$

Onde a variável  $P_{med}(i)$  representa uma penalidade associada à presença de medidas críticas e  $N_{med}(i)$  representa o número de medidas críticas presentes no plano de medição proposto quando opera o sistema no i-ésimo cenário topológico. Caso a prioridade para supervisão de diferentes áreas de interesse também seja considerada, a expressão (4.5) é empregada para cada cenário topológico como:

$$N_{med}(i) = \sum_{n=1}^{mCrit(i)} P_{area}(n) \quad (4.10)$$

Onde  $mCrit(i)$  representa o número de medidas críticas identificadas no i-ésimo cenário topológico.

#### 4.6.3 Ausência de medidas em Conjuntos Críticos

Considerando a existência de outros cenários topológicos, o problema (4.6) passa a ser formulado como:

$$Min [C_{med} + C_{UTR} + \sum_{i=1}^{NC} [(N_{med}(i) \times P_{med}(i)) + (N_{med_{conj}}(i) \times P_{conj}(i))] ] \quad (4.11)$$

Onde  $P_{conj}(i)$  representa a penalidade associada à presença de conjuntos críticos e  $N_{med_{conj}}(i)$  representa o número total de medidas

pertencentes aos conjuntos críticos propostos, quando se opera no i-ésimo cenário. A prioridade para supervisão de diferentes áreas de interesse pode ser considerada por:

$$Nmed_{conj}(i) = \sum_{n=1}^{cCrit(i)} P_{area}(n) \quad (4.12)$$

Onde  $cCrit(i)$  representa o número de medidas pertencentes a conjuntos críticos presentes no i-ésimo cenário topológico.

As expressões (4.8), (4.9) e (4.11) são generalizações das expressões (4.3), (4.4) e (4.6), quando mais de um cenário topológico de interesse é considerado.

É importante observar mais uma vez que, quanto maior o número de cenários topológicos a atender, maior tende a ser a redundância do plano de medição e os custos de investimento associados.

#### 4.7 Definição da Função de Aptidão

A Função de Aptidão (FA) pode ser formulada como:

$$FA = [C_{med} + C_{UTR} + \sum_{i=1}^{NC} [(K_i \times C_{obs}(i)) + (N_{med}(i) \times P_{med}(i)) + (Nmed_{conj}(i) \times P_{conj}(i))]] \quad (4.13)$$

A FA apresentada em (4.13) está definida de forma geral e permite atender qualquer dos requisitos de desempenho (observabilidade, ausência de medidas críticas ou de conjuntos críticos), permitindo também considerar as prioridades para supervisão de diferentes áreas de interesse. Considera-se também neste trabalho a importância da avaliação dos requisitos de ausência de medidas críticas e de conjuntos críticos de acordo com os parâmetros assinados nas áreas de interesse definidas no sistema, assim também, como o atendimento de tais requisitos de forma cumulativa para cada cenário topológico.

Neste trabalho, no que diz respeito ao atendimento dos requisitos de desempenho, a ausência de medidas críticas pressupõe o atendimento ao requisito de observabilidade, assim como o atendimento ao requisito de ausência de conjuntos críticos pressupõe o atendimento aos demais requisitos. Pode-se forçar ainda que, em cada cenário de interesse, um requisito específico seja atendido. Por exemplo, fazendo-se  $P_{conj}(i)$  e  $P_{cmed}(i)$  iguais à zero, realiza-se a busca por um plano de medição que atenda apenas ao requisito de observabilidade da rede no  $i$ -ésimo cenário. Esta característica ressalta a flexibilidade da metodologia empregada, a qual pode ser explorada para flexibilizar o atendimento aos requisitos de desempenho nos diferentes cenários topológicos de interesse. Dessa maneira, é possível reduzir os custos de investimento, atendendo apenas parcialmente os requisitos de desempenho. A metodologia proposta permite que isto seja feito de forma controlada, utilizando a experiência e conhecimento sobre o sistema ou de acordo com políticas gerenciais. As seguintes observações podem ser feitas sobre o controle das relações custos de investimento *versus* qualidade da supervisão através do ajuste das penalidades  $P_{obs}(i)$ ,  $P_{med}(i)$  e  $P_{conj}(i)$ :

- a) Reduzindo-se os valores das penalidades  $P_{med}(i)$  e  $P_{conj}(i)$  associadas a alguns cenários, reduz-se a redundância de projeto e, conseqüentemente, o custo de investimento em UTRs e equipamentos de medição será menor. Porém, deve-se ter em mente que medidas e conjuntos críticos podem ocorrer em tais cenários, podendo levar o sistema a ser não observável no caso da perda de uma delas (medidas críticas).
- b) A redução dos valores das penalidades  $P_{obs}(i)$  para alguns cenários flexibiliza o atendimento ao requisito de observabilidade para tais cenários, também requerendo menor redundância do plano de medição base e, conseqüentemente, menor custo de investimento em UTRs e medidores.

A observação (a) refere-se à flexibilização do atendimento ao requisito de ausência de medidas e conjuntos críticos em alguns cenários, significando

que em tais cenários algumas medidas e conjuntos críticos podem estar presentes. Isto é automaticamente levado em consideração pela metodologia proposta, através de alocação ótima de UTRs e medidores na rede, visando atender o requisito de ausência de medidas e conjuntos críticos nos cenários onde tal requisito não foi flexibilizado, de medidas e conjuntos críticos nos demais cenários, sempre a um custo mínimo. O mesmo ocorre na desconsideração do cenário em (b), sendo que neste caso tem-se uma redução ainda maior da quantidade de UTRs e medidores necessários. Porém, deve-se ter em mente que pode-se estar abrindo mão de supervisionar a rede em alguns cenários.

Idealmente, deve-se obter um plano de medição base que atenda aos requisitos de desempenho em todos os cenários de interesse. Porém, o custo associado a tal plano pode estar além do desejado por uma empresa. A redução do custo até patamares aceitáveis se dá através da flexibilização do atendimento aos requisitos de desempenho, a qual pode seguir diferentes estratégias. Pode-se, por exemplo, priorizar o atendimento completo aos requisitos em cenários associados a situações de operação onde rápidas tomadas de decisão e ações de controle são necessárias, sendo portanto de fundamental importância, garantir a supervisão da rede. Por outro lado pode-se flexibilizar o atendimento aos requisitos em situações de operação menos severas, onde a falta de supervisão da rede como um todo não prejudica a tomada de decisões operativas. A importância relativa dos diferentes cenários topológicos é definida com base na experiência e conhecimento sobre a operação do sistema. Outra estratégia para a flexibilização do atendimento aos requisitos de desempenho para a supervisão pode ser a de estabelecer a prioridade da supervisão em função da probabilidade de ocorrência de cada cenário topológico. Assim, a supervisão seria mais fraca, ou mesmo não realizada, nos cenários com as menores probabilidades de ocorrência. Um critério que leve em consideração conjuntamente a probabilidade de ocorrência de um cenário e a necessidade de supervisioná-lo pode também ser utilizado para o julgamento e identificação dos cenários nos quais a supervisão deve ser flexibilizada.

Tendo em conta o descrito anteriormente, é importante ressaltar que a identificação dos cenários onde se pode flexibilizar a supervisão da rede passa por uma decisão empresarial, devendo tal flexibilização ocorrer apenas quando existe a necessidade de adequar os custos de projeto a um limite pré-estabelecido para investimentos.

#### 4.8 Codificação da solução

A solução desenvolvida está baseada no uso de AGs. No problema de alocação ótima de medidores, cada cromossomo representa um plano de medição, ou seja um conjunto de medidores proposto como solução para o problema. Logo, cada plano de medição proposto (cromossomo) é representado através de um vetor onde cada posição está associada a um tipo de medidor e sua respectiva localização na rede. A dimensão do vetor do cromossomo corresponde ao número máximo de medidores que podem ser instalados. Os elementos do vetor do cromossomo contêm valores binários, assumindo valor igual a “1”, quando o medidor correspondente faz parte do plano de medição proposto, e assumindo valor igual a “0” caso contrário. Isto pode ser ilustrado na figura 4.1. O custo associado a cada plano de medição proposto é obtido somando-se os custos individuais de cada medidor presente no cromossomo e os custos das UTRs necessárias para a instalação de tais medidores.

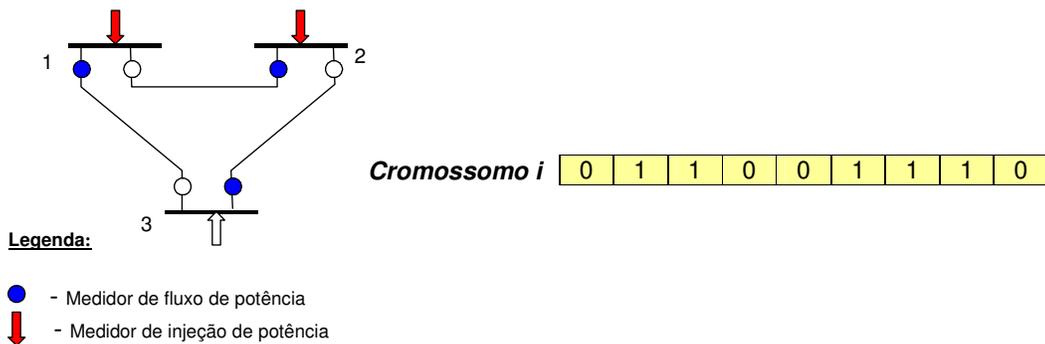


Figura 4.1: Codificação do Problema.

## 4.9 Conclusões

A alocação de pontos de medição para a supervisão em tempo real de sistemas de transmissão, foi tratada como um problema de otimização, onde os requisitos considerados para uma adequada supervisão da rede são atendidos a um mínimo custo. Na metodologia proposta foram considerados os requisitos de observabilidade da rede e a ausência de condições críticas de observabilidade, representada pela ausência de medidas críticas e conjuntos críticos.

A metodologia usada para um planejamento e avaliação de sistemas de medição é flexível e apresenta como principais características:

- Definição de requisitos de desempenho a serem atendidos em cada cenário topológico e/ou área de interesse.
- Liberdade para a definição dos elementos que compõem o custo de projeto, podendo incluir os referentes UTRs, medidores, instalação, sistema de aquisição de dados, áreas de interesse prioritárias, etc.
- Utilização de parâmetros (penalidades) que permitam controlar o processo de busca do resultado no AG, sempre visando obter uma solução que reflita uma adequada relação custo - benefício.
- Não necessita de um estimador de estado para a avaliação das soluções propostas, uma vez que a alocação de pontos de medição é aqui tratado como um problema de natureza estrutural.

De acordo com metodologia proposta, foi desenvolvida uma ferramenta computacional, capaz de contemplar todos os requisitos anteriormente mencionados. No próximo capítulo serão descritas as principais funcionalidades desta ferramenta computacional para planejamento de sistemas de medição para EE.

### IMPLEMENTAÇÃO DO APLICATIVO PLANMED

---

#### 5.1 Introdução

Para planejar e avaliar sistemas de medição foi desenvolvida uma ferramenta computacional denominada PLANMED. Esta ferramenta apresenta interfaces amigáveis, com funcionalidades gráficas e janelas para entrada de dados, possibilitando definir, planejar e avaliar planos de medição.

Ao longo deste capítulo serão descritas as principais funcionalidades da ferramenta PLANMED. Estas funcionalidades são:

- Menu de opções;
- Assistente para configuração de cenários topológicos;
- Definição de parâmetros de planejamento (cenários e AG);
- Execução do sistema de planejamento baseado em AG;
- Apresentação gráfica da evolução do processo de minimização dos custos de medição com possibilidade de interrupção do processo;
- Apresentação do resultado do estudo de planejamento/avaliação da medição.

#### 5.2 Etapa Inicial

A ferramenta PLANMED foi desenvolvida em duas linguagens de programação FORTRAN 90 e Microsoft Visual Basic. Está desenhada para trabalhar em sistemas operacionais Microsoft, desde a versão do Windows 98 até Windows XP Professional, no qual foi testado. Para o início do aplicativo, basta selecionar o ícone mostrado na Figura 5.1.



Figura 5.1: Ícone de acesso ao aplicativo PLANMED.

Com esta opção, será iniciado o aplicativo tendo-se inicialmente as opções de definição de um novo sistema ou a escolha de um sistema pré-existente, como mostra a Figura 5.2.



Figura 5.2: Opções iniciais do aplicativo PLANMED.

Quando a opção “Novo Sistema” é escolhida, será preciso definir o(s) cenário(s) topológico(s), configurações e parâmetros do novo sistema. Com a opção de “Carregar Sistema Existente”, se poderá escolher um sistema que já foi definido e salvo anteriormente. Este sistema poderá ser carregado a partir de um arquivo com extensão “.top” localizado numa pasta escolhida no disco rígido. Tal arquivo será criado automaticamente pelo sistema quando for criado um novo sistema.

Após a escolha de qualquer destas opções, o sistema apresentará o menu principal, o que é mostrado na Figura 5.3.

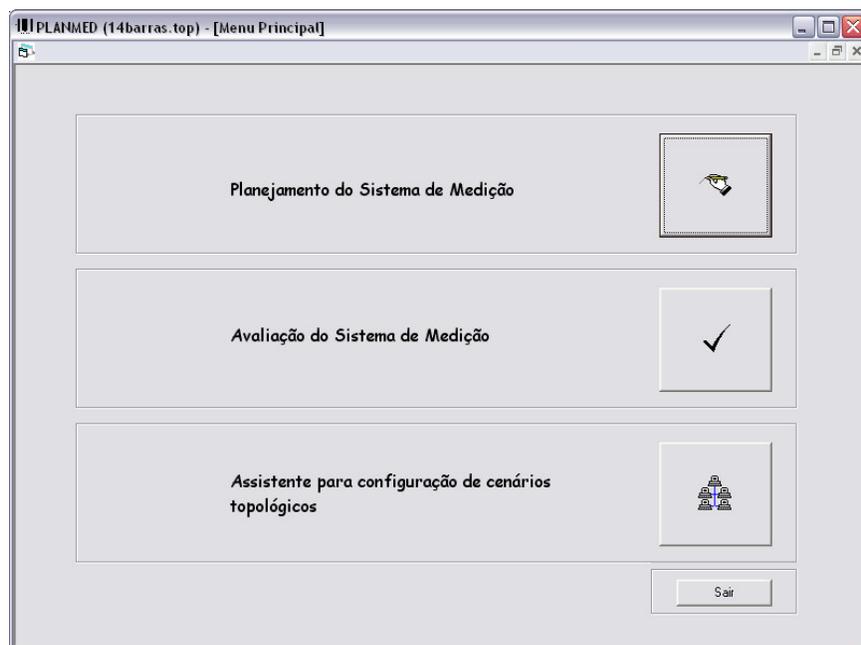


Figura 5.3: **Opções do menu principal do aplicativo PLANMED.**

Com as opções mostradas na Figura 5.3 é possível: definir ou alterar o cenário topológico principal do sistema; iniciar o processo de planejamento do sistema de medição; ou avaliar sistema de medição qualquer.

A seguir, serão descritas, passo a passo, as principais funcionalidades para definição, planejamento e avaliação de um sistema de medição, utilizando a ferramenta computacional PLANMED.

### **5.3 Assistente para Configuração de Cenários Topológicos**

Antes de escolher a opção de planejamento ou avaliação, é preciso primeiramente definir um cenário topológico para o sistema, caso não tenha sido carregado um sistema já existente. Para isto, no menu principal existe a opção “**Assistente para configuração de cenários topológicos**”, conforme visualizado na Figura 5.4.

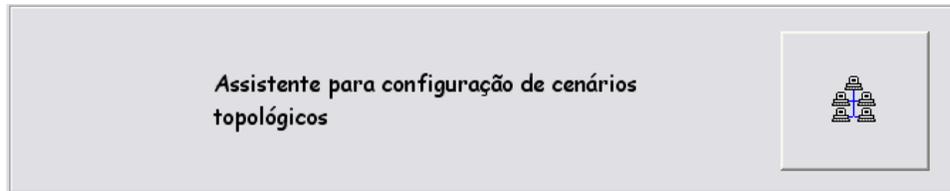


Figura 5.4: Opção “Assistente para configuração de cenários topológicos”.

Com a escolha da opção acima mencionada, o aplicativo iniciará um assistente que guiará ao usuário passo a passo por cada etapa da criação do cenário topológico a ser planejado ou avaliado. O assistente envolve 6 etapas que definirão as características detalhadas do cenário. Estas são:

### 5.3.1 Definição do Cenário Principal.

Na primeira etapa do assistente consiste na definição do cenário principal do sistema. A principal característica do cenário principal é que este possui todas as possíveis configurações do sistema. Na primeira janela exibida existem opções para a definição de barras e linhas do cenário topológico principal, como se mostra na Figura 5.5.

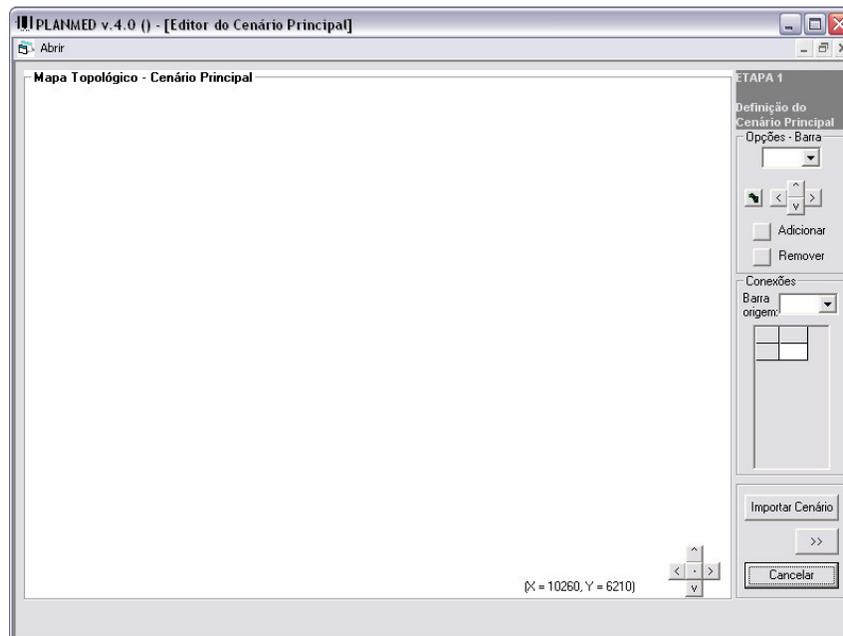


Figura 5.5: Janela para a definição do Cenário Principal.

Para definir um novo cenário é preciso primeiro localizar a posição geográfica das barras no mapa topológico. Para poder incluir uma nova barra deve-se ativar o botão “**Adicionar**”, que pode ser selecionado nas “opções da barra” como se mostra na Figura 5.6.



Figura 5.6: **Opção para adição de barras no mapa topológico.**

Quando a opção estiver ativa, só se poderão inserir novas barras. Estas ao serem inseridas serão ordenadas numericamente em ordem crescente, de acordo com a ordem de inserção. Para inserir uma barra, basta posicionar o ponteiro do mouse sobre o mapa topológico nas coordenadas X,Y desejadas e pressionar o botão esquerdo do *mouse*. É possível também apagar as barras adicionadas com a opção de “**Remover**”.

Depois de se ter definido a localização das barras no mapa topológico é preciso definir suas interligações, ou seja, definir quais serão as linhas de transmissão que as interconectam. Do lado direito da janela encontra-se a tabela de barras disponíveis para conexões. Para criar uma linha de transmissão, no mapa topológico, primeiro é preciso selecionar a “**barra de origem**” da linha de transmissão e depois selecionar a barra de destino na “**tabela de barras disponíveis**” localizada na parte inferior. As conexões adicionadas serão mostradas na cor vermelha, tanto na tabela de conexões como no mapa topológico, como se mostra na Figura 5.7.

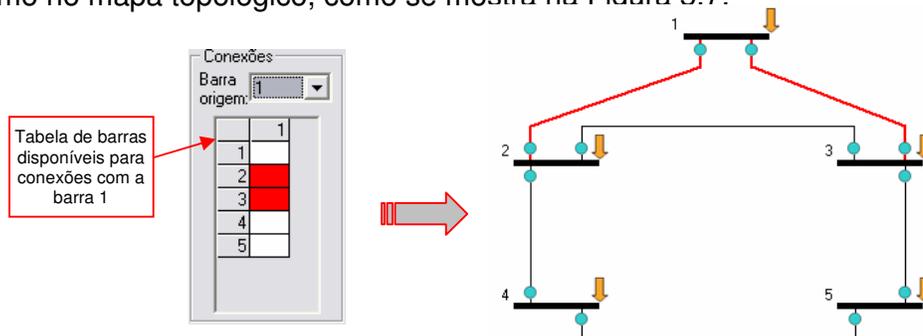


Figura 5.7: **Exemplo da conexão da barra 1 com as barras 2 e 3.**

Para cada linha de transmissão o sistema internamente cria duas conexões, cada uma com um medidor de fluxo referenciado a sua barra de origem. Estas duas conexões se referem a uma mesma linha de transmissão que são vistas sobrepostas no desenho do mapa topológico. Este artifício possibilita ao sistema planejador decidir na melhor alocação do medidor de fluxo em qualquer dos dois extremos da linha inserida (barra de origem e barra destino), como pode ser visto na Figura 5.8. Para uma melhor compreensão, cada um dos extremos de uma linha de transmissão é representado como um gene no cromossomo a ser processado pelo AG.

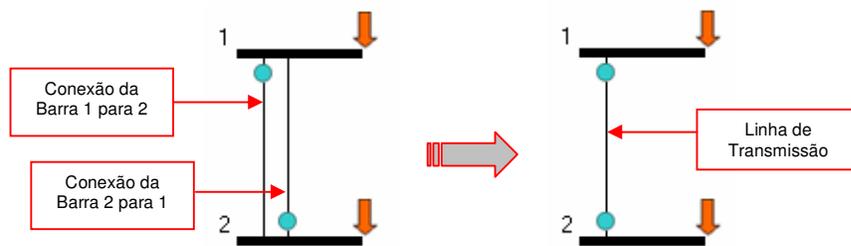


Figura 5.8: **Conexões e medidores que se referem a uma mesmo ramo de transmissão.**

No sistema existem dois tipos de medidores. Para identificar os medidores existentes é preciso primeiro conhecer a representação dos tipos de medidores no mapa topológico. Estes são: Medidor de Injeção e Medidor de Fluxo (ver Figura 5.9).

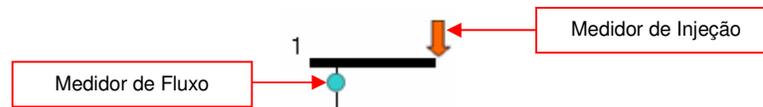


Figura 5.9: **Tipos de medidores e suas representações.**

Em sistemas reais, existem casos de cenários topológicos com um grande número de barras e conexões. Para facilitar a definição do cenário topológico no sistema, é possível escolher a opção **“Importar cenário”**. Com esta opção, mostrada na Figura 5.10, poderá ser carregada a configuração do cenário topológico através de arquivos “.txt” que possuam a definição das conexões entre as barras e o agrupamento das barras em áreas de interesse.

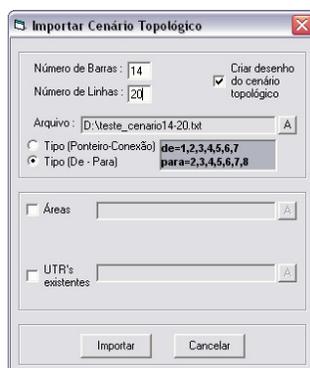


Figura 5.10: **Opção para criação de um cenário topológico através de arquivos txt.**

Após a importação da configuração do cenário topológico o sistema criará um desenho inicial do cenário no mapa topológico, que deverá ser organizado para melhor visualização.

### 5.3.2 Organização do Mapa Topológico

Uma vez definidas as barras e linhas de transmissão no mapa topológico, o usuário poderá ajustá-las de acordo com as suas necessidades de visualização, como se mostra na Figura 5.11.

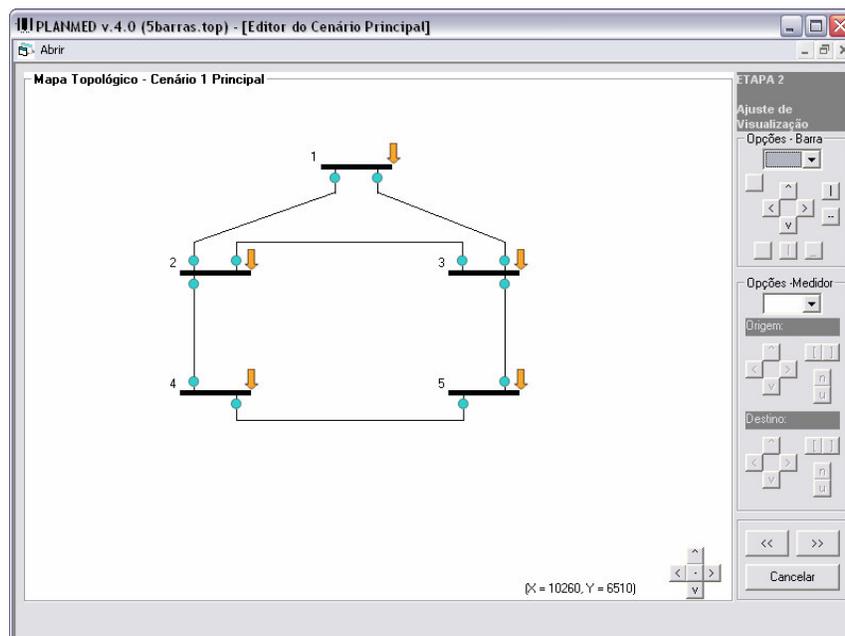


Figura 5.11: **Janela para o ajuste de visualização.**

Por exemplo, poderá ajustar a posição, orientação e alinhamento das barras, assim como também a posição e orientação dos medidores de fluxo das linhas de transmissão, localizadas nas barras do sistema como se mostra na Figura 5.12. Isto facilitará uma melhor visualização da topologia da rede.

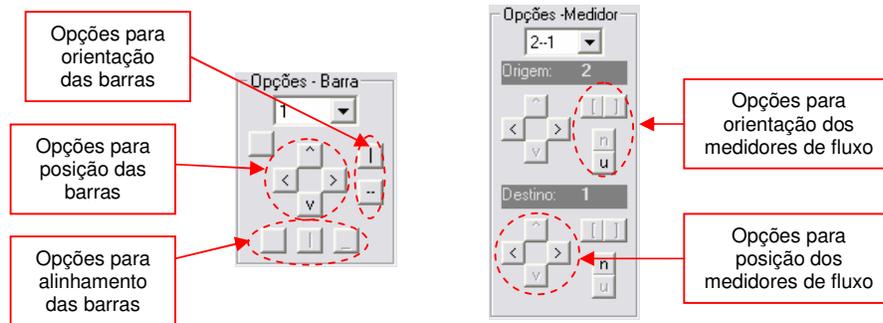


Figura 5.12: **Opções para o ajuste da visualização da topologia da rede.**

### 5.3.3 Cenários alternativos

Uma vez que o cenário topológico principal é criado e ajustado, a próxima etapa opcional a seguir é a criação de cenários alternativos. Estes cenários alternativos representam redes em que, por exemplo, ocorreram desligamentos de uma ou mais linhas de transmissão. Para estes casos podem-se definir outros cenários topológicos alternativos, que servirão para que o sistema planejador avalie uma melhor solução considerando essas possíveis modificações na rede. A janela para edição de cenários alternativos é mostrada na Figura 5.13.

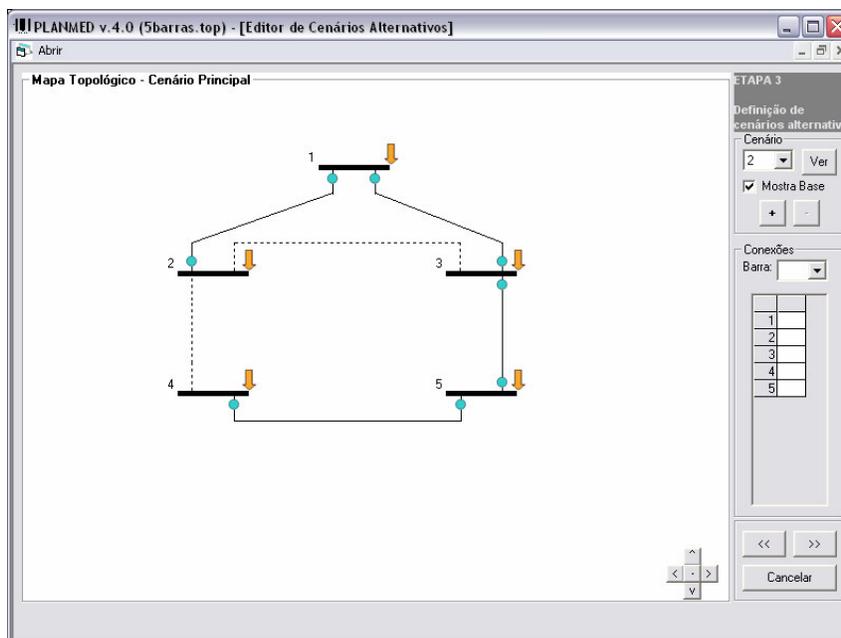


Figura 5.13: Janela para definição de cenários alternativos.

Para criar novas configurações da rede, basta selecionar a opção adicionar novo cenário representada com o símbolo “+” e confirmar a criação desta. Com esta opção, o sistema cria um novo cenário replicando todas as informações, de barras e linhas de transmissão, do cenário principal e atribui um número, que varia em ordem crescente, como identificador do novo cenário topológico.

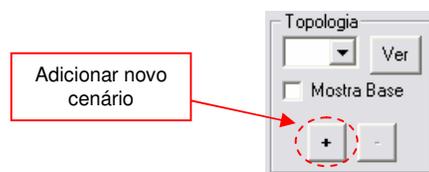


Figura 5.14: Opção para adição de um novo cenário topológico.

Uma vez criado o novo cenário topológico, é necessário definir as diferenças em relação ao cenário principal. Do lado direito da janela encontra-se a tabela de conexões das barras do sistema mostradas na cor vermelha. Somente se poderão selecionar as linhas que estão fora de serviço de acordo com linhas existentes no cenário principal. As linhas fora de serviço serão identificadas, na tabela de conexões, com a cor vermelho claro, que as

diferenciam das linhas em operação representadas na cor vermelha. Isto é ilustrado na Figura 5.15.

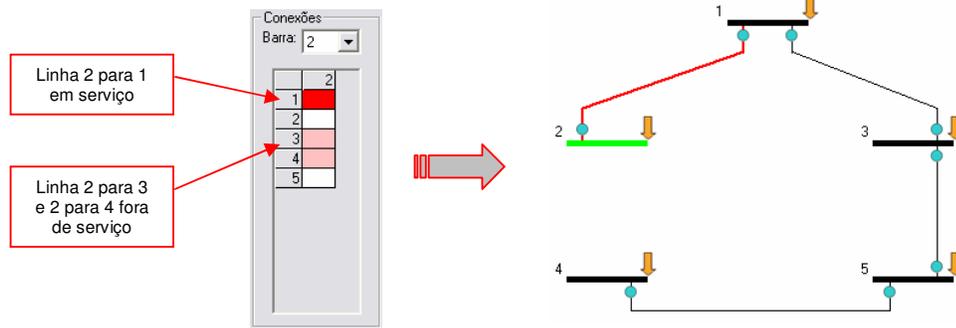


Figura 5.15: Representação da saída de serviço de linhas de transmissão para um cenário topológico alternativo.

### 5.3.4 Áreas de Interesse

Nesta quarta etapa, se poderão agrupar as barras em áreas de acordo com requisitos de planejamento. Isto quer dizer que será possível definir áreas de interesse que poderão ser consideradas prioritárias ou não para o planejamento do sistema de medição. A Figura 5.16 mostra a janela da especificação de áreas de interesse.

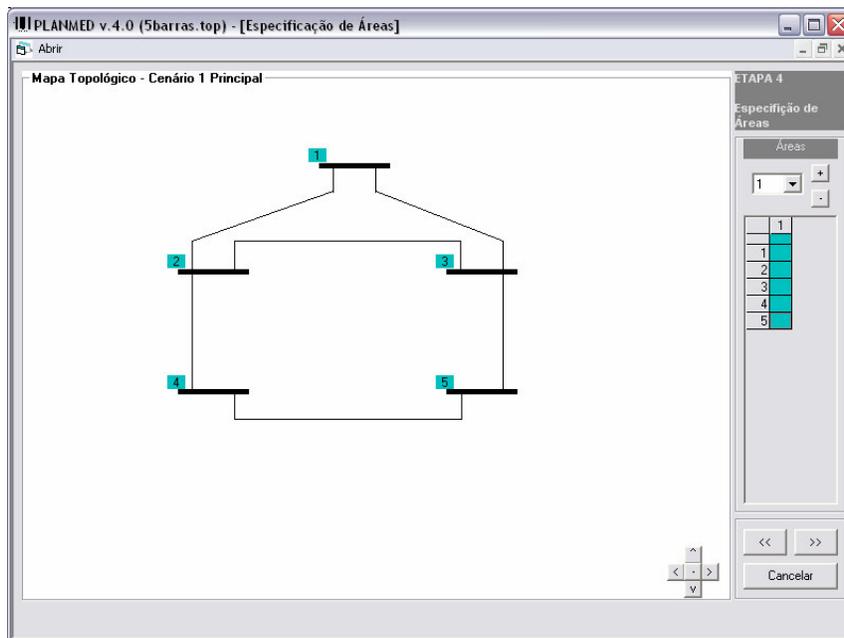


Figura 5.16: Janela para especificação de áreas de interesse.

Inicialmente, quando se cria um novo caso topológico (cenário principal) na etapa 1, o sistema agrupa todas as barras numa área inicial (mostrada na cor azul na Figura 5.16), sendo possível nesta etapa, criar novas áreas e agrupar as barras nestas novas áreas de acordo com o interesse do planejamento. Para a execução do planejamento é necessário se definir pelo menos uma área de interesse.

Para definir uma área, deve-se escolher a opção de criar nova área representada com o símbolo “+”, como se mostra na Figura 5.17.

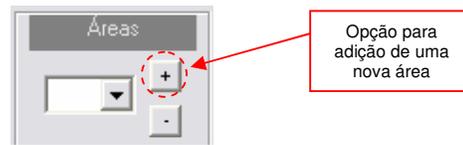


Figura 5.17: **Opção para adição de uma nova área.**

Cada nova área terá a ela associada uma nova cor definida automaticamente e deverá ser composta por no mínimo uma barra e no máximo todas as barras do sistema. Para incluir uma barra numa área, é preciso primeiro escolher a área na opção de seleção de áreas e em seguida selecionar a barra na tabela que relaciona a barra com a área selecionada. Com isto a cor da numeração da barra no mapa topológico mudará de acordo com a área que foi escolhida. O fato de uma barra já estar incluída numa área, não impede que ela possa ser designada depois para outra área. Será preciso simplesmente seguir o procedimento mencionado anteriormente para incluir tal barra na área desejada. No exemplo da Figura 5.18, se mostra a associação das barras em duas áreas de interesse.

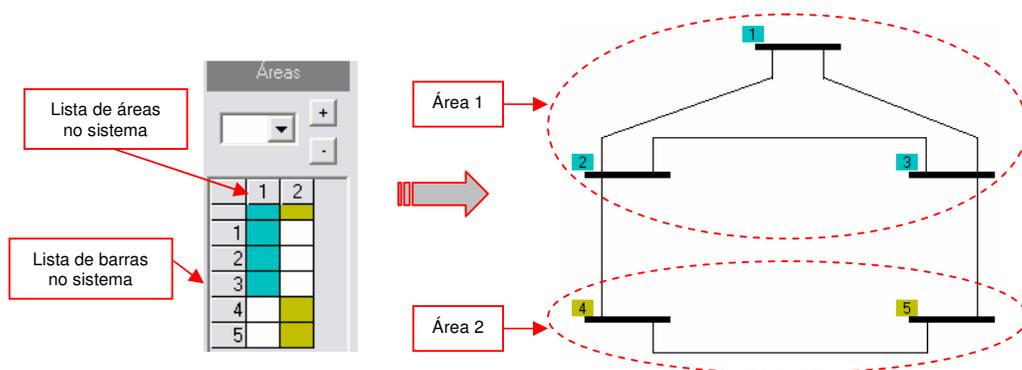


Figura 5.18: **Exemplo do agrupamento de barras em áreas de interesse.**

### 5.3.5 Medidores Existentes

Esta etapa é opcional. Trata-se da identificação de medidores já existentes na rede, os quais precisam ser identificados no mapa topológico para que o sistema não estabeleça pontos de medição nesses lugares na hora da execução do planejamento. Esta consideração é importante no caso de estudos de planejamento da expansão de sistemas de medição.

Para identificar medidores existentes, será preciso selecionar com o *mouse* o medidor desejado no mapa topológico. Este mudará de cor de acordo com o tipo de medidor selecionado: laranja para medidores de injeção e azul para o caso dos medidores de fluxo, como pode ser visto na Figura 5.19.

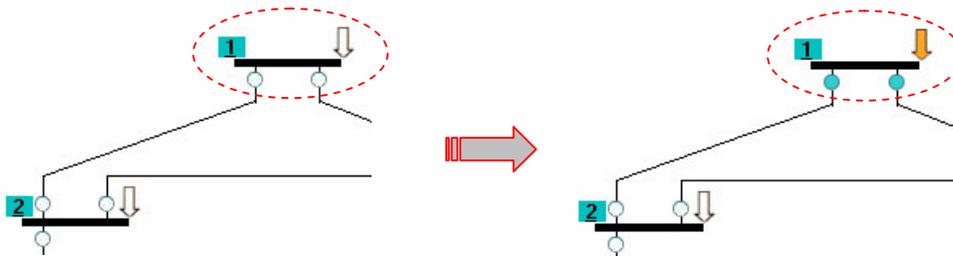


Figura 5.19: Exemplo do agrupamento das barras em áreas de interesse.

### 5.3.6 Definição de Custos e Resumo do Caso em Estudo

A última etapa do assistente é a definição dos custos envolvidos e resumo do sistema configurado. Os custos considerados são os seguintes:

- Custo de alocação de um medidor;
- Custo de alocação de uma UTR.

O resumo do sistema em estudo mostrará suas características usadas pela ferramenta de planejamento ou avaliação da medição. As características mostradas no resumo são:

- Número de barras
- Número de linhas de transmissão
- Número de áreas
- Número de UTRs existentes

- Número de cenários topológicos alternativos

Além disso, será apresentado no mapa topológico o desenho final para sua confirmação, como se mostra na Figura 5.16.

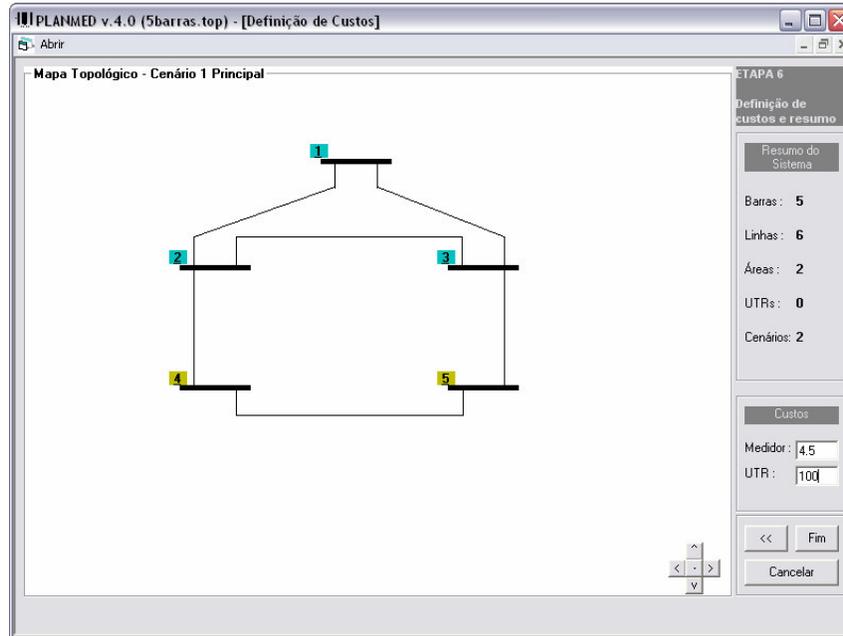


Figura 5.20: Janela do Resumo e definição de custos do cenário topológico.

## 5.4 Planejamento do Sistema de Medição

Uma das principais opções de PLANMED é o planejamento do sistema de medição utilizando AGs. Esta opção pode ser vista na Figura 5.21. Com esta opção o usuário poderá facilmente escolher as características e parâmetros da topologia com um bom nível de detalhe.



Figura 5.21: Opção para iniciar o sistema de planejamento do sistema de medição.

PLANMED oferece diversas opções para a execução do planejamento como mostradas na Figura 5.22.

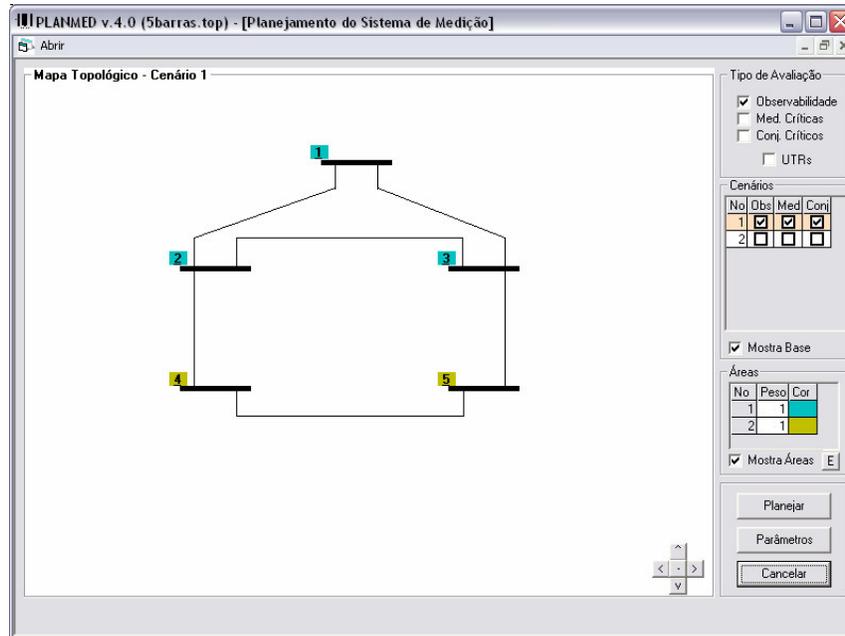


Figura 5.22: Janela principal da opção de Planejamento.

#### 5.4.1 Requisitos para a Avaliação Cada Cenário Topológico.

Como pode ser observada na Figura 5.22, existe uma tabela (a que fica situada ao lado direito do mapa topológico) que contém a lista de cenários topológicos possíveis a serem considerados no planejamento. Como foi descrito na Seção 5.2.1 do “Assistente para Configuração de cenários topológicos”, primeiramente foi definido um cenário inicial. Este é considerado como “cenário principal” e encontra-se diferenciado, na tabela de cenários, com a cor vermelho-claro para ser melhor observada em relação aos outros cenários topológicos. Cada cenário listado nesta tabela possui opções para a inclusão da avaliação de observabilidade (“Obs”), medidas críticas (“Med”) e conjuntos críticos (“Conj”), de cada um deles. Com estas opções, o usuário poderá escolher que tipo de avaliação será feita em cada cenário (ver Figura 5.23).

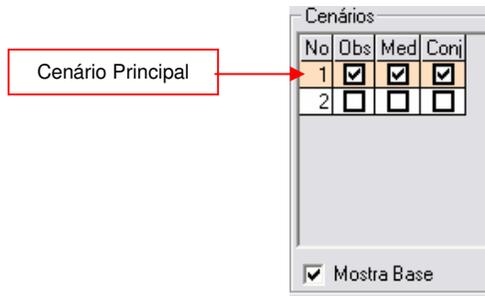


Figura 5.23: Lista de cenários topológicos e as opções disponíveis para avaliação.

Esta lista de cenários é considerada muito importante para o planejamento porque nela estarão definidas as características para o tipo de planejamento desejado de cada cenário escolhido. Isto torna o sistema flexível para casos específicos de planejamento.

As principais características para o tipo de planejamento são as seguintes:

- O usuário poderá escolher se um ou vários cenários topológicos serão ou não incluídos no planejamento, assim como os requisitos a serem atendidos em cada uma deles. Quando o usuário quiser incluir no planejamento algum dos cenários, simplesmente será preciso indicar que tipo de avaliação será feito. Para não incluir um cenário, o usuário não deverá selecionar nenhuma das opções de avaliação, com isto o sistema exclui o cenário do planejamento no algoritmo genético.
- O usuário poderá ou não escolher o “cenário principal” como referência principal ao planejamento. Isto quer dizer que poderão ser escolhidos outros cenários topológicos diferentes do principal para se realizar o planejamento. Esta opção torna o sistema muito flexível para casos no qual se deseja fazer um planejamento especializado em qualquer cenário alternativo.
- O usuário poderá visualizar graficamente um cenário selecionando o número que o identifica na lista de cenários. Como foi dito anteriormente, existe um cenário principal chamado de “cenário principal”, os outros cenários são criados a partir do cenário principal e são aqui chamados de “cenários alternativos”. Isto quer dizer que sempre terão um número inferior de linhas de transmissão que varia em cada cenário topológico de acordo com o interesse do planejamento. Em alguns casos pode ser interessante

saber quais são as diferenças entre cada um destes cenários alternativos com relação ao cenário principal. Para poder visualizar tais diferenças existe uma opção “Mostrar Base” que permite ao usuário visualizar o cenário alternativo selecionado ao mesmo tempo de estar visualizando o “cenário principal”. Nestes casos as linhas de transmissão, que se encontram no “cenário principal” e não constam no cenário alternativo selecionado, serão mostradas com linhas pontilhadas como é visualizado no exemplo do cenário topológico número 2, na Figura 5.24.

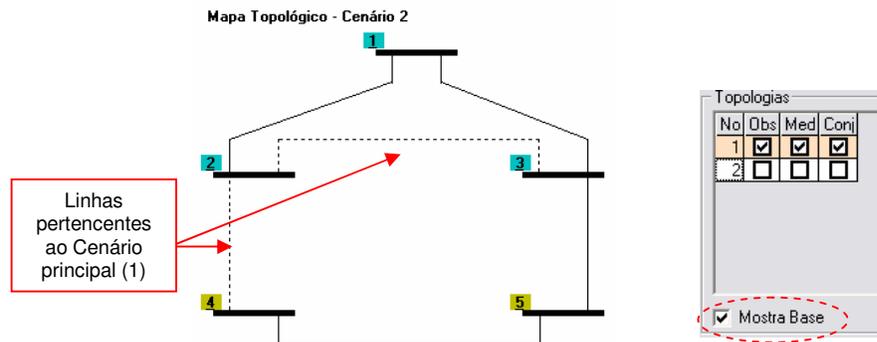


Figura 5.24: Linhas fora de serviço que diferenciam o Cenário 1 com o Cenário 2.

#### 5.4.2 Escolha das Áreas de Interesse consideradas prioritárias.

Na tabela de áreas encontra-se a relação de áreas definidas na “Etapa 4” do “Assistente para configuração de cenários topológicos”. Estas áreas estarão identificadas no mapa topológico nas cores da numeração de cada barra (ver figura 5.25).

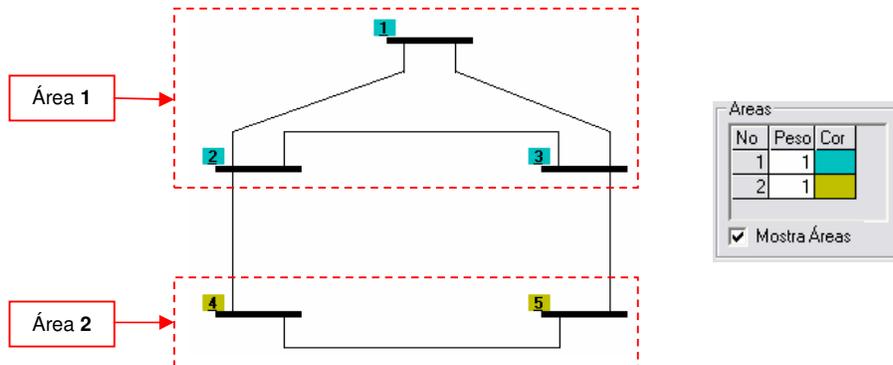


Figura 5.25: Seleção de áreas de interesse consideradas no planejamento.

Como observado no exemplo acima, as barras 1, 2 e 3 pertencem à área 1 e as barras 4 e 5 pertencem à área 2. Cada uma das áreas definidas no sistema possui um peso de avaliação definido em valores binários. Estes pesos indicam se a área onde o medidor for alocado é prioritária (1) ou não prioritária (0) no planejamento. Para facilitar a visualização do cenário topológico o usuário poderá habilitar ou não o indicador das áreas com a opção “Mostra Áreas”.

### 5.4.3 Definição de Parâmetros

O próximo passo é a definição de parâmetros do planejamento. Estes poderão ser definidos tanto para o sistema planejador como para o algoritmo genético. Os parâmetros poderão ser definidos selecionando a opção de “parâmetros” como pode ser visto na Figura 5.26.

PLANMED (14barras.top) - [Parâmetros]

**Parâmetros do Algoritmo Genético**

Número de Gerações:   
Tamanho da População:   
Número de Gens x Crom:   
Probabilidade Cruzamento:  Método de Cruzamento:   
Probabilidade Mutação:  Método de Seleção:

**Parâmetros do Sistema de Planejamento**

Penalidade - Observabilidade:   
Penalidade - Medida Crítica:  Tolerância:   
Penalidade - Conjunto Crítico:  Tolerância 1º teste:  Refin:   
Custo do Medidor:   
Custo da Remota:   
Número Max Linhas:  Número de Áreas:   
Número Max Barras:  Número de UTRs:

Salvar  
Cancelar

Figura 5.26: Definição de parâmetros do AG e do sistema planejador.

Os parâmetros apresentados na Figura 5.26 são descritos a seguir:

- Parâmetros do AG
  - Número de gerações:
    - Define o número total de populações do AG;
  - Tamanho da população:
    - Define o número de cromossomos de cada população;
  - Número de genes por cada cromossomo:
    - Valor calculado automaticamente em função ao número de barras e linhas do cenário topológico, não sendo possível sua edição nesta janela;
  - Probabilidade de cruzamento:
    - Define a probabilidade de cruzamento dos cromossomos definido em valor de tipo porcentual.
  - Método de cruzamento:
    - Define o método de cruzamento dos cromossomos, podendo ser do tipo “Uniforme” ou “De um ponto”;
  - Probabilidade de mutação:
    - Define a probabilidade de mutação do cromossomo definido em valor de tipo porcentual.
  - Método de seleção:
    - Define o método de seleção dos cromossomos, podendo ser do tipo “Torneio” ou “Roleta”;
- Parâmetros do sistema de planejamento
  - Penalidade da observabilidade:
    - Penalidade aplicada quando o sistema de medição proposto não é observável;
  - Penalidade da existência de medidas críticas:
    - Penalidade aplicada em relação ao número de medidas críticas existentes no plano de medição proposto;
  - Tolerância da avaliação da medida crítica:
    - Valor que define a tolerância no processo de identificação de uma medida crítica;
  - Penalidade da existência de medidas em conjuntos críticos:
    - Penalidade aplicada em relação ao número de medidas em conjuntos críticos existentes no plano de medição proposto;

- Tolerância do 1° teste:  
Valor que define a tolerância do 1° teste para a formação de conjuntos críticos;
- Tolerância do refinamento:  
Valor que define a tolerância do 2° teste do refinamento dos conjuntos críticos formados no 1° teste;
- Custo do medidor  
Define o valor do medidor em \$
- Custo da remota  
Define o valor do UTR em \$
- Número máximo de linhas  
Valor calculado automaticamente em função ao número máximo de linhas de todos os cenários definidos no caso de estudo, não sendo possível sua modificação nesta janela;
- Número máximo de barras:  
Valor calculado automaticamente em função ao número máximo de barras de todos os cenários definidos no caso de estudo, não sendo possível sua modificação nesta janela;
- Número de áreas:  
Número de áreas definidas no caso de estudo, não sendo possível sua modificação nesta janela;
- Número de UTRs existentes:  
Número de UTRs existentes definidas no caso de estudo, não sendo possível sua modificação nesta janela.

#### 5.4.4 Escolha do Tipo de Avaliação

Para o planejamento do sistema de medição existem três opções principais de avaliação que são: Avaliação de Observabilidade, Avaliação de Medidas Críticas e Avaliação de Medidas em Conjuntos Críticos, conforme pode ser visto na Figura 5.27. Ao escolher a “Análise de Observabilidade” esta poderá ser executada individualmente, já no caso da “Avaliação de Medidas Críticas”, é também necessário executar primeiramente a “Análise da Observabilidade”, o que é realizado automaticamente. No caso da “Avaliação

de Medidas em Conjuntos Críticos” o sistema automaticamente avalia a “Observabilidade” e a “Avaliação de Medidas Críticas”.



Figura 5.27: Principais opções no planejamento do sistema de medição.

Com a opção adicional “UTRs”, poder-se-á escolher a inclusão ou não de UTRs existentes no planejamento em caso de expansão do sistema de medição. Para esse caso serão considerados os UTRs definidos na Seção 5.3.5 do “Assistente para configuração de cenários topológicos”. Sendo ativada esta opção, será mostrado no mapa topológico os UTRs já existentes.

#### 5.4.5 Execução do AG

Com a opção “Planejar” apresentam-se as opções de controle da execução do AG para o planejamento do sistema de medição como mostra a Figura 5.28.

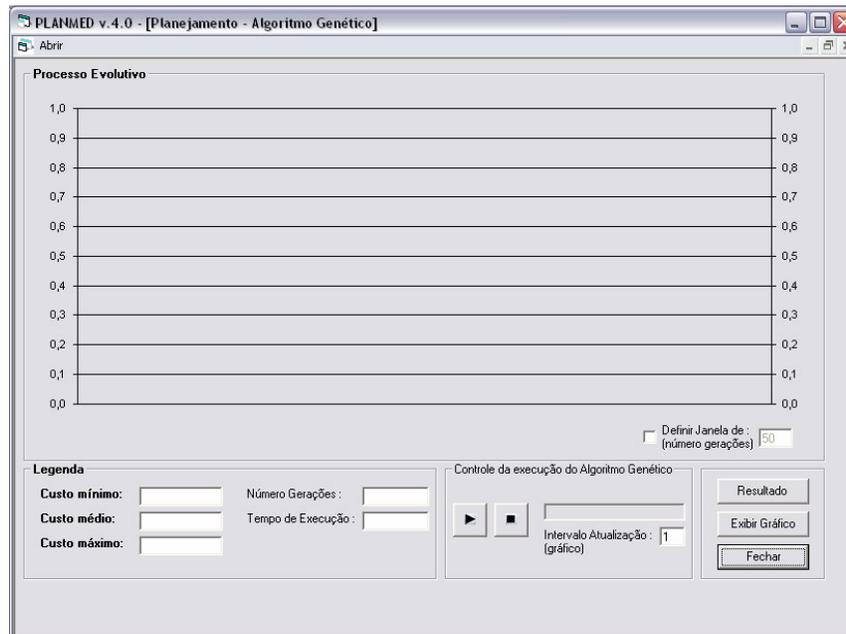


Figura 5.28: Janela para execução do Planejamento no AG.

Esta janela possui três características importantes que são:

- Controle da execução do AG

Para a execução do algoritmo genético foram criados controles que permitem “Iniciar” e “Interromper” o processo de planejamento (ver Figura 5.29). Além disso, pode-se visualizar na “barra de progresso” se o processo está sendo executado ou não. No controle da execução pode-se definir o tempo em segundos do “intervalo de atualização” do “gráfico do processo evolutivo”.

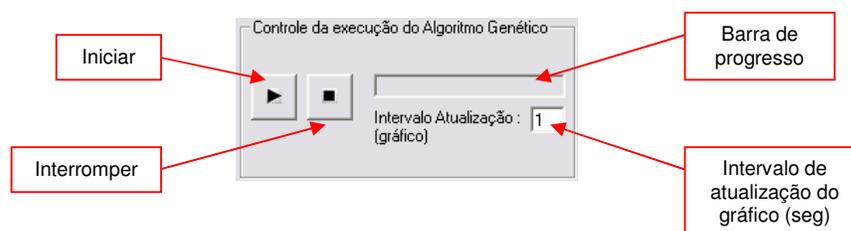


Figura 5.29: **Controle da Execução do Algoritmo Genético.**

A principal vantagem dos controles de “Início” e “Interrupção” do AG é que pode-se definir nos parâmetros do AG um número grande de gerações e não será necessário chegar até a última geração para poder obter o resultado ótimo de alocação de medidores. O usuário poderá visualizar o “custo” com relação ao “número de gerações” no “gráfico do processo evolutivo” e poderá decidir quando interromper a execução do AG. O processo pode ser interrompido quando o gráfico atinge um custo mínimo estável sempre nas próximas gerações.

- Processo evolutivo do AG

Outra das características mais importantes para a execução do AG é o gráfico do processo evolutivo no qual o usuário poderá visualizar a evolução do custo obtido nas gerações do AG. O gráfico apresenta informações como os limites do “custo máximo” e “custo mínimo” até então obtidos e a

evolução do custo através de todas as gerações como mostrado na Figura 5.30.

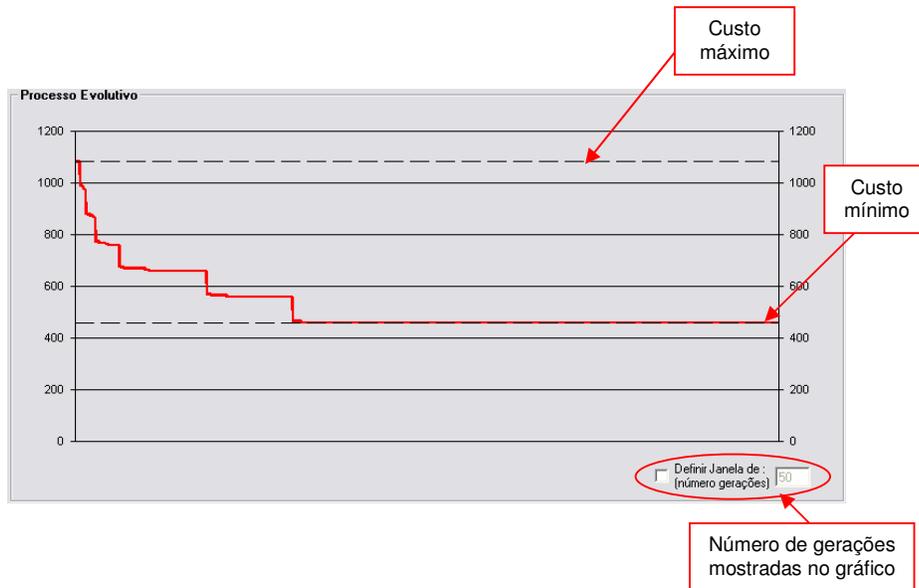


Figura 5.30: **Processo evolutivo do custo obtido no algoritmo genético em cada geração.**

Para melhorar a visualização quando se trata de um número grande de gerações, o sistema permite definir um “número de gerações mostradas no gráfico”. Neste caso, o sistema apresenta sempre as últimas n gerações definidas como janela de visualização.

As principais vantagens do “gráfico do processo evolutivo” são:

- ✓ Fornecer ao usuário a informação necessária para que possa tomar uma decisão de quando finalizar a execução do AG;
- ✓ Ajudar a definir o número máximo de gerações necessárias para a execução do AG;
- ✓ Permitir ao usuário visualizar quais seriam as diferenças no processo evolutivo do custo quando se modificam os parâmetros de mutação, cruzamento e seleção do AG, o que ajudaria a definir os parâmetros mais adequados para o AG.

- Legendas e Mensagem de término de execução

Outra das características da janela de execução do AG são as legendas. Estas permitem visualizar de maneira iterativa os valores referentes ao custo, número de gerações durante a execução do AG e o tempo total de execução ao final do processamento, como pode ser visto na Figura 5.31.

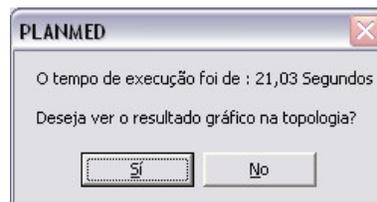


Legenda

|               |         |                     |     |
|---------------|---------|---------------------|-----|
| Custo mínimo: | 458,5   | Número Gerações :   | 500 |
| Custo médio:  | 520,322 | Tempo de Execução : |     |
| Custo máximo: | 1085,5  |                     |     |

Figura 5.31: **Controle da execução do Algoritmo Genético.**

Como resultado final da execução do processo do AG, será apresentada uma mensagem indicando que o processo de planejamento foi concluído. Nesta mensagem será indicado o tempo total da execução do AG, assim como os custos mínimos obtidos no planejamento (ver figura 5.32). Além disso, o usuário poderá escolher se deseja ou não ver o resultado gráfico da alocação de medidores no desenho do cenário topológico.



PLANMED

O tempo de execução foi de : 21,03 Segundos

Deseja ver o resultado gráfico na topologia?

Figura 5.32: **Mensagem indicando o término do planejamento.**

#### 5.4.6 Resultado Gráfico

Como resultado final da execução do Planejamento com o Algoritmo Genético são apresentadas, no cenário topológico definido para o planejamento, as posições da alocação dos medidores de injeção e de fluxo como pode ser observado no exemplo na Figura 5.33.

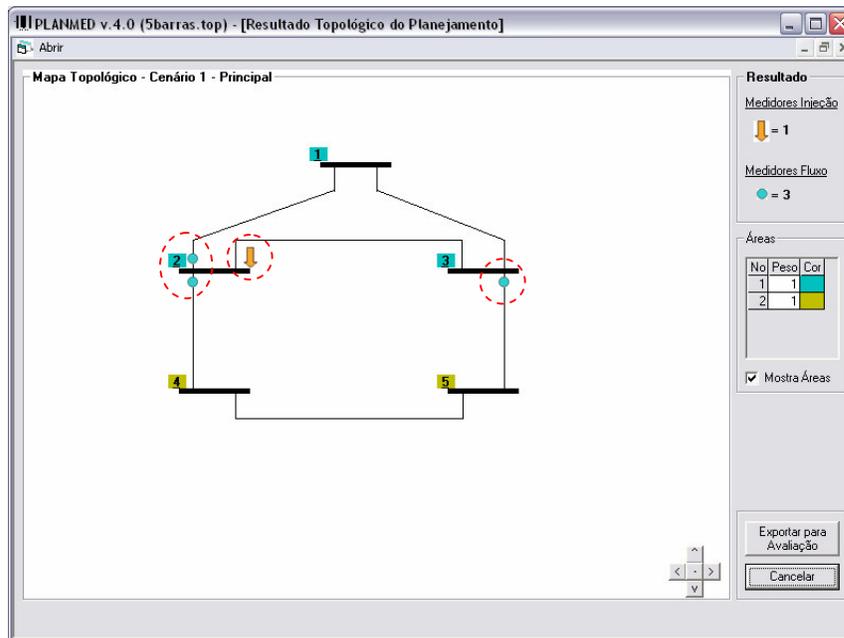


Figura 5.33: **Resultado da execução do Planejamento.**

Do lado direito do mapa topológico encontra-se o resultado do número de medidores alocados, assim como a descrição das áreas e pesos definidos no planejamento.

Em muitos deseja-se analisar o impacto de alterações no plano de medição proposto. Para isto o aplicativo PLANMED inclui uma ferramenta de análise que possibilitará ao usuário fazer modificações do resultado obtido no planejamento, com a finalidade de obter um sistema de medição alternativo. Para poder utilizar o resultado do planejamento na ferramenta de avaliação, poder-se-á escolher a opção de “**Exportar para avaliação**” localizada no extremo inferior direito da janela de resultados como pode ser vista na Figura 5.34.



Figura 5.34: **Opção para exportar o resultado do planejamento.**

## 5.5 Avaliação do Sistema de Medição

Como funcionalidade adicional ao planejamento do sistema de medição, foi desenvolvida a opção de “Avaliação do Sistema de Medição”. Esta opção permite avaliar e identificar se um dado sistema de medição, é observável, possui medidas críticas ou medidas em conjuntos críticos. Tal opção poderá ser acessada de duas formas, a primeira pelo menu principal do sistema como mostrado na Figura 5.35. Nesta opção podem-se avaliar independentemente os diferentes cenários topológicos definidos no sistema principal. Acessando com esta primeira opção, o usuário deverá escolher o cenário topológico desejado para a avaliação e terá que definir um plano de medição a ser avaliado.



Figura 5.35: Opção para a avaliação de sistemas de medição.

A segunda forma permite o acesso à opção de avaliação na janela dos resultados da opção de planejamento, com a escolha da opção “Exportar para Avaliação”, como foi mostrado na Figura 5.34. Neste caso, o plano de medição resultante do sistema de planejamento será exportado para a opção de “Avaliação do sistema de medição”. Isto facilitará ao usuário modificar o plano de medição resultante do planejamento, de acordo com os seus requerimentos, e avaliar os resultados destas alterações.

Com a opção de avaliação pode-se avaliar planos de medição de acordo com a preferência do usuário. Os parâmetros de custos serão definidos de maneira comum para todos os casos de estudo de planejamento e de avaliação. Estes parâmetros poderão ser modificados na etapa 6 do “Assistente para configuração de cenários topológicos”.

Após a escolha de qualquer das duas opções para “Avaliação do Sistema de medição”, será mostrado o mapa topológico com a topologia principal do sistema definido no início, como mostra a Figura 5.36. Do lado direito da janela encontram-se as opções para a avaliação. O usuário poderá escolher um dos diversos cenários topológicos disponíveis no caso de estudo.

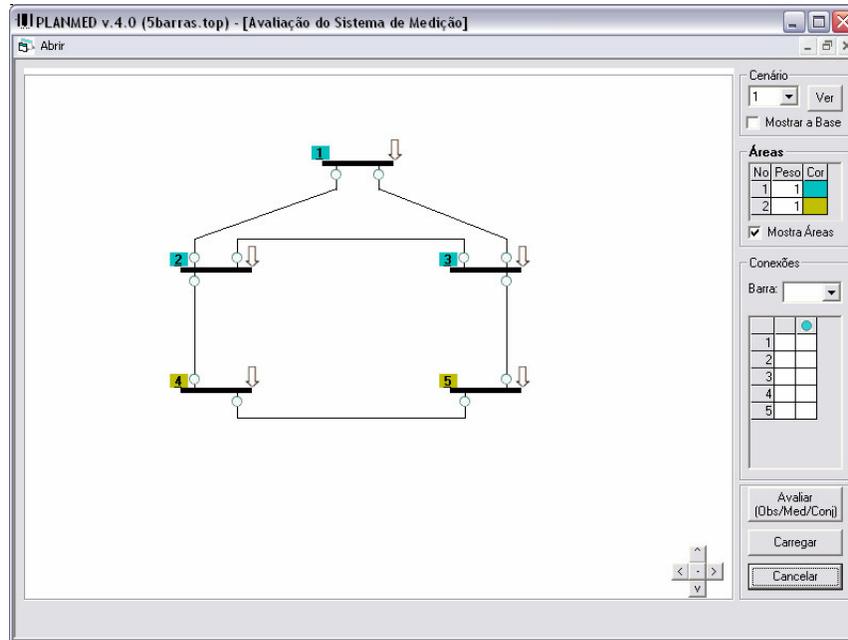


Figura 5.36: Janela principal da opção para a avaliação de sistemas de medição.

Uma das principais características da opção de avaliação do sistema de medição, é que o sistema poderá avaliar qualquer dos diferentes cenários topológicos definidos no caso de estudo. Isto permite a avaliação de cenários topológicos que não sejam o cenário principal, que em muitos casos representam situações reais que acontecem quando existem mudanças no cenário principal.

A seguir serão descritas as principais opções para iniciar o processo de avaliação.

- Definição do plano topológico de avaliação

Para definir um plano topológico de avaliação será preciso indicar quais são os medidores de injeção e de fluxo existentes no cenário topológico escolhido. Para escolher um medidor basta selecioná-lo no mapa topológico ou na tabela de conexões. Isto mudará a cor do medidor indicando a sua presença na avaliação. A Figura 5.37 ilustra a seleção de medidores existentes no mapa topológico.

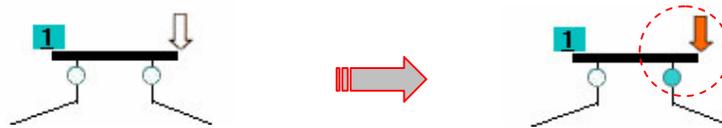


Figura 5.37: **Seleção de medidores existentes no cenário topológico.**

Para o uso da tabela de conexões, deverá ser escolhida primeiramente a barra de referência desejada. Após isto realizado, o sistema mostrará as possíveis conexões onde poderão se escolher os medidores de fluxo desejados. A Figura 5.38 ilustra esta opção.

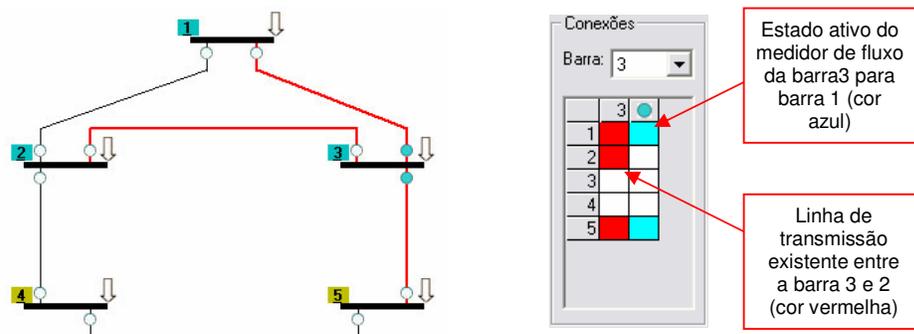


Figura 5.38: **Seleção de medidores existentes no cenário topológico.**

Como pode ser visto na Figura 5.38, a tabela de conexões mostra na primeira coluna o número de barras disponíveis no cenário topológico, na segunda coluna mostra as interligações (indicadas na cor vermelha) entre a barra selecionada e as barras disponíveis (como por exemplo a barra 3 relacionada com as barras 1, 2 e 5) e na terceira coluna estão indicadas na cor azul o estado ativo de seleção do medidor de fluxo na linha de transmissão selecionada. Para selecionar um medidor de fluxo para

qualquer dessas barras ligadas, bastará selecionar a célula da segunda coluna que tenha interseção com a barra desejada. Isto quer dizer que somente poderão ser escolhidos medidores nas barras que tenham ligação com a barra selecionada (mostradas na cor vermelha). A Figura 5.36 mostra que foram alocados dois medidores na barra 3, que medirão o fluxo da barra 1 e da barra 5.

Para facilitar a escolha dos medidores de fluxo, qualquer modificação que seja feita na tabela de conexões será visualizada no mapa topológico (se existir representação gráfica do cenário topológico) e vice-versa.

- Execução da avaliação

Uma vez definido o plano de medição deve-se selecionar a opção de “Avaliar (Obs/Med/Conj)” que executará o sistema de avaliação. Uma vez terminado a análise, este apresentará o resultado parcial da avaliação que indicará se o sistema é observável ou não e o custo envolvido, como mostrado na Figura 5.39 (a). Caso o sistema não seja observável o sistema mostrará uma mensagem de alerta e terminará o processo de avaliação, como visto na Figura 5.39 (b).

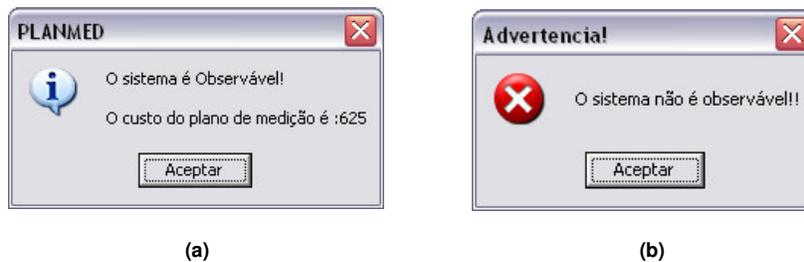


Figura 5.39: **Resultado parcial do processo de avaliação.**

- Resultado da avaliação

Como resultado final da avaliação será apresentado o mapa topológico e na tabela de resultados, as medidas críticas e conjuntos críticos identificados como mostrado na Figura 5.40.

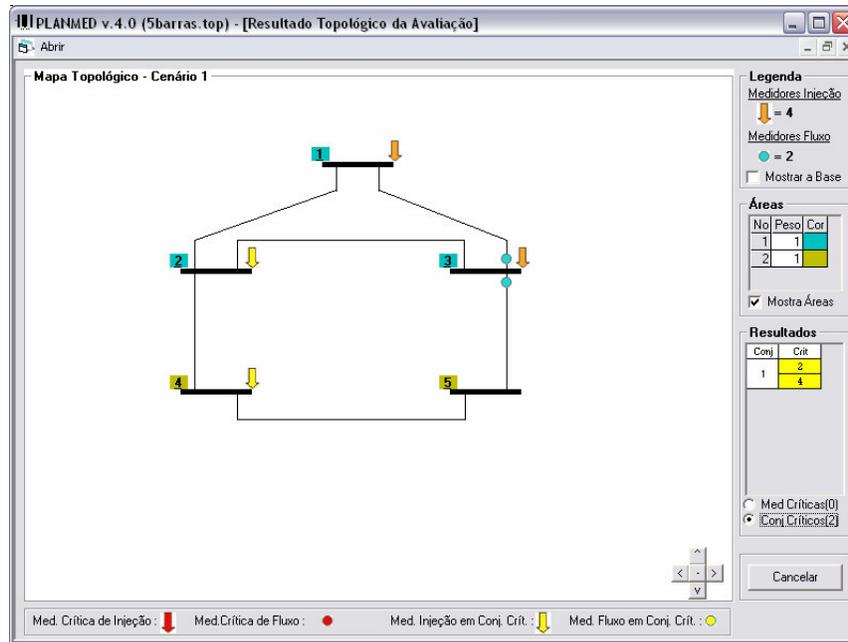


Figura 5.40: Janela do resultado da avaliação.

Para a representação de medidas críticas no cenário topológico, os símbolos usados serão de cor vermelha para cada tipo de medidor como mostrado na Figura 5.41.



Figura 5.41: Representação de Medidas Críticas.

Para a representação de medidores em conjuntos críticos no cenário topológico, os símbolos usados serão os mesmos mudando unicamente a sua cor como visto na Figura 5.42.



Figura 5.42: Representação de Medidas em Conjuntos Críticos.

Para facilitar a identificação de medidas e conjuntos críticos, os resultados poderão ser visualizados na "tabela de resultados". Esta

mostrará os resultados da identificação de medidas e conjuntos críticos, caso o sistema possua um cenário topológico grande e complexo.

Na tabela de “Resultados” poderá ser escolhido visualizar as “medidas críticas” ou as “medidas em conjuntos críticos” identificados na avaliação, assim como o número de medidas identificadas por cada tipo de avaliação, como observado na Figura 5.43.



Figura 5.43: Opções para apresentação dos resultados da avaliação.

A tabela de “Resultados” mostra as medidas críticas e as medidas em conjuntos críticos. A cor vermelha representa as medidas críticas, como mostradas na Figura 5.44 (a) e a cor amarela representam as medidas em conjuntos críticos, como mostrado na Figura 5.44 (b).

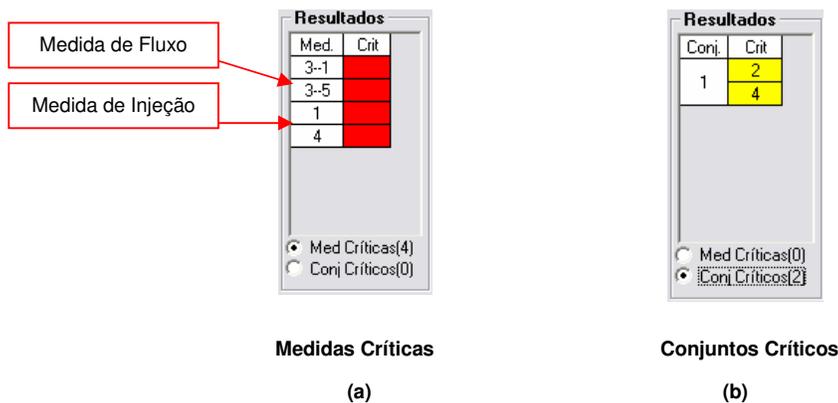


Figura 5.44: Tipos de representações para os resultados da avaliação.

Na tabela de resultados mostrada na Figura 5.44, existem duas formas de representar os tipos de medidas. Para os dois casos, tanto nas medidas

críticas como nos conjuntos críticos, as medidas de injeção serão representadas utilizando o número da barra (por exemplo, barra 1 ou barra 4). Para o caso das medidas de fluxo, estes estão representados com o número da barra de origem e da barra destino onde se encontra localizada a medida, por exemplo, da barra 3 para a 1 (3--1) ou da barra 3 para a 5 (3--5).

## 5.6 Conclusões

O aplicativo PLANMED possui funções gráficas que permitem que o planejamento e avaliação de sistemas de medição sejam realizados de maneira fácil, rápida e com um alto grau de flexibilidade para se definir o sistema e as configurações das opções de planejamento e avaliação de resultados.

As principais vantagens encontradas nesta ferramenta são:

- Facilidade na definição dos cenários topológicos;
- Visualização do custo versus número de gerações;
- Controle da execução do AG;
- Exportação do resultado do planejamento para a opção de avaliação, possibilitando modificações e novas análises;
- Definição de áreas de interesse e suas prioridades no planejamento do sistema de medição;
- Facilidade gráfica para a identificação de medidas e conjuntos críticos no desenho do cenário topológico;
- Consideração, no planejamento e na avaliação, de cenários topológicos alternativos ao cenário topológico principal;

No próximo capítulo serão apresentados os resultados de simulações com os sistemas IEEE-14 e IEEE-118 barras.

## CAPÍTULO 6

### SIMULAÇÕES E TESTES

---

#### 6.1 Introdução

Neste capítulo, serão apresentados a descrição das simulações e os resultados de cada um dos testes executados para a avaliação da metodologia proposta para o planejamento de sistemas de medição.

Nas simulações foram utilizados o sistema IEEE-14 e o sistema IEEE-118. As configurações destes sistemas foram inseridas no sistema PLANMED de acordo com o desenho gráfico e configuração topológica. Além disso, para fins comparativos, foram criados três casos de estudo para o sistema IEEE-14 e dois casos para o sistema IEEE-118. No sistema IEEE-14, o primeiro caso representa o sistema como uma área topológica só, o segundo caso mostra o sistema dividido em três áreas topológicas de interesse e o terceiro caso mostra um sistema com vinte cenários topológicos alternativos. No sistema IEEE-118, o primeiro caso representa o sistema como uma área topológica só e o segundo caso mostra o sistema dividido em três áreas topológicas de interesse.

Os testes realizados foram definidos baseados nas opções metodológicas desenvolvidas no sistema PLANMED. Estas opções serão escolhidas de acordo ao requisito de redundância, visando garantir a observabilidade, ausência de medidas críticas ou ausência de conjuntos críticos, indicando a melhor solução para o sistema de alocação de medidores a um mínimo custo.

## 6.2 Simulação com o Sistema IEEE-14

A primeira simulação foi feita na configuração da rede do sistema IEEE 14 barras e 20 ramos. Para o Algoritmo Genético, o cromossomo está representado através de um vetor de 54 posições, no qual, cada posição corresponde a uma localização na rede elétrica onde pode ser instalado um tipo de medidor. Para este caso, as 40 primeiras posições do vetor representam todas as possíveis medidas de fluxo (uma para cada extremo de cada um dos 20 ramos mostrados em forma de círculo de cor azul, como foi explicado na seção 4.10.1.2) e as 14 posições restantes representam as possíveis medidas de injeção de potência mostradas em forma de seta de cor laranja, localizadas em cada barra da rede. A Figura 6.1 mostra a configuração da rede, assim como a localização dos possíveis medidores de fluxo e injeção de potência.

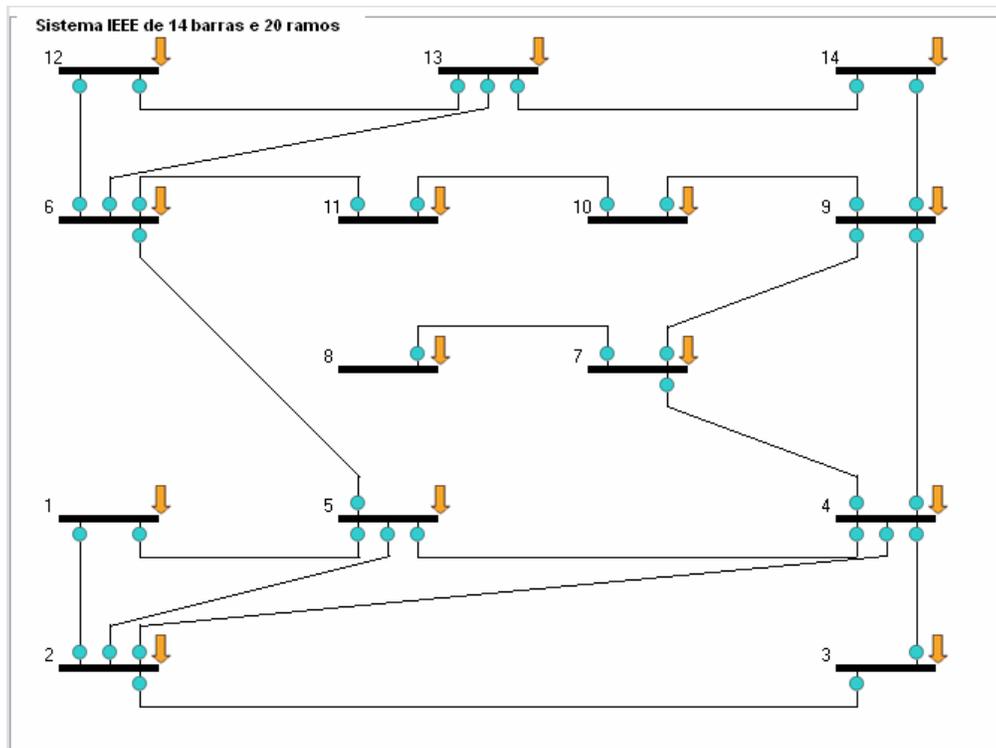
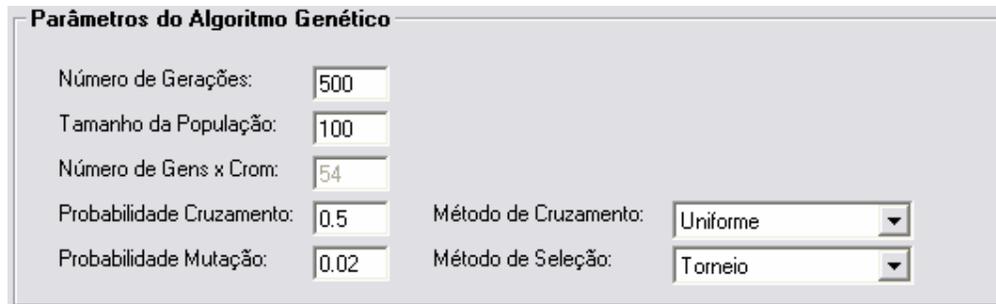


Figura 6.1: Sistema IEEE de 14 barras e 20 ramos.

Os parâmetros utilizados para algoritmo genético, nas diversas simulações realizadas no sistema IEEE-14, como por exemplo, o método de

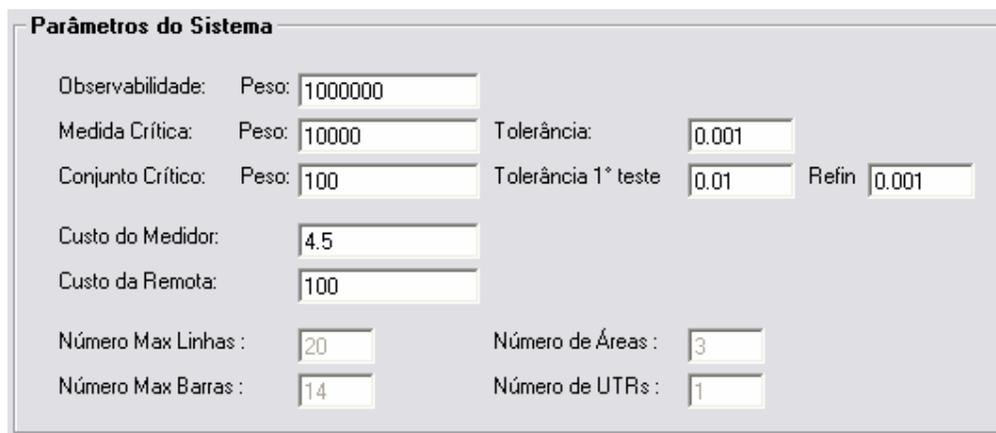
seleção, tipo de cruzamento, tamanho da população e demais parâmetros, são mostrados na Figura 6.2. Também se considerou aleatória a inicialização da primeira população.



| Parâmetros do Algoritmo Genético |          |
|----------------------------------|----------|
| Número de Gerações:              | 500      |
| Tamanho da População:            | 100      |
| Número de Gens x Crom:           | 54       |
| Probabilidade Cruzamento:        | 0.5      |
| Probabilidade Mutação:           | 0.02     |
| Método de Cruzamento:            | Uniforme |
| Método de Seleção:               | Torneio  |

Figura 6.2: **Parâmetros do Algoritmo Genético para o sistema IEEE-14.**

Os parâmetros utilizados para o sistema de planejamento para o sistema IEEE-14 barras são mostrados na Figura 6.3.



| Parâmetros do Sistema   |         |                      |       |
|-------------------------|---------|----------------------|-------|
| Observabilidade: Peso:  | 1000000 |                      |       |
| Medida Crítica: Peso:   | 10000   | Tolerância:          | 0.001 |
| Conjunto Crítico: Peso: | 100     | Tolerância 1° teste: | 0.01  |
|                         |         | Refin:               | 0.001 |
| Custo do Medidor:       | 4.5     |                      |       |
| Custo da Remota:        | 100     |                      |       |
| Número Max Linhas :     | 20      | Número de Áreas :    | 3     |
| Número Max Barras :     | 14      | Número de UTRs :     | 1     |

Figura 6.3: **Parâmetros do sistema de planejamento.**

Os parâmetros apresentados na Figura 6.3 foram extraídos de [Souz05].

## 6.2.1 Sem Considerar Áreas de Interesse

Nesta simulação não foram considerados as opções apresentadas na Figura 6.4.

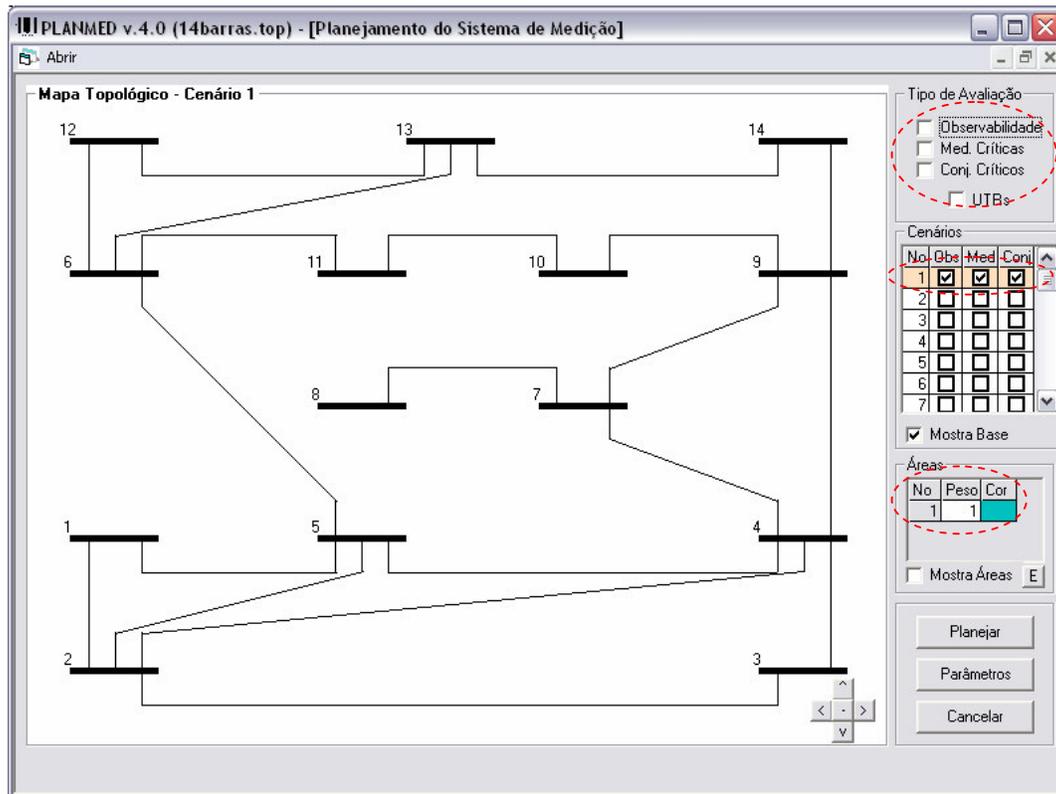


Figura 6.4: Opções principais do sistema de planejamento para o sistema IEEE-14.

A seguir serão apresentados resultados de testes considerando a escolha de diferentes requisitos de desempenho e para apenas uma área de interesse e configuração topológica.

a) Atendimento ao requisito de observabilidade

Tabela 6.1: **Resultado para o requisito de observabilidade.**

| Área | N° de UTRs | N° de Medidores de Injeção | N° de Medidores de Fluxo | Total de Medidores | Custo (\$) |
|------|------------|----------------------------|--------------------------|--------------------|------------|
| 1    | 4          | 3                          | 10                       | 13                 | 458,50     |

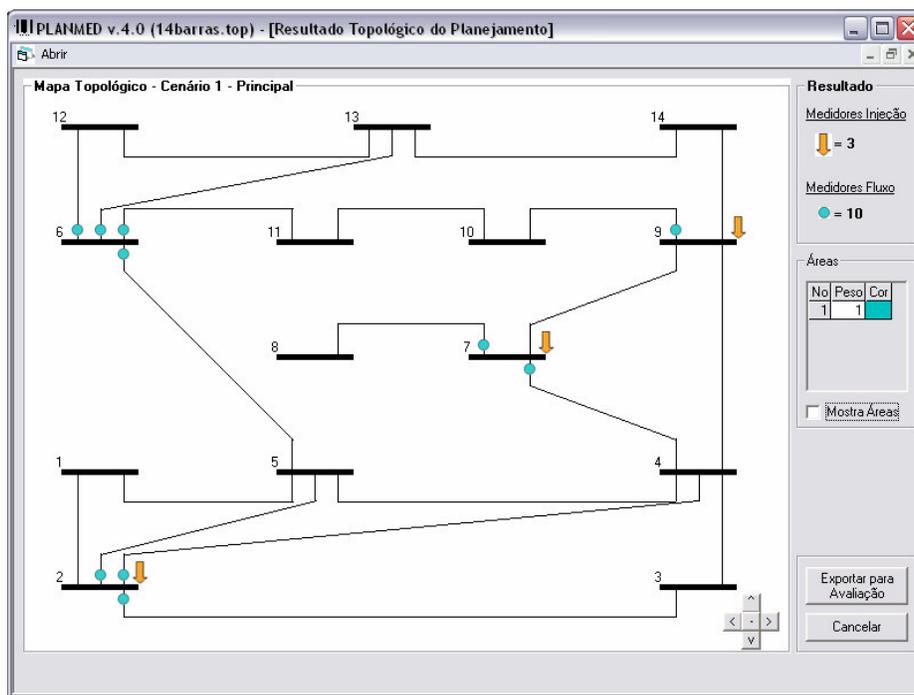


Figura 6.5: **Resultado do atendimento ao requisito de observabilidade, sistema IEEE-14.**

A solução apresentada mostra que foi possível obter um sistema de medição que permitirá a supervisão da rede como um todo, atendendo assim o requisito de observabilidade. Além disso, a solução proposta é ótima quanto à quantidade de medidas, já que um conjunto mínimo de medidores foi alocado. Pode-se ainda notar que a distribuição de UTRs e medidores foi otimizada, pois se tende a concentrar (na medida do possível, atendendo ao requisito pré-estabelecido) medidores em poucos pontos da rede, minimizando assim o número de UTRs necessárias e, conseqüentemente, o custo associado.

b) Atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas

Tabela 6.2: Resultado para o requisito de ausência de medidas críticas.

| Área | Nº de UTRs | Nº de Medidores de Injeção | Nº de Medidores de Fluxo | Total de Medidores | Custo (\$) |
|------|------------|----------------------------|--------------------------|--------------------|------------|
| 1    | 5          | 4                          | 10                       | 14                 | 563,00     |

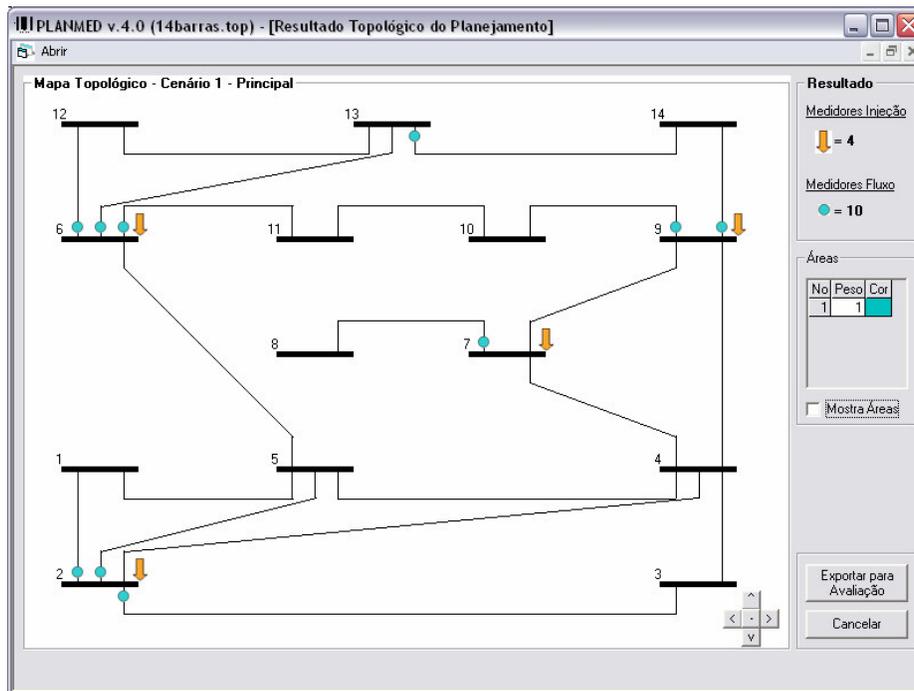


Figura 6.6: Resultado do atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas, sistema IEEE-14.

A solução ótima apresentada indica um plano de medição onde não existem medidas críticas na rede ilustrada na Figura 6.6. Para este cenário, pode-se ainda observar a rede mesmo com a perda de medidas.

c) Atendimento ao requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos

Tabela 6.3: Resultado para o requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos.

| Área | N° de UTRs | N° de Medidores de Injeção | N° de Medidores de Fluxo | Total de Medidores | Custo (\$) |
|------|------------|----------------------------|--------------------------|--------------------|------------|
| 1    | 9          | 8                          | 8                        | 16                 | 972,00     |

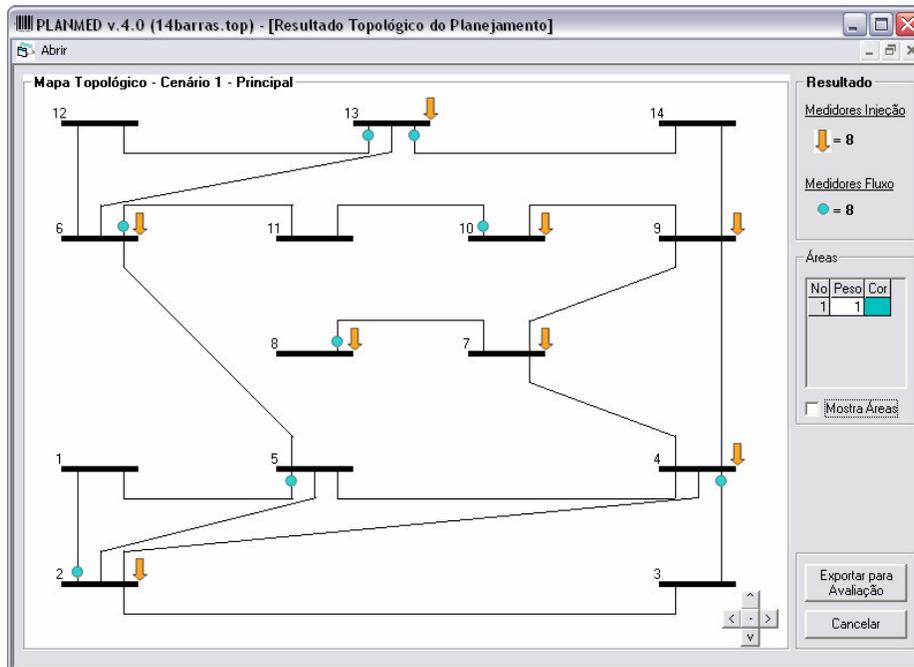


Figura 6.7: Resultado do atendimento ao requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos, sistema IEEE-14.

A solução ótima apresentada indica um plano de medição onde não existem medidas em conjuntos críticos na rede ilustrada na Figura 6.7. É importante destacar que esta análise envolve maiores custo devido ao requerimento definido.

## 6.2.2 Considerando Áreas de Interesse

Para esta simulação o sistema IEEE-14 foi dividido em três áreas de interesse definidas de forma arbitrária. As barras estão agrupadas da seguinte maneira:

Área 1:

1, 2, 3, 5

Área 2:

4, 7, 8, 9

Área 3:

6, 10, 11, 12, 13, 14

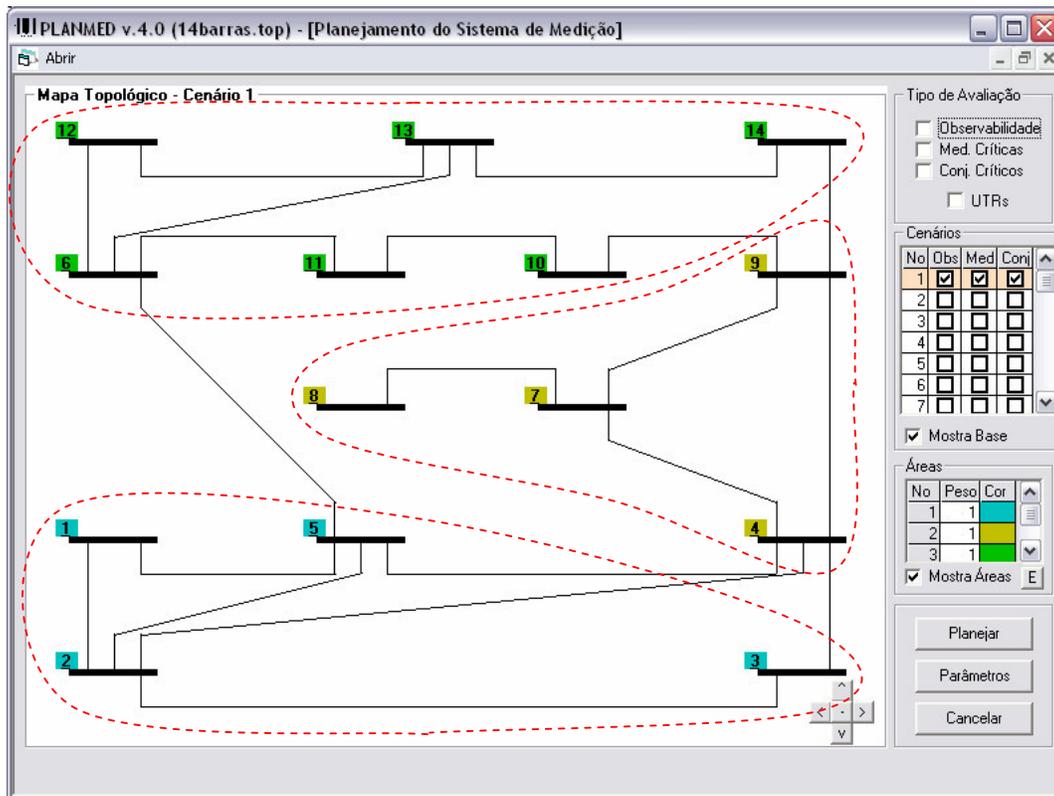


Figura 6.8: Cenário topológico considerando três áreas de interesse, sistema IEEE-14.

A partir destas agrupações serão feitas simulações para avaliar o custo em função à priorização do atendimento dos requisitos em áreas específicas de interesse.

### 6.2.2.1 Simulação Considerando a Área 1 com Prioridade

a) Atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas na área 1.

Tabela 6.4: **Atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas na área 1.**

| Área         | N° de UTRs | N° de Medidores de Injeção | N° de Medidores de Fluxo | Total de Medidores | Custo (\$) |
|--------------|------------|----------------------------|--------------------------|--------------------|------------|
| 1            | 1          | 1                          | 4                        | 5                  | 463,00     |
| 2            | 2          | 2                          | 3                        | 5                  |            |
| 3            | 1          | 1                          | 3                        | 4                  |            |
| <b>Total</b> | 4          | 4                          | 10                       | 14                 |            |

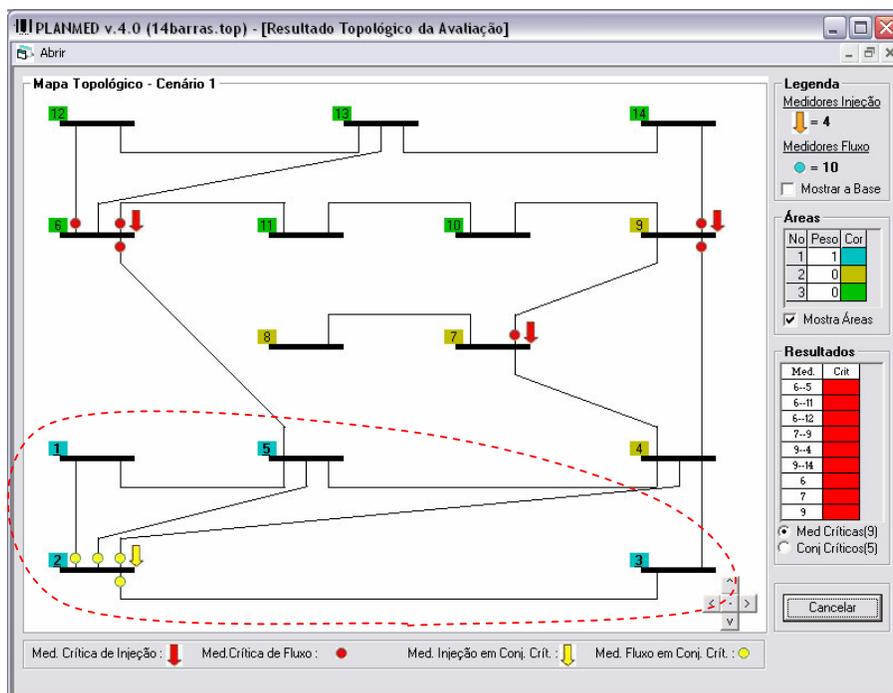


Figura 6.9: **Resultado do atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas na área 1.**

A solução ótima apresentada indica um plano de medição onde não existem medidas críticas na área 1, ilustrada na Figura 6.9. Além disso, é possível observar no resultado que foram identificadas medidas críticas (mostradas na cor vermelha) nas áreas não prioritárias.

b) Atendimento ao requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos na área 1.

Tabela 6.5: Resultado para o requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos na área 1.

| Área         | N° de UTRs | N° de Medidores de Injeção | N° de Medidores de Fluxo | Total de Medidores | Custo (\$) |
|--------------|------------|----------------------------|--------------------------|--------------------|------------|
| 1            | 1          | 1                          | 3                        | 4                  | 572,00     |
| 2            | 3          | 3                          | 5                        | 8                  |            |
| 3            | 1          | 1                          | 3                        | 4                  |            |
| <b>Total</b> | 5          | 5                          | 11                       | 16                 |            |

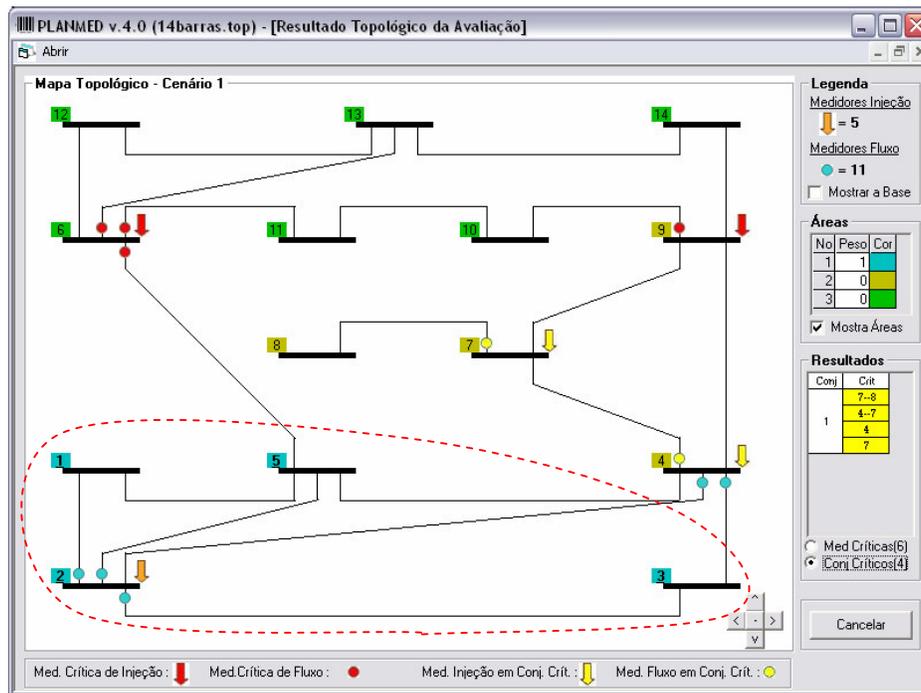


Figura 6.10: Resultado da do atendimento ao requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos na área 1.

A solução ótima apresentada indica um plano de medição onde não existem medidas em conjuntos críticos na área 1, ilustrada na Figura 6.10. Em comparação ao teste anterior mostrado na Tabela 6.4, existe um incremento no custo do plano de medição a razão do requisito definido. Além disso, é possível observar no resultado que foram identificadas medidas críticas (mostradas na cor vermelha) nas áreas consideradas não prioritárias.

### 6.2.2.2 Simulação considerando a área 2 com prioridade

a) Atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas na área 2.

Tabela 6.6: Resultado para o requisito de ausência de medidas críticas na área 2.

| Área         | N° de UTRs | N° de Medidores de Injeção | N° de Medidores de Fluxo | Total de Medidores | Custo (\$) |
|--------------|------------|----------------------------|--------------------------|--------------------|------------|
| 1            | 1          | 1                          | 3                        | 4                  | 463,00     |
| 2            | 2          | 2                          | 4                        | 6                  |            |
| 3            | 1          | 1                          | 3                        | 4                  |            |
| <b>Total</b> | 4          | 4                          | 10                       | 14                 |            |

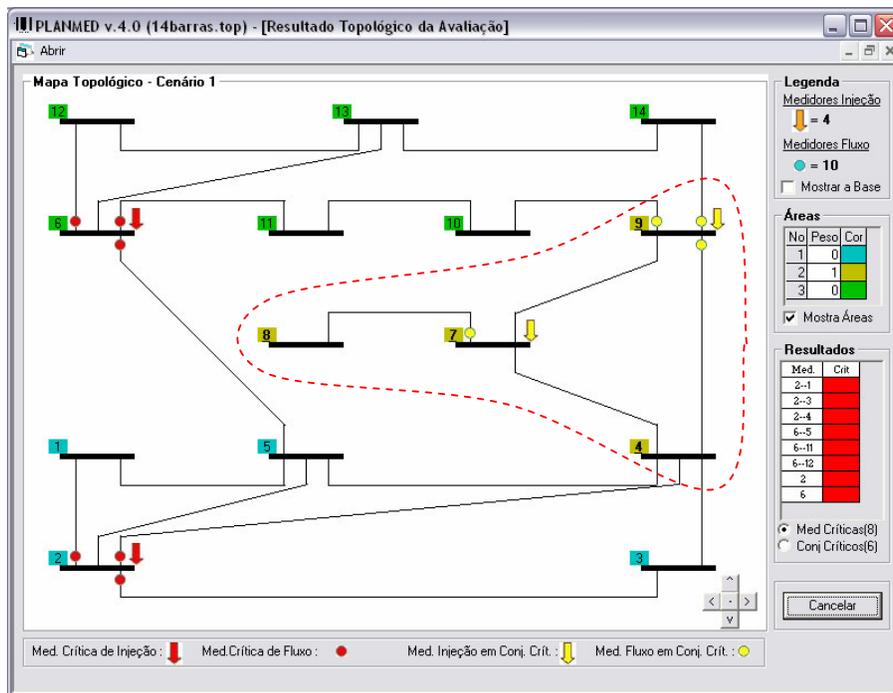


Figura 6.11: Resultado do atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas na área 2.

A solução ótima apresentada indica um plano de medição onde não existem medidas críticas na área 2, ilustrada na Figura 6.11. Além disso, é possível observar no resultado que foram identificadas medidas críticas (mostradas na cor vermelha) nas áreas consideradas não prioritárias.

b) Atendimento ao requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos na área 2.

Tabela 6.7: Resultado para o requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos na área 2.

| Área         | Nº de UTRs | Nº de Medidores de Injeção | Nº de Medidores de Fluxo | Total de Medidores | Custo (\$) |
|--------------|------------|----------------------------|--------------------------|--------------------|------------|
| 1            | 1          | 1                          | 3                        | 4                  | 672,00     |
| 2            | 2          | 2                          | 4                        | 6                  |            |
| 3            | 3          | 3                          | 3                        | 6                  |            |
| <b>Total</b> | 5          | 6                          | 13                       | 16                 |            |

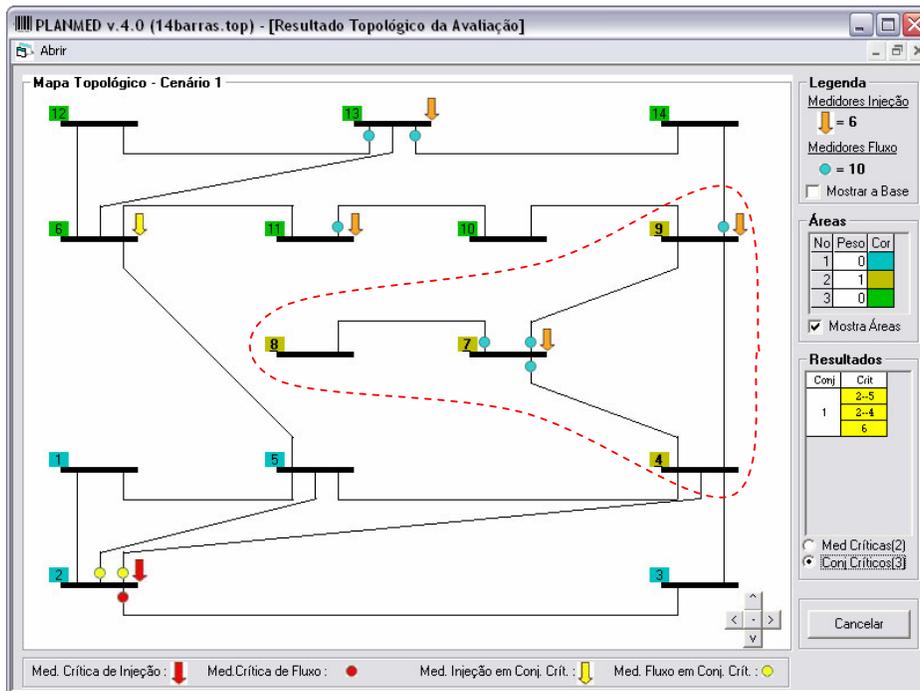


Figura 6.12: Resultado do atendimento ao requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos na área 2.

O plano obtido mostra que não foram identificadas medidas em conjuntos críticos na área 2, ilustrada na Figura 6.12. Além disso, é possível observar no resultado que foram identificadas outras medidas em conjuntos críticos (mostradas na cor amarela) nas áreas consideradas não prioritárias.

### 6.2.2.3 Simulação considerando a área 3 com prioridade

a) Atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas na área 3.

Tabela 6.8: Resultado para o requisito de ausência de medidas críticas na área 3.

| Área         | N° de UTRs | N° de Medidores de Injeção | N° de Medidores de Fluxo | Total de Medidores | Custo (\$) |
|--------------|------------|----------------------------|--------------------------|--------------------|------------|
| 1            | 1          | 0                          | 4                        | 4                  | 463,00     |
| 2            | 2          | 1                          | 4                        | 5                  |            |
| 3            | 1          | 1                          | 4                        | 5                  |            |
| <b>Total</b> | 4          | 2                          | 12                       | 14                 |            |

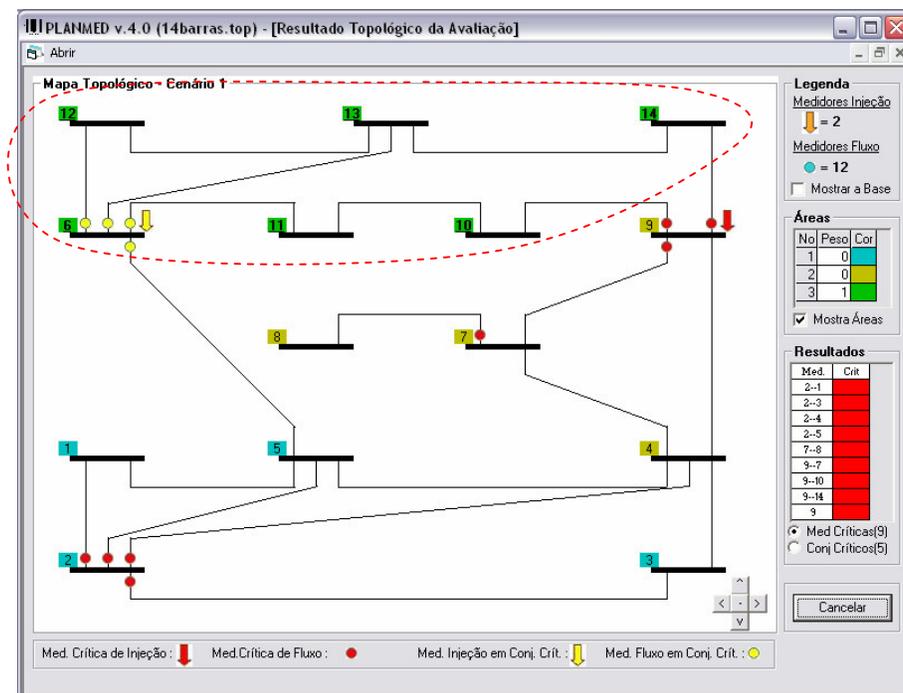


Figura 6.13: Resultado do atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas na área 3.

A solução ótima apresentada na Figura 6.13, indica um plano de medição onde não existem medidas críticas na área 3. Note-se que o sistema não garante o requisito de medidas em conjuntos críticos na área prioritária.

b) Atendimento ao requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos na área 3

Tabela 6.9: Resultado para o requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos na área 3.

| Área         | N° de UTRs | N° de Medidores de Injeção | N° de Medidores de Fluxo | Total de Medidores | Custo (\$) |
|--------------|------------|----------------------------|--------------------------|--------------------|------------|
| 1            | 1          | 1                          | 3                        | 4                  | 576,50     |
| 2            | 2          | 2                          | 4                        | 6                  |            |
| 3            | 2          | 2                          | 5                        | 7                  |            |
| <b>Total</b> | 5          | 5                          | 12                       | 17                 |            |

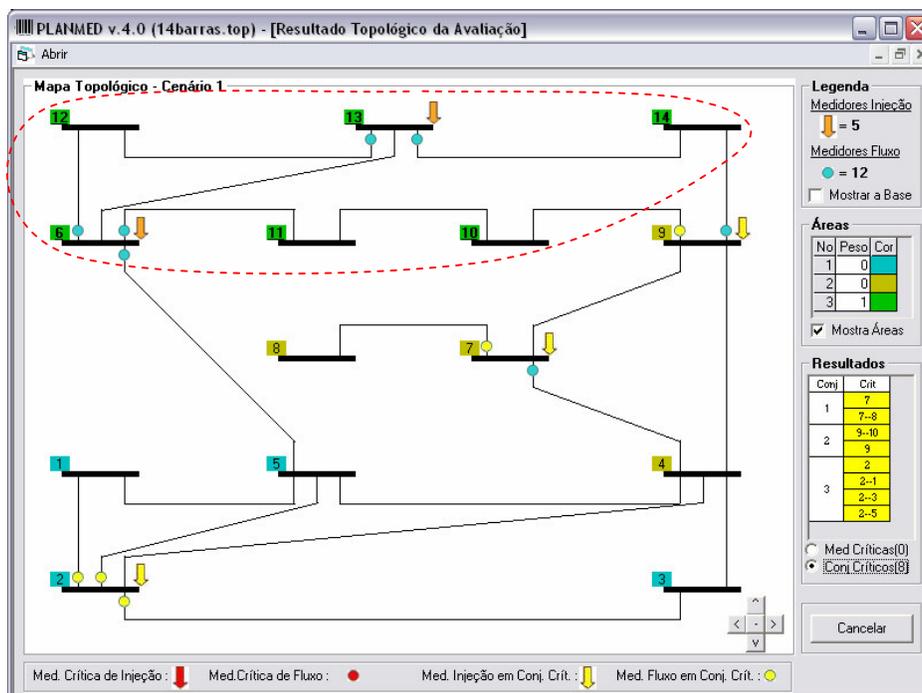


Figura 6.14: Resultado do atendimento ao requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos na área 3.

O plano obtido ilustrada na Figura 6.14 mostra a ausência de medidas em conjuntos críticos na área 3.

### 6.2.2.4 Simulação considerando prioridade nas áreas 1 e 2

a) Atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas nas áreas 1 e 2.

Tabela 6.10: **Resultado para o requisito de ausência de medidas críticas nas áreas 1 e 2.**

| Área         | N° de UTRs | N° de Medidores de Injeção | N° de Medidores de Fluxo | Total de Medidores | Custo (\$) |
|--------------|------------|----------------------------|--------------------------|--------------------|------------|
| 1            | 1          | 1                          | 4                        | 5                  | 467,50     |
| 2            | 2          | 2                          | 4                        | 6                  |            |
| 3            | 1          | 1                          | 3                        | 4                  |            |
| <b>Total</b> | 4          | 4                          | 11                       | 15                 |            |

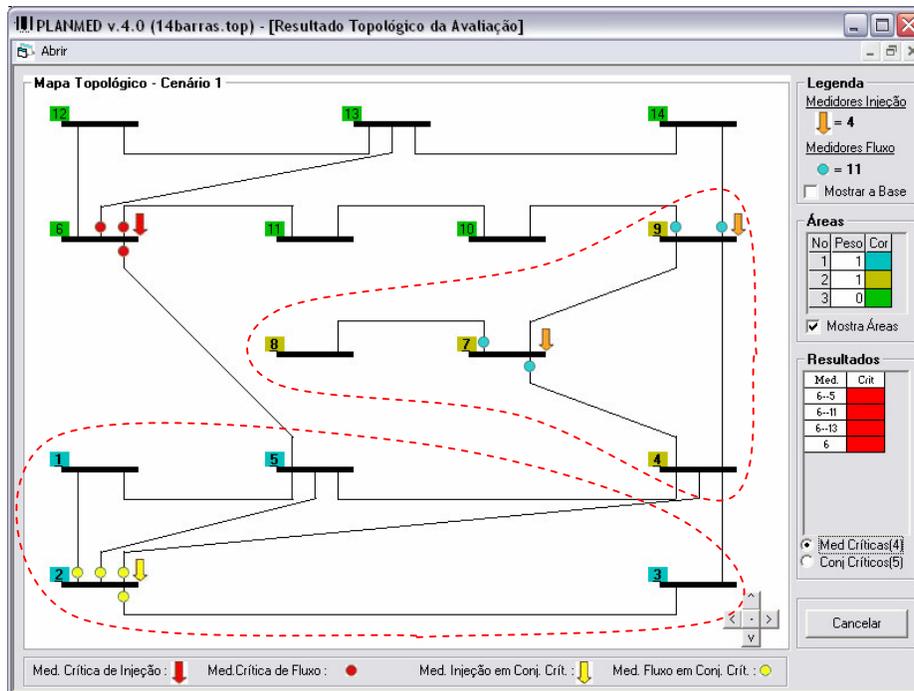


Figura 6.15: **Resultado do atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas nas áreas 1 e 2.**

A solução ótima apresentada na Figura 6.15, indica um plano de medição com ausência de medidas críticas nas áreas 1 e 2. Note-se também a diminuição do custo em relação a um cenário topológico sem divisão por áreas de interesse como foi mostrado na Tabela 6.2.

b) Atendimento ao requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos nas áreas 1 e 2.

Tabela 6.11: Resultado para o requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos nas áreas 1 e 2.

| Área         | N° de UTRs | N° de Medidores de Injeção | N° de Medidores de Fluxo | Total de Medidores | Custo (\$) |
|--------------|------------|----------------------------|--------------------------|--------------------|------------|
| 1            | 2          | 2                          | 3                        | 5                  | 781,00     |
| 2            | 2          | 2                          | 5                        | 7                  |            |
| 3            | 3          | 2                          | 4                        | 6                  |            |
| <b>Total</b> | 7          | 6                          | 12                       | 18                 |            |

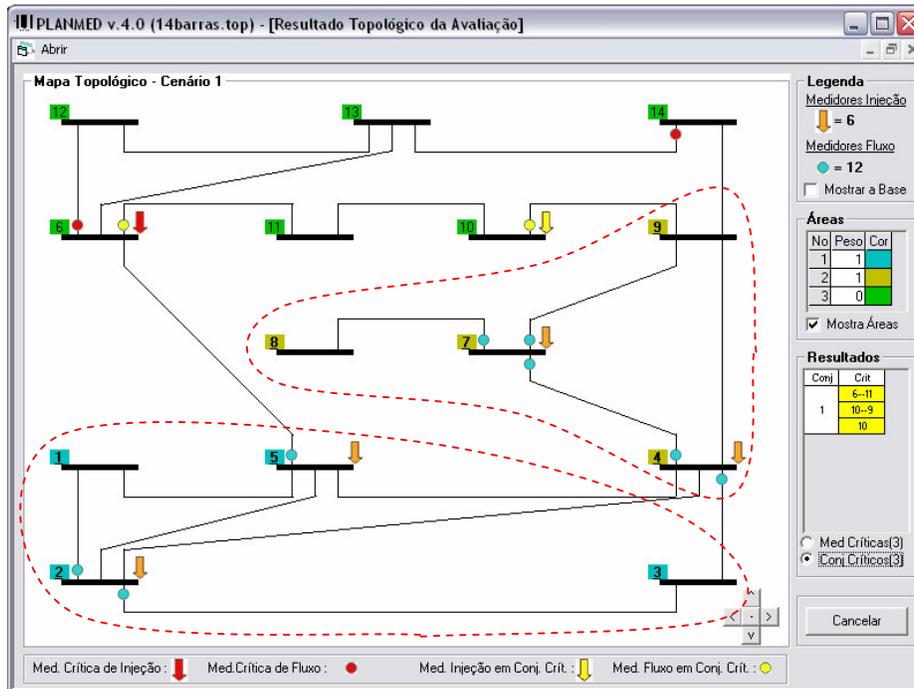


Figura 6.16: Resultado do atendimento ao requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos nas áreas 1 e 2.

A solução ótima apresentada na Figura 6.16, mostra um plano de medição com ausência de medidas em conjuntos críticos nas áreas 1 e 2. Note-se também a diminuição do custo em relação a um cenário topológico sem divisão por áreas de interesse como foi mostrado na Tabela 6.3.

### 6.2.2.5 Simulação considerando prioridade nas áreas 2 e 3

a) Atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas nas áreas 2 e 3.

Tabela 6.12: **Resultado para o requisito de ausência de medidas críticas nas áreas 2 e 3.**

| Área         | N° de UTRs | N° de Medidores de Injeção | N° de Medidores de Fluxo | Total de Medidores | Custo (\$) |
|--------------|------------|----------------------------|--------------------------|--------------------|------------|
| 1            | 1          | 1                          | 3                        | 4                  | 467,50     |
| 2            | 2          | 2                          | 4                        | 6                  |            |
| 3            | 1          | 1                          | 4                        | 5                  |            |
| <b>Total</b> | 4          | 4                          | 11                       | 15                 |            |

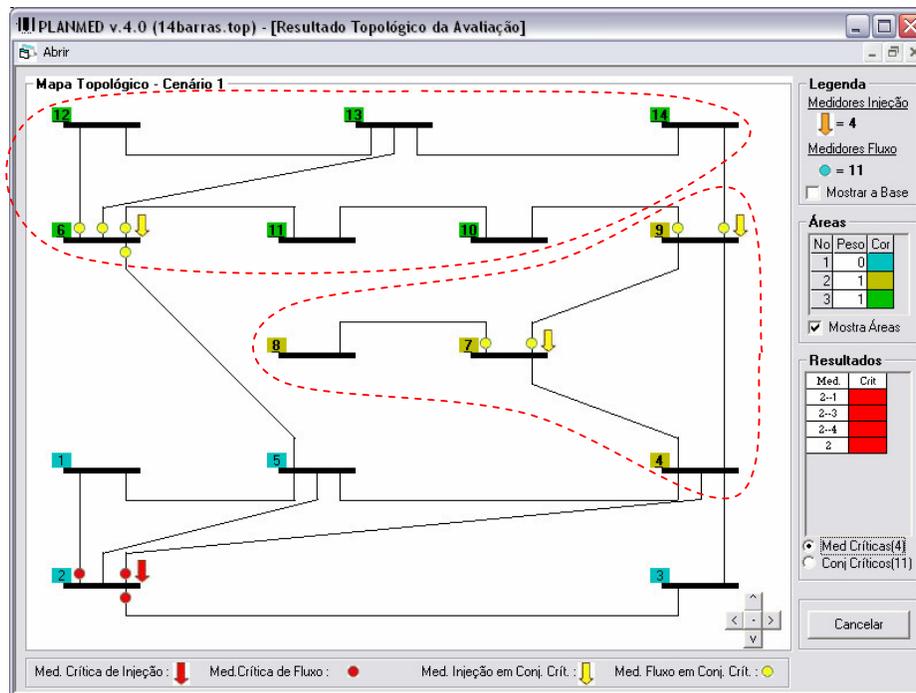


Figura 6.17: **Resultado do atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas nas áreas 2 e 3.**

No resultado obtido mostrado na Figura 6.17, é possível verificar o requisito de ausência de medidas críticas nas áreas 2 e 3 consideradas prioritárias.

b) Atendimento ao requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos nas áreas 2 e 3.

Tabela 6.13: Resultado para o requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos nas áreas 2 e 3.

| Área         | N° de UTRs | N° de Medidores de Injeção | N° de Medidores de Fluxo | Total de Medidores | Custo (\$) |
|--------------|------------|----------------------------|--------------------------|--------------------|------------|
| 1            | 1          | 1                          | 3                        | 4                  | 681,00     |
| 2            | 2          | 2                          | 5                        | 7                  |            |
| 3            | 3          | 2                          | 5                        | 7                  |            |
| <b>Total</b> | 6          | 5                          | 13                       | 19                 |            |

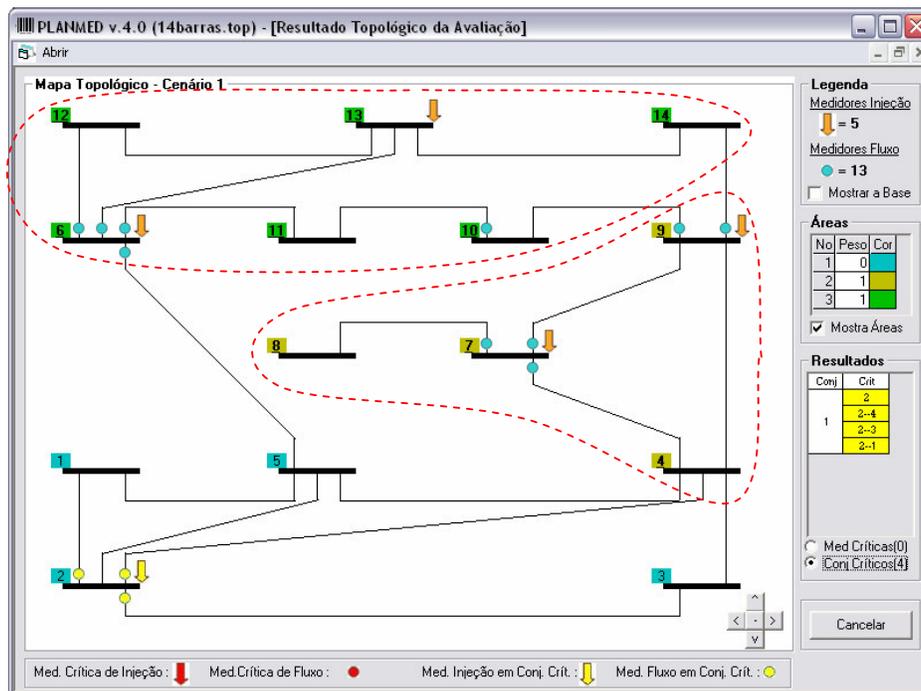


Figura 6.18: Resultado da do atendimento ao requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos nas áreas 2 e 3.

O plano obtido mostrado na Figura 6.18 mostra a ausência de medidas em conjuntos críticos nas áreas 2 e 3. É possível observar o incremento de UTRs com relação ao requisito anterior mostrado na Tabela 6.12. Além desse incremento, foi possível obter um custo menor em relação a um cenário topológico sem áreas de interesse como mostrado na Tabela 6.3.

### 6.2.2.6 Simulação considerando prioridade nas áreas 1 e 3

a) Atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas nas áreas 1 e 3.

Tabela 6.14: Resultado para o requisito de ausência de medidas críticas nas áreas 1 e 3.

| Área         | N° de UTRs | N° de Medidores de Injeção | N° de Medidores de Fluxo | Total de Medidores | Custo (\$) |
|--------------|------------|----------------------------|--------------------------|--------------------|------------|
| 1            | 2          | 1                          | 4                        | 5                  | 467,50     |
| 2            | 2          | 2                          | 3                        | 5                  |            |
| 3            | 1          | 1                          | 4                        | 5                  |            |
| <b>Total</b> | 5          | 4                          | 11                       | 15                 |            |

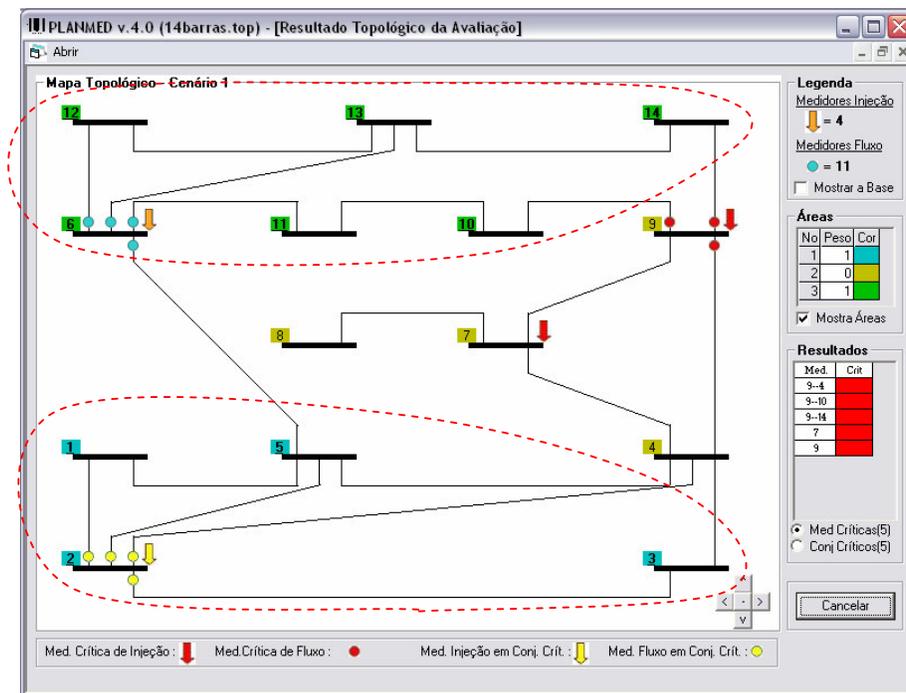


Figura 6.19: Resultado do atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas nas áreas 1 e 3.

No resultado obtido mostrado na Figura 6.19, é possível verificar o requisito de ausência de medidas críticas nas áreas 1 e 3 consideradas prioritárias. Já na área sem prioridade é possível verificar a presença de medidas críticas.

b) Atendimento ao requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos nas áreas 1 e 3.

Tabela 6.15: **Resultado para o requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos nas áreas 1 e 3.**

| Área         | Nº de UTRs | Nº de Medidores de Injeção | Nº de Medidores de Fluxo | Total de Medidores | Custo (\$) |
|--------------|------------|----------------------------|--------------------------|--------------------|------------|
| 1            | 2          | 2                          | 3                        | 5                  | 763,00     |
| 2            | 2          | 2                          | 2                        | 4                  |            |
| 3            | 3          | 2                          | 3                        | 5                  |            |
| <b>Total</b> | 7          | 6                          | 8                        | 14                 |            |

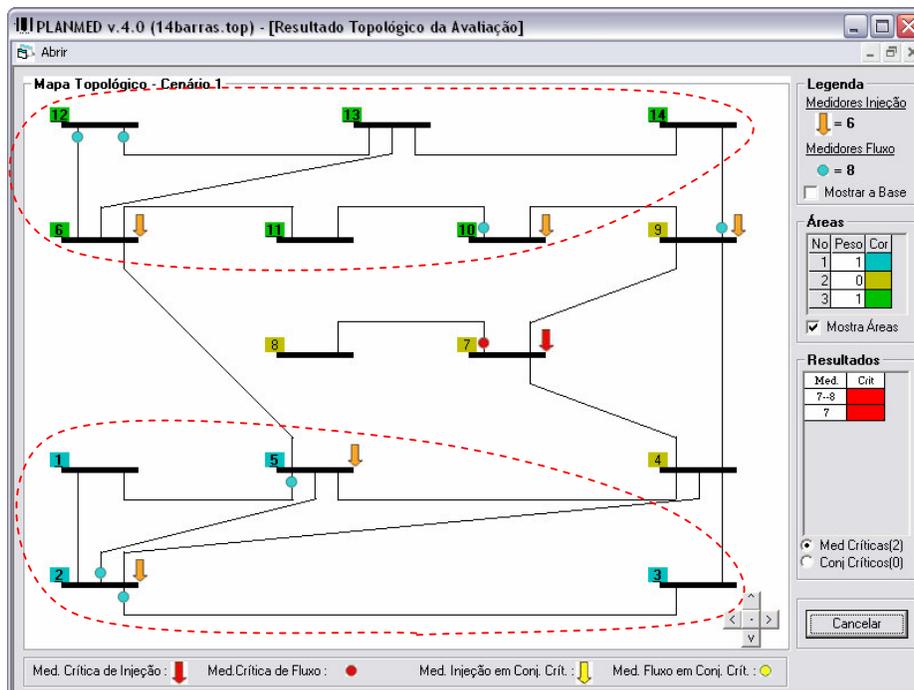


Figura 6.20: **Resultado do atendimento ao requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos nas áreas 1 e 3.**

O plano obtido mostrado na Figura 6.20 mostra a ausência de medidas em conjuntos críticos nas áreas 1 e 3. Note-se que neste caso o número de medidores é maior nas áreas prioritárias o que garante maior confiabilidade das medições nessas áreas.

### 6.2.3 Considerando Cenários Alternativos de Interesse

Para esta simulação foram criados de forma arbitrária 20 cenários topológicos alternativos mostrados na Tabela 6.16, que representam possíveis modificações do cenário topológico principal, por exemplo, se ocorreram desligamentos de um ou mais ramos.

Tabela 6.16: **Cenários alternativos.**

| <b>N°<br/>Cenário</b> | <b>Ramo fora de<br/>operação</b> | <b>N°<br/>Cenário</b> | <b>Ramo fora de<br/>operação</b> |
|-----------------------|----------------------------------|-----------------------|----------------------------------|
| <b>1</b>              | --                               | <b>11</b>             | 5 – 6                            |
| <b>2</b>              | 1 – 2                            | <b>12</b>             | 6 – 11                           |
| <b>3</b>              | 1 – 5                            | <b>13</b>             | 6 – 12                           |
| <b>4</b>              | 2 – 3                            | <b>14</b>             | 6 – 13                           |
| <b>5</b>              | 2 – 4                            | <b>15</b>             | 7 – 9                            |
| <b>6</b>              | 2 – 5                            | <b>16</b>             | 9 – 10                           |
| <b>7</b>              | 3 – 4                            | <b>17</b>             | 9 – 14                           |
| <b>8</b>              | 4 – 5                            | <b>18</b>             | 10 – 11                          |
| <b>9</b>              | 4 – 7                            | <b>19</b>             | 12 – 13                          |
| <b>10</b>             | 4 – 9                            | <b>20</b>             | 13 – 14                          |

Para realizar os testes foram definidos de forma arbitrária grupos de cenários para a avaliação dos requisitos de observabilidade, ausência de medidas críticas e ausência de medidas em conjuntos críticos. Estes grupos estão definidos como:

Grupo A:

Cenários: **1, 2, 4, 7, 12**

Grupo B:

Cenários: **9, 10, 11, 15, 16**

Grupo C:

Cenários: **3, 5, 6, 8, 13, 14, 17, 18, 19, 20**

a) Atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas nos grupos de cenários topológicos alternativos A, B e C.

Tabela 6.17: Resultado para o requisito de ausência de medidas críticas nos grupos A, B e C de cenários topológicos alternativos.

| Área | Nº de UTRs | Nº de Medidores de Injeção | Nº de Medidores de Fluxo | Total de Medidores | Custo (\$) |
|------|------------|----------------------------|--------------------------|--------------------|------------|
| 1    | 8          | 8                          | 10                       | 18                 | 881,00     |

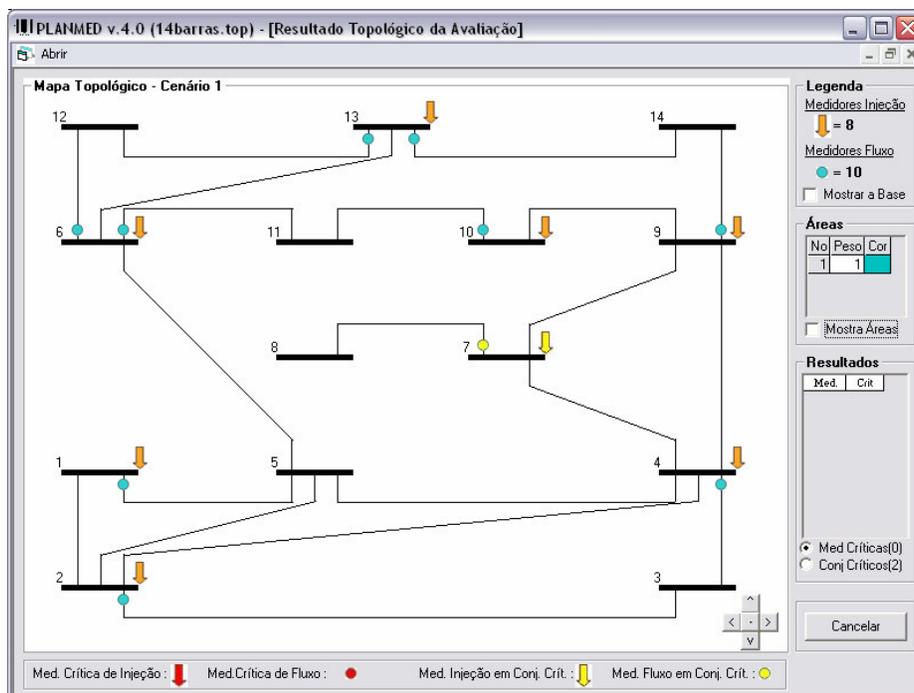


Figura 6.21: Resultado do atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas nos grupos A, B e C de cenários topológicos alternativos.

A solução obtida mostrada na Figura 6.21, indica que foi possível garantir o requisito de ausência de medidas críticas nos grupos A, B e C de cenários topológicos alternativos. Note-se que no planejamento com diversos cenários de interesse o custo é maior, devido a que se garante o atendimento ao requisito estabelecido também para cada cenário topológico alternativo.

- b) Atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas no grupo de cenários alternativos A e requisito de observabilidade nos grupos de cenários alternativos B e C.

Tabela 6.18: **Resultado para o requisito de ausência de medidas críticas para grupo A e observabilidade nos grupos B e C.**

| Área | Nº de UTRs | Nº de Medidores de Injeção | Nº de Medidores de Fluxo | Total de Medidores | Custo (\$) |
|------|------------|----------------------------|--------------------------|--------------------|------------|
| 1    | 8          | 7                          | 8                        | 15                 | 867,50     |

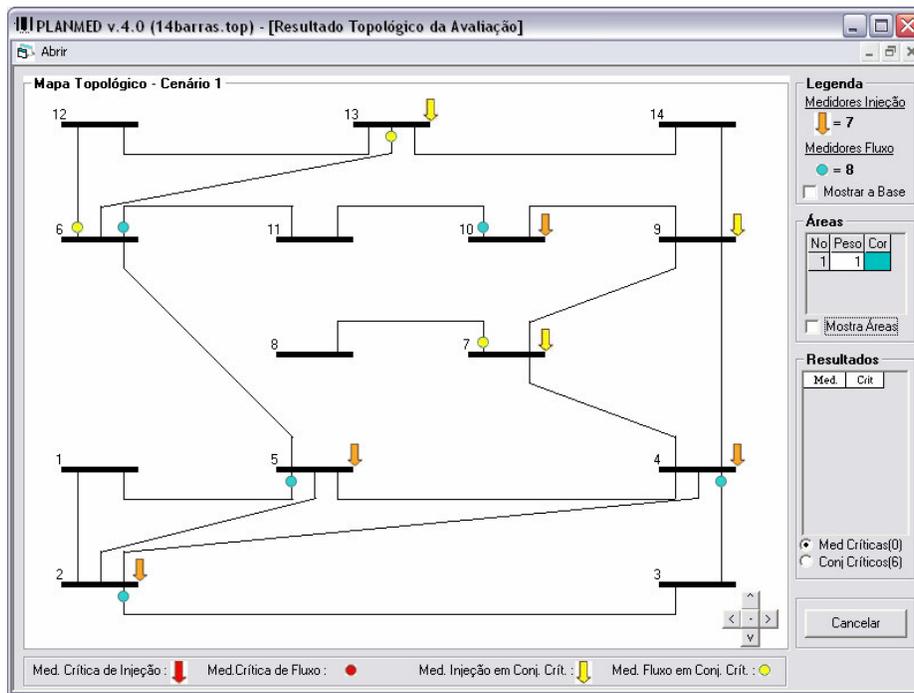


Figura 6.22: **Resultado do atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas no grupo A e requisito de observabilidade nos grupos B e C.**

O resultado apresentado na Figura 6.22 mostra a diminuição do custo do plano de medição em relação ao teste anterior mostrado na Tabela 6.17. Isto devido que foi garantido unicamente o requisito de ausência de medidas críticas no grupo A de cenários alternativos. Note-se que também a diminuição do número de medidores de fluxo no plano de medição.

- c) Atendimento ao requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos nos grupos de cenários alternativos A e B e requisito de ausência de medidas críticas no grupo de cenários alternativos C.

Tabela 6.19: **Resultado para o requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos nos grupos A e B e ausência de medidas críticas no grupo C.**

| Área | Nº de UTRs | Nº de Medidores de Injeção | Nº de Medidores de Fluxo | Total de Medidores | Custo (\$) |
|------|------------|----------------------------|--------------------------|--------------------|------------|
| 1    | 12         | 12                         | 13                       | 25                 | 1312,50    |

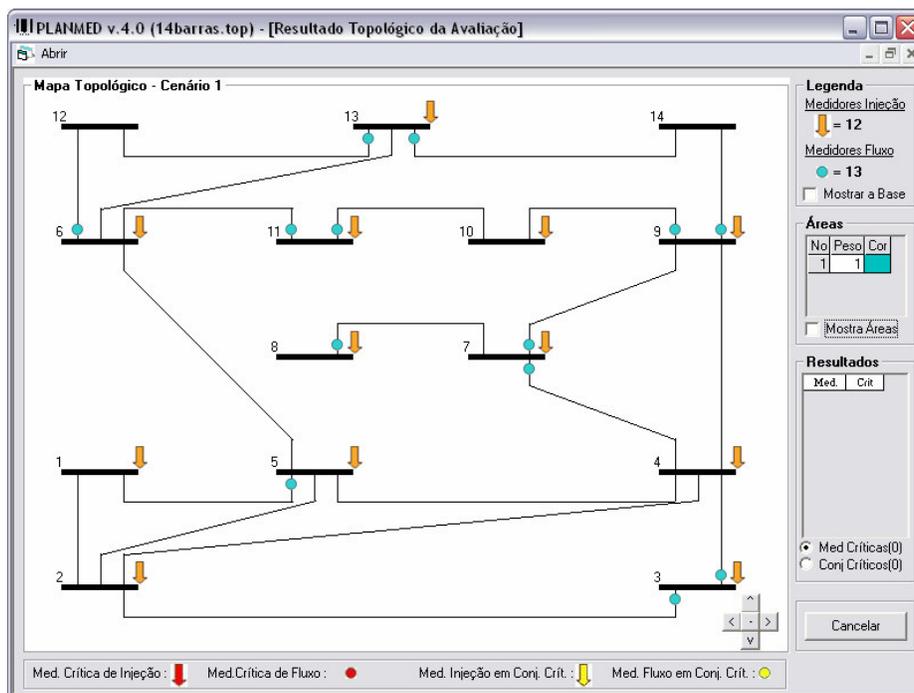


Figura 6.23: **Resultado do atendimento ao requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos nos grupos A e B e ausência de medidas críticas no grupo C.**

A solução apresentada na Figura 6.23 mostra a ausência de medidas críticas e conjuntos críticos. Isto leva conseqüentemente a um incremento no número de UTRs e medidores e um custo maior do plano de medição.

- d) Atendimento ao requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos no grupo de cenários alternativos A e requisito de observabilidade nos grupos de cenários alternativos B e C.

Tabela 6.20: **Resultado para o requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos no grupo A e observabilidade nos grupos B e C.**

| Área | N° de UTRs | N° de Medidores de Injeção | N° de Medidores de Fluxo | Total de Medidores | Custo (\$) |
|------|------------|----------------------------|--------------------------|--------------------|------------|
| 1    | 12         | 10                         | 11                       | 21                 | 1294,50    |

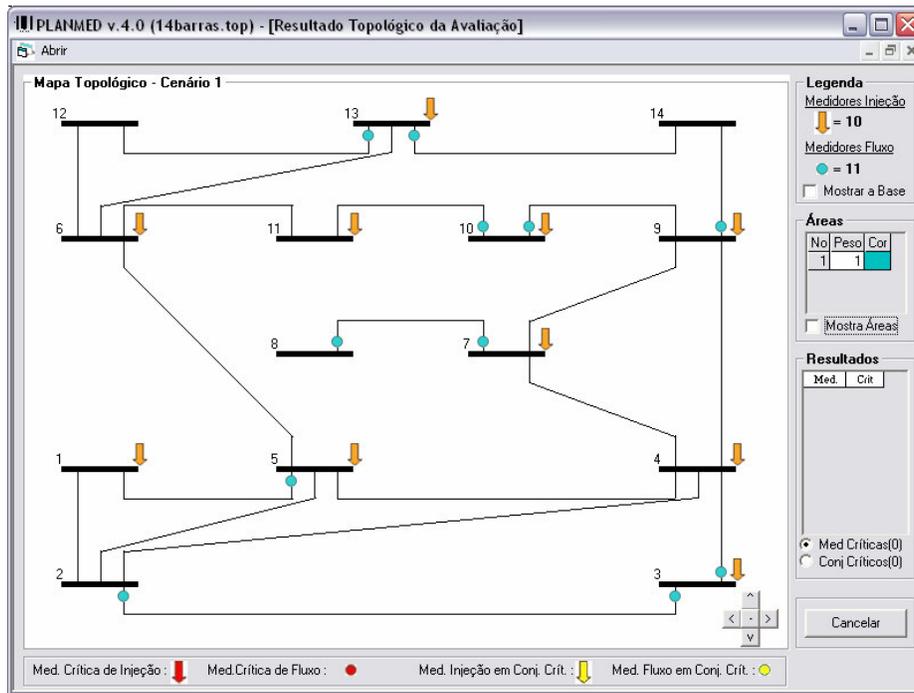


Figura 6.24: **Resultado do atendimento ao requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos no grupo A e observabilidade nos grupos B e C.**

A solução apresentada na Figura 6.24 mostra também a ausência de medidas críticas e conjuntos críticos. Em comparação com os resultados do teste anterior, existe uma diminuição do número de medidores devido a que nos grupos de cenários alternativos B e C foi somente avaliado o requisito de observabilidade.

### 6.3 Simulação com o Sistema IEEE-118

A segunda simulação foi feita na configuração da rede do sistema IEEE-118. Para o Algoritmo Genético, o cromossomo está representado através de um vetor de 476 posições, no qual, cada posição corresponde a uma localização na rede elétrica onde pode ser instalado um tipo de medidor. Para este caso, as 358 primeiras posições do vetor representam todas as possíveis medidas de fluxo (uma por cada extremo de cada um dos 179 ramos como foi explicado na Seção 5.3.1) e as 118 posições restantes representam as possíveis medidas de injeção de potência mostradas em forma de seta de cor laranja, localizadas em cada barra da rede. A Figura 6.25 mostra a configuração da rede do sistema IEEE-118.

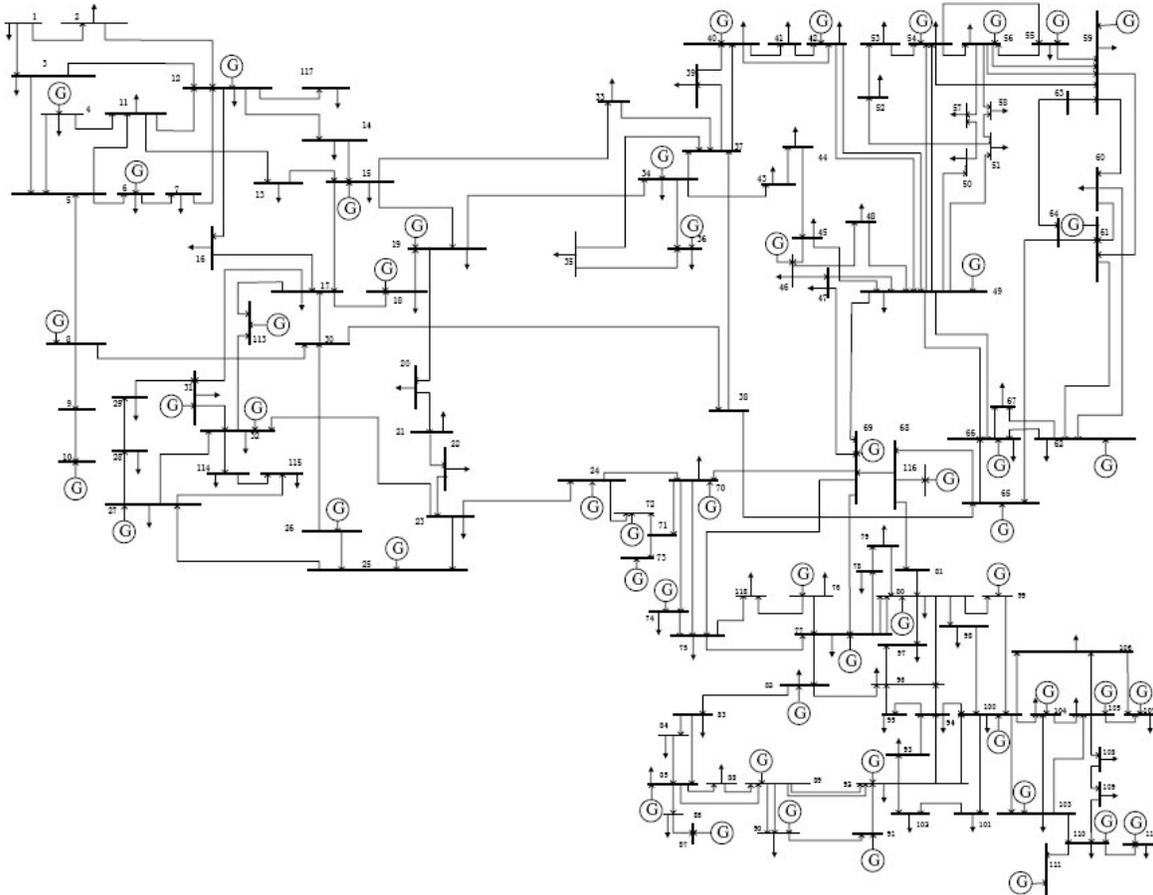
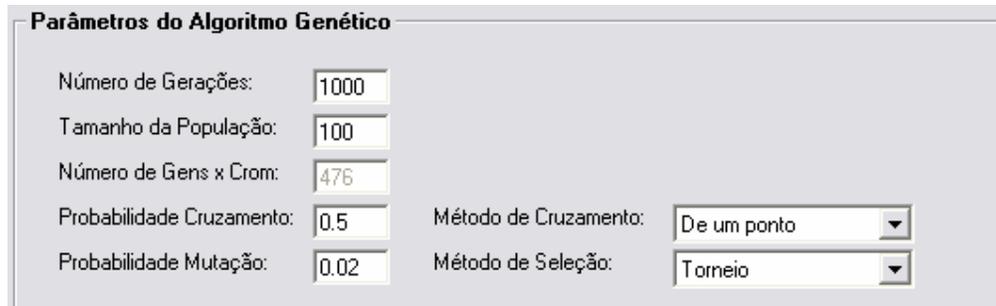


Figura 6.25: Sistema IEEE-118

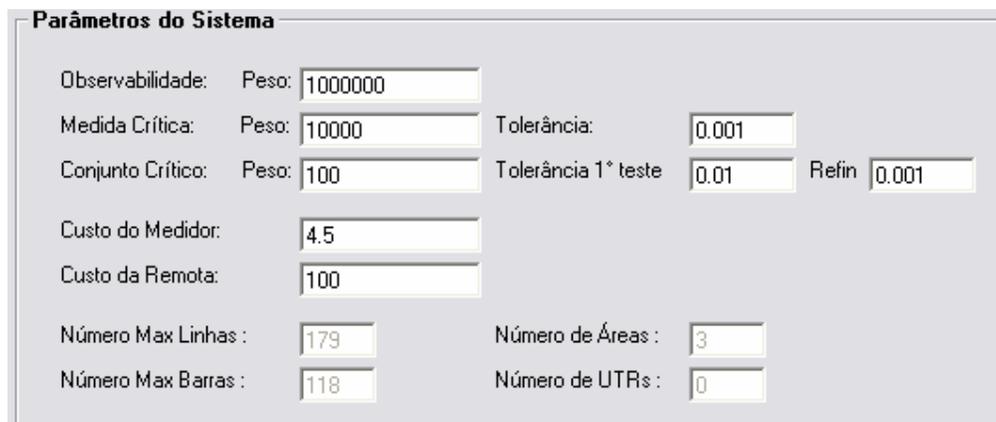
Os parâmetros utilizados para algoritmo genético, nas diversas simulações realizadas no sistema IEEE-118, são mostrados na Figura 6.26. Também se considerou aleatória a inicialização da primeira população.



| Parâmetros do Algoritmo Genético |             |
|----------------------------------|-------------|
| Número de Gerações:              | 1000        |
| Tamanho da População:            | 100         |
| Número de Gens x Crom:           | 476         |
| Probabilidade Cruzamento:        | 0.5         |
| Probabilidade Mutação:           | 0.02        |
| Método de Cruzamento:            | De um ponto |
| Método de Seleção:               | Torneio     |

Figura 6.26: **Parâmetros do Algoritmo Genético do sistema IEEE-118.**

Os parâmetros utilizados para o sistema de planejamento para o sistema IEEE-118 barras são mostrados na Figura 6.27.



| Parâmetros do Sistema   |         |                      |       |
|-------------------------|---------|----------------------|-------|
| Observabilidade: Peso:  | 1000000 |                      |       |
| Medida Crítica: Peso:   | 10000   | Tolerância:          | 0.001 |
| Conjunto Crítico: Peso: | 100     | Tolerância 1° teste: | 0.01  |
|                         |         | Refin:               | 0.001 |
| Custo do Medidor:       | 4.5     |                      |       |
| Custo da Remota:        | 100     |                      |       |
| Número Max Linhas :     | 179     | Número de Áreas :    | 3     |
| Número Max Barras :     | 118     | Número de UTRs :     | 0     |

Figura 6.27: **Parâmetros do Sistema de Planejamento.**

### 6.3.1 Sem Considerar Áreas de Interesse

#### a) Atendimento ao requisito de observabilidade

Tabela 6.21: **Resultado para o requisito de observabilidade.**

| Área | N° de UTRs | N° de Medidores de Injeção | N° de Medidores de Fluxo | Total de Medidores | Custo (\$) |
|------|------------|----------------------------|--------------------------|--------------------|------------|
| 1    | 72         | 41                         | 119                      | 160                | 7920,00    |

A solução obtida garante um sistema de medição que permitirá a supervisão da rede, atendendo ao requisito de observabilidade.

#### b) Atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas

Tabela 6.22: **Resultado para o requisito de ausência de medidas críticas.**

| Área | N° de UTRs | N° de Medidores de Injeção | N° de Medidores de Fluxo | Total de Medidores | Custo (\$) |
|------|------------|----------------------------|--------------------------|--------------------|------------|
| 1    | 81         | 48                         | 136                      | 184                | 8928,00    |

A solução ótima apresentada indica um plano de medição onde não existem medidas críticas para a configuração da rede. Para este cenário, pode-se ainda observar a rede mesmo com perda de medidas.

#### c) Atendimento ao requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos

Tabela 6.23: **Resultado para o requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos sem áreas.**

| Área | N° de UTRs | N° de Medidores de Injeção | N° de Medidores de Fluxo | Total de Medidores | Custo (\$) |
|------|------------|----------------------------|--------------------------|--------------------|------------|
| 1    | 103        | 69                         | 174                      | 239                | 10475,50   |

A solução ótima apresentada indica um plano de medição onde não existem medidas em conjuntos críticos para a configuração da rede.

### 6.3.2 Considerando Áreas de Interesse

Para esta simulação o sistema IEEE-118 foi dividido em três áreas de interesse de forma arbitrária. As barras estão agrupadas da maneira seguinte:

#### Área 1:

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 113, 114, 115, 117.

#### Área 2:

24, 38, 62, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 116, 118.

#### Área 3:

33, 34, 35, 36, 37, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 63, 65.

A partir destas agrupações serão feitas simulações para avaliar o custo em função à priorização do atendimento dos requisitos em áreas específicas de interesse.

#### 6.3.2.1 Simulação considerando área 1 com prioridade

a) Atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas na área 1.

Tabela 6.24: **Resultado para o requisito de ausência de medidas críticas na área 1.**

| Área         | N° de Medidores de Injeção | N° de Medidores de Fluxo | Total de Medidores | Custo (\$) |
|--------------|----------------------------|--------------------------|--------------------|------------|
| 1            | 15                         | 40                       | 55                 | 7851,50    |
| 2            | 16                         | 51                       | 67                 |            |
| 3            | 12                         | 33                       | 45                 |            |
| <b>Total</b> | 43                         | 124                      | 167                |            |

No resultado obtido, é possível observar que o custo do plano de medição é menor quando é definida a área 1 um como prioritária.

- b) Atendimento ao requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos na área 1.

Tabela 6.25: Resultado para o requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos na área 1.

| Área         | N° de Medidores de Injeção | N° de Medidores de Fluxo | Total de Medidores | Custo (\$) |
|--------------|----------------------------|--------------------------|--------------------|------------|
| 1            | 16                         | 40                       | 56                 | 8250,00    |
| 2            | 16                         | 56                       | 72                 |            |
| 3            | 10                         | 33                       | 43                 |            |
| <b>Total</b> | 42                         | 129                      | 171                |            |

No resultado mostrado na Tabela 6.25 percebe-se um incremento no custo do plano de medição para o atendimento de ausência de medidas em conjuntos críticos. Note-se que o custo ainda é menor em relação ao custo do sistema sem áreas de interesse.

#### 6.3.2.2 Simulação considerando área 2 com prioridade

- a) Atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas

Tabela 6.26: Resultado para o requisito de ausência de medidas críticas na área 2.

| Área         | N° de Medidores de Injeção | N° de Medidores de Fluxo | Total de Medidores | Custo (\$) |
|--------------|----------------------------|--------------------------|--------------------|------------|
| 1            | 9                          | 31                       | 40                 | 8051,5     |
| 2            | 23                         | 65                       | 88                 |            |
| 3            | 10                         | 29                       | 39                 |            |
| <b>Total</b> | 42                         | 125                      | 167                |            |

No resultado mostrado na Tabela 6.26, é possível perceber o incremento do número de medidores na área 2 onde foi atendido o requisito de ausência de medidas críticas. Para este caso o custo também é menor em relação a um sistema sem áreas de interesse.

- b) Atendimento ao requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos na área 2.

Tabela 6.27: **Resultado para o requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos na área 2.**

| Área         | N° de Medidores de Injeção | N° de Medidores de Fluxo | Total de Medidores | Custo (\$) |
|--------------|----------------------------|--------------------------|--------------------|------------|
| 1            | 13                         | 43                       | 56                 | 9436,00    |
| <b>2</b>     | <b>33</b>                  | <b>73</b>                | <b>106</b>         |            |
| 3            | 10                         | 36                       | 46                 |            |
| <b>Total</b> | 56                         | 152                      | 208                |            |

No resultado mostrado na Tabela 6.27, o plano de medição possui um maior número de medidores e UTRs na área 2. Isto é devido à existência de maior número de barras incluídas nessa área.

### 6.3.2.3 Simulação considerando área 3 de maior prioridade

- a) Atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas na área 3.

Tabela 6.28: **Resultado para o requisito de ausência de medidas críticas na área 3.**

| Área         | N° de Medidores de Injeção | N° de Medidores de Fluxo | Total de Medidores | Custo (\$) |
|--------------|----------------------------|--------------------------|--------------------|------------|
| 1            | 13                         | 29                       | 42                 | 7920,00    |
| 2            | 17                         | 53                       | 70                 |            |
| <b>3</b>     | <b>13</b>                  | <b>35</b>                | <b>48</b>          |            |
| <b>Total</b> | 43                         | 117                      | 160                |            |

No resultado da Tabela 6.28 é possível observar que o custo do plano de medição é menor em relação a um sistema sem áreas de interesse quando é definida a área 3 um como prioritária.

- b) Atendimento ao requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos na área 3.

Tabela 6.29: **Resultado para o requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos na área 3.**

| Área         | N° de Medidores de Injeção | N° de Medidores de Fluxo | Total de Medidores | Custo (\$) |
|--------------|----------------------------|--------------------------|--------------------|------------|
| 1            | 16                         | 30                       | 46                 | 8514,50    |
| 2            | 22                         | 55                       | 77                 |            |
| <b>3</b>     | <b>13</b>                  | <b>45</b>                | <b>58</b>          |            |
| <b>Total</b> | 51                         | 130                      | 181                |            |

No resultado mostrado na Tabela 6.29 de igual forma que o resultado obtido na Tabela 6.28 é possível observar que os custos para o atendimento aos requisitos definidos para a área 3, são menores em relação aos custos para um sistema sem áreas de interesse.

#### 6.3.2.4 Simulação considerando prioridade nas áreas 1 e 2

- a) Teste para atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas nas áreas 1 e 2.

Tabela 6.30: **Resultado para o requisito de ausência de medidas críticas nas áreas 1 e 2.**

| Área         | N° de Medidores de Injeção | N° de Medidores de Fluxo | Total de Medidores | Custo (\$) |
|--------------|----------------------------|--------------------------|--------------------|------------|
| <b>1</b>     | <b>14</b>                  | <b>39</b>                | <b>53</b>          | 8419,00    |
| <b>2</b>     | <b>25</b>                  | <b>64</b>                | <b>89</b>          |            |
| 3            | 12                         | 28                       | 40                 |            |
| <b>Total</b> | 51                         | 131                      | 182                |            |

Na Tabela 6.30 se mostram os resultados do plano de medição para o requisito de ausência de medidas críticas. Note-se que existe um incremento em relação ao número de medidores mostrados na Tabela 6.29.

- b) Atendimento ao requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos nas áreas 1 e 2.

Tabela 6.31: **Resultado para o requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos nas áreas 1 e 2.**

| Área         | N° de Medidores de Injeção | N° de Medidores de Fluxo | Total de Medidores | Custo (\$) |
|--------------|----------------------------|--------------------------|--------------------|------------|
| 1            | 23                         | 49                       | 72                 | 10321,5    |
| 2            | 41                         | 68                       | 109                |            |
| 3            | 12                         | 34                       | 46                 |            |
| <b>Total</b> | 76                         | 151                      | 227                |            |

No resultado mostrado na Tabela 6.31 percebe-se um incremento no custo do plano de medição, assim como, o incremento do número de medidores.

#### 6.3.2.5 Simulação considerando prioridade nas áreas 2 e 3

- a) Atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas nas áreas 2 e 3.

Tabela 6.32: **Resultado para o requisito de ausência de medidas críticas nas áreas 2 e 3.**

| Área         | N° de Medidores de Injeção | N° de Medidores de Fluxo | Total de Medidores | Custo (\$) |
|--------------|----------------------------|--------------------------|--------------------|------------|
| 1            | 14                         | 28                       | 42                 | 8823,50    |
| 2            | 26                         | 62                       | 88                 |            |
| 3            | 12                         | 41                       | 53                 |            |
| <b>Total</b> | 52                         | 131                      | 183                |            |

No resultado mostrado na Tabela 6.32 pode-se perceber a distribuição de um maior número de medidores nas áreas consideradas prioritárias para garantir o atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas.

- b) Atendimento ao requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos nas áreas 2 e 3.

Tabela 6.33: **Resultado para o requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos nas áreas 2 e 3.**

| Área         | N° de Medidores de Injeção | N° de Medidores de Fluxo | Total de Medidores | Custo (\$) |
|--------------|----------------------------|--------------------------|--------------------|------------|
| 1            | 14                         | 38                       | 52                 | 9658,50    |
| 2            | 27                         | 77                       | 104                |            |
| 3            | 18                         | 39                       | 57                 |            |
| <b>Total</b> | 59                         | 154                      | 213                |            |

O resultado mostrado na Tabela 6.33 mostra também o incremento do número de medidores alocados nas áreas de prioridade no atendimento ao requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos.

#### 6.3.2.6 Simulação considerando prioridade nas áreas 1 e 3

- a) Atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas nas áreas 1 e 3.

Tabela 6.34: **Resultado para o requisito de ausência de medidas críticas nas áreas 1 e 3.**

| Área         | N° de Medidores de Injeção | N° de Medidores de Fluxo | Total de Medidores | Custo (\$) |
|--------------|----------------------------|--------------------------|--------------------|------------|
| 1            | 14                         | 37                       | 51                 | 8583,00    |
| 2            | 21                         | 58                       | 79                 |            |
| 3            | 10                         | 34                       | 44                 |            |
| <b>Total</b> | 45                         | 129                      | 174                |            |

No resultado da Tabela 6.34 mostram-se os dados do plano de medição para o atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas nas áreas 1 e 3. Note-se a diminuição do custo em relação a um sistema sem áreas de interesse.

b) Atendimento ao requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos nas áreas 1 e 3.

Tabela 6.35: **Resultado para o requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos nas áreas 1 e 3.**

| Área         | N° de Medidores de Injeção | N° de Medidores de Fluxo | Total de Medidores | Custo (\$) |
|--------------|----------------------------|--------------------------|--------------------|------------|
| 1            | 21                         | 49                       | 70                 | 9027,00    |
| 2            | 18                         | 66                       | 84                 |            |
| 3            | 12                         | 40                       | 52                 |            |
| <b>Total</b> | 51                         | 155                      | 206                |            |

No resultado da Tabela 6.35 se mostra um incremento do número total de medidores do plano de medição para o atendimento ao requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos nas áreas 1 e 3 consideradas prioritárias.

## 6.4 Análise Comparativa das Simulações

### 6.4.1 Sistema IEEE-14

Na análise comparativa mostrada na Figura 6.28. Dos resultados obtidos nas simulações com o sistema IEEE-14 para o atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas e ausência de medidas em conjuntos críticos pode-se afirmar que:

- Para caso do atendimento do requisito de ausência de medidas críticas o custo foi menor ou igual em alguns casos, considerando áreas de interesse.
- No caso do atendimento ao requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos, os custos foram menores quando o priorizado em certas áreas de interesse.

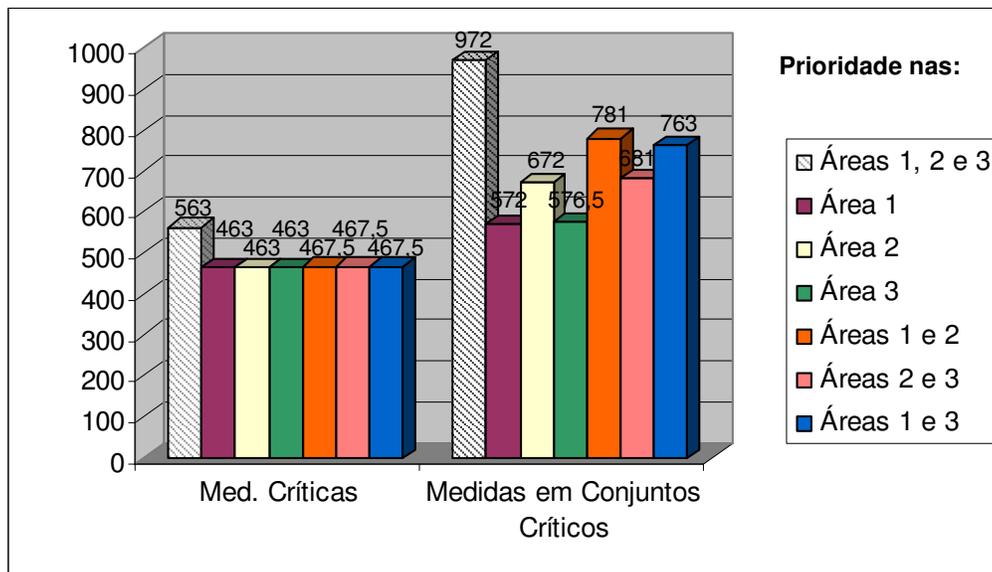


Figura 6.28: Análise comparativa dos requisitos de ausência de medidas críticas e ausência de medidas em conjuntos críticos do sistema IEEE-14.

### 6.4.2 Sistema IEEE-118

Para o caso do sistema IEEE-118 os resultados das simulações são mostradas de maneira comparativa na Figura 6.29. Para o caso do

atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas, a divisão em áreas de interesse apresenta diminuição dos custos em relação ao sistema sem áreas de interesse. Já para o atendimento ao requisito de ausência de medidas em conjuntos críticos o custo também foi menor na existência de áreas de interesse.

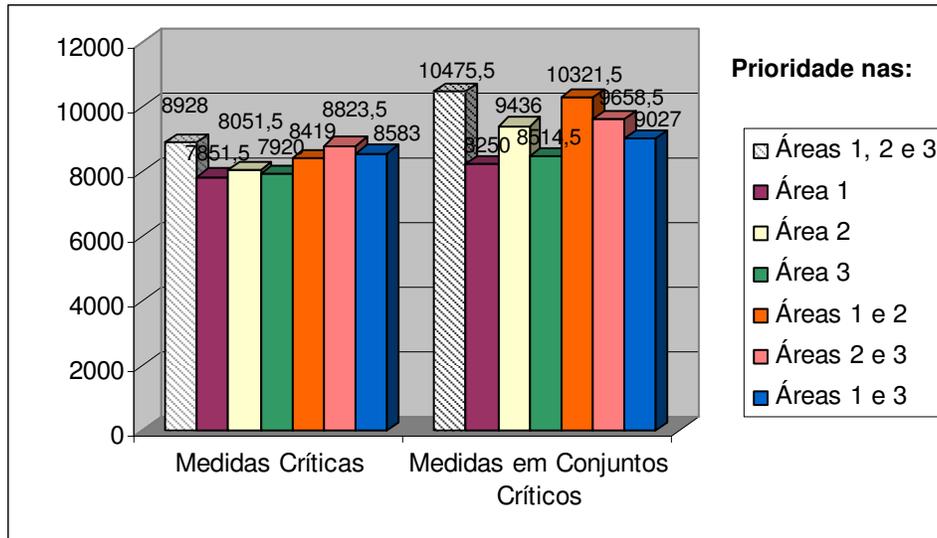


Figura 6.29: Análise comparativa dos requisitos de ausência de medidas críticas e ausência de medidas em conjuntos críticos do sistema IEEE-118.

## 6.5 Comentários sobre os Resultados das Simulações

Analisando os resultados obtidos nas simulações, os seguintes comentários merecem destaques:

- a) Como esperado, constata-se inicialmente que, de forma geral, quanto mais restrições forem consideradas para a obtenção de um plano ótimo de medição, maior tende a ser a redundância necessária, por tanto mais caro torna-se tal plano.
- b) Os tempos computacionais médios foram 3 minutos para o sistema IEEE 14 barras sem consideração de cenários topológicos de interesse. No caso da

consideração com 20 cenários de interesse os tempos médios foram de 11 minutos. Para as simulações realizadas no sistema IEEE 118 barras os tempos médios foram de 13 horas para cada simulação. Tais tempos podem ser reduzidos com aperfeiçoamento da metaheurística empregada.

- c) Confirmou-se também que a redundância se qualifica não apenas em termos numéricos, mas também pelo tipo e localização dos medidores na rede. Por exemplo os resultados dos Testes de requisito de ausência de medidas críticas para a área 1 (sistema IEEE-14, seção 6.2.2.1) e também aqueles obtidos nos testes de requisito de ausência de medidas críticas para a área 2 (sistema IEEE-14, seção 6.2.2.2), verifica-se que foi possível atender dois objetivos distintos com a mesma redundância numérica. Entretanto, os planos de medição correspondentes diferem em tipo de posicionamento de medidores na rede.
- d) Verificou-se que a definição das áreas de interesse para supervisão pode ter grande influencia na determinação do plano ótimo de medição. Reduzindo o número de barras nas áreas onde não são consideradas prioritárias. Com esta redução pode-se obter um plano de medição a um menor custo.
- e) Verificou-se que a definição dos cenários topológicos de interesse para a supervisão pode ter grande influência na determinação do plano ótimo de medição. Restringido o número de configurações de interesse, pode-se obter um plano de medição de custo significativamente menor.
- f) Como era esperado, foram cumpridas as restrições assinadas às áreas de interesse, sendo alocados os pontos de medição de maneira a satisfazer estes requisitos que foram verificados com a opção de avaliação do plano de medição, de acordo ao resultado final do planejamento.
- g) Diferentes operadores e valores de parâmetros do AG foram testados, tendo sido os resultados obtidos com aqueles que levarem ao melhor desempenho.

### CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

---

#### 7.1 Conclusões

O conhecimento do estado operativo do sistema é de fundamental importância em um ambiente onde é exigida a tomada de decisão em tempo real, dependendo dela o sucesso das operações realizadas. O Estimador de Estado é responsável por disponibilizar, em tempo real, informações confiáveis a serem processadas pelas funções de análise e automação. O sucesso da Estimação de Estados, por sua vez, depende da existência de um plano de medição adequado.

Este trabalho apresentou uma ferramenta computacional baseada na metodologia para o planejamento e avaliação de sistemas de medição em redes de transmissão de energia elétrica divididas em áreas de interesse. A técnica de Algoritmos Genéticos foi utilizada como ferramenta de otimização, visando sempre buscar a melhor relação de compromisso entre o custo do sistema de medição e o atendimento aos requisitos de desempenho para a função de Estimação de Estado.

A ferramenta computacional apresentada, permite ao projetista definir, planejar e avaliar um determinado sistema, de maneira simples e rápida. Isto devido ao entorno visual da ferramenta, assim como as funcionalidades gráficas que possibilitam uma clara avaliação dos resultados obtidos do sistema, possibilitando escolher, de acordo com o requerimento, as restrições a serem atendidas em cada cenário topológico e área de interesse para o planejamento. A composição de custos para o sistema de medição e aspectos

tais como a existência previa de UTRs, é facilmente levado em consideração na formulação adotada para o problema tratado.

Dentro das principais conclusões, pode-se destacar:

- A metodologia proposta mostrou-se bastante flexível quanto à formulação do problema de otimização (objetivo e restrições) e eficaz na busca da solução ótima.
- A possibilidade da definição de áreas e de cenários de interesse. Isto permitirá garantir a supervisão destes de acordo com o seu requerimento, assim como os requisitos de redundância definidos para cada uma das áreas ou cenários topológicos. Esta característica é muito importante, podendo ser crítica quando se dispõem de recursos financeiros limitados para o investimento em UTRs e equipamentos de medição. Na hora de definir as áreas e cenários de interesse, é fundamental uma escolha criteriosa dos cenários e áreas considerados relevantes para a supervisão. Pode-se por exemplo, não considerar o atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas ou mesmo de observabilidade, em cenários topológicos de ocorrência improvável, pouco frequentes ou menos importantes; Além disso pode-se definir áreas de maior ou menor importância para o atendimento do requisito de ausência de medidas ou conjuntos críticos, ganhando-se com isso uma redução no investimento necessário para a supervisão de cenários e áreas realmente relevantes.
- A utilização da metodologia proposta indica os pontos onde devem ser coletadas informações que permitam a supervisão da rede com um nível de confiabilidade pré-definido. Porém, utilizam-se estes resultados para investir na aquisição de unidades terminais remotas e medidores.

## **7.2 Principais Contribuições**

Dentre as contribuições do trabalho, podem-se destacar:

- Construção de uma ferramenta computacional que permite fácil interação com o usuário para: definição do problema e de parâmetros utilizados; análise de alternativas, avaliação de resultados, etc.
- A metodologia proposta permite representar o conhecimento e a experiência de especialistas na rede de transmissão em análise, de forma a explorar diferentes relações de custo - benefício para a solução.
- É possível definir áreas de interesse prioritárias, possibilitando a redução de custos de alocação de medidores.
- A ferramenta desenvolvida é executada de forma autônoma, independente de um estimador de estado.

### **7.3 Propostas para Trabalhos Futuros**

Na continuação deste trabalho, visualizam-se os seguintes tópicos:

- Realizar análises comparativas e incorporar no aplicativo PLANMED outros modelos de otimização como, por exemplo, Grasp, Busca Tabu e Recozimento Simulado;
- Implementação de novos operadores genéticos;
- Refinar as ferramentas de visualização e interação com o usuário.
- Tratar o problema de planejamento de sistemas de medição em redes de grande porte.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- [Aam83]** S. Aam, L. Holten, O. Gjerd, *Design of the measurement system of for state estimation in the Norwegian high-voltage transmission network*, IEEE Trans. PAS, vol. PAS-102, no. 12, pp. 3769-3777, Dez./1983.
- [Abur99]** A. Abur, F. H. Magnago, *Optimal meter placement for maintaining observability during single branch outages*, IEEE Trans. PS, vol. 14, no. 4, Nov./1999.
- [Alsa98]** O. Alsaç, N. Vempati, B. Stott, A. Monticelli, *Generalized state estimation*, IEEE Trans. PS, vol 13, pp. 1069-1075, Ago./1998.
- [Anto00]** A. B. Antonio, *Alocação de medidores para estimação de estados em sistemas de potência através de metaheurísticas*, Dissertação de Mestrado, CAA/UFF, Set./2000.
- [Anto01]** A. B. Antonio, J. R. A. Torreão, M. B. Do Coutto Filho, *Meter placement for power system state estimation using simulated annealing*, IEEE Porto Power Tech Conference Proceedings, Porto, Portugal, paper 146, Set./2001.
- [Aria75]** F. Ariatti, L. Marzio, P. Ricci, *Designing state estimation in view of reliability*, PSCC Proceedings, paper 2.3/8, Cambridge, UK, Set./1975.
- [Bara95]** M. E. Baran, J. Zhu, H. Zhu, K. E. Garren, *A meter placement method for state estimation*, IEEE Trans. PS, vol. 10, no. 3 pp. 1704-1710, Ago./1995.
- [Barn87]** S. T. Barnard, *Stereo Matching by Hierarchical Annealing, Microcanonical Annealing*, Proceeding of the 10<sup>th</sup> International Joint conference on Artificial Intelligence, Italy, Milan, pp. 832-835, 1987.

**[Bose87]** A. Bose, K. A. Clements, *Real-time modeling of power network*, proc. IEEE, vol. 75, no. 12, pp 1607-1622, Dez./1987.

**[Çeli92]** M . K. Çelik, A. Abur, *A robust WLAV state estimator using transformations*, IEEE Trans. Power System, vol. 7, pp. 106-113, Fev./1992.

**[Çeli95]** M . K. Çelik, W. H. Edwin Liu, *An incremental measurement placement algorithm for state estimation*, IEEE Trans. Power System, vol. 10, no. 3, pp. 1698-1703, Ago./1995.

**[Clem81]** K. A. Clements, G. R. Krumpholz, P. Davis, *Power system state estimation residual analysis: an algorithm using network topology*, IEEE Trans. PAS, vol. PAS-100 Abr./1981.

**[Clem82]** K. A. Clements, . R. Krumpholz, P. W. Davis, *State estimation measurement system reliability evaluation – an efficient algorithm based on topological observability theory*, IEEE Trans. PAS, vol. PAS-102, pp. 2012-2020, Jul/1983.

**[Clem83]** K. A. Clements, G. R. Krumpholz, P. W. Davis, *Power system state estimation with measurement deficiency: an observability measurement placement algorithm*, IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-102, pp. 2012-2020, Jul/1983.

**[Clem90]** K. A. Clements, *Observability methods and optimal meter placement*, Electrical Power & Systems, vol. 12, no. 12, no. 2, pp. 88-93, Abr./1990.

**[Cose00]** J. Coser, J. G. Rolim, A. J. A. Simões Costa, *Projeto de planejamento de medição para a estimação de estados via algoritmos genéticos*, Congresso Brasileiro de Automática, Florianópolis, SC, Nov./2000.

**[Cout90]** M. B. Do Coutto Filho, A. M. Leite da Silva, D. M. Falcão, *Bibliography on power system state estimation (1968 – 1989)*, IEEE Trans. Power Systems, Vol. 11, No. 1, pp. 332-337, Fev./ 1996.

**[Cout99]** M. B. Do Coutto Filho, J. C. S. Souza, R. S. G. Matos, M. Th. Schilling, *Strategies for preserving data redundancy in power system state estimation*, 13<sup>th</sup> Power Systems Computation Conference Proc., Trodheim, Norway, Jul./1999.

**[Cout00]** M. B. Do Coutto Filho, J.C.S. Souza, R.S.G. Matos, M.Th. Schilling, Utilização de uma base de dados preditiva na estimação de estado, VII SEPOPE, artigo SP079, Curitiba, PR, Mai./2000.

**[Cout01a]** M.B. do Coutto Filho, J. C. S. Souza, F. M. F. Oliveira, M. Th. Schilling, *Identifying critical measurements & sets for power system state estimation*, IEEE Porto Power Tech, Set/2001.

**[Cout01b]** M.B. do Coutto Filho, J. C. S. Souza, F. M. F. Oliveira, M. Th. Schilling, *Perda iminente de observabilidade na estimação de estado em centros de operação de sistema*, SNPTEE, Grupo IX, Out./2001.

**[Cout01]** M. B. Do Coutto Filho, J. C. S. Souza, F. M. F. Oliveira, M. Th. Schilling, *Identifying critical measurements & sets for power system state estimation*, IEEE Porto PowerTech, Set./2001.

**[Crai90]** E. D. Crainic, H. P. Horisberger, X. D. Do, D. Mukhedkar, *Power system network observability: the assessment of the measurement system strength*, IEEE Trans. on Power System, vol. 5, no. 4, pp. 1267-1285, Nov./1975.

**[Edel75]** H. Edelmann, *A Universal assessment for the superior quality of distribution of measuring points for the state estimation of high-voltage networks*, PSCC Proceedings, paper 2.3/7, Cambridge, UK, Set./1975.

**[Fetz75]** E. E Fetzter, P. M. Anderson, *Observability in state estimation of power systems*, IEEE Trans. on PAS, vol. PAS-94, pp. 1981-1988, Nov.-Dec./1975.

**[Glov89]** F. Glover, *Tabu search - Part I*, ORSA Journal on Computing, vol. 1, no. 3, pp. 190-206, Summer, 1989.

**[Glov90]** F. Glover, *Tabu search - Part II*, ORSA Journal on Computing, vol. 2, no. 1, pp. 4-32, Winter, 1990.

**[Gold89]** D. E. Goldberg, *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*, Addison-Wesley, 1989.

**[Hand75]** E. Handschin, C. Bongers, *Theoretical and practical considerations in the design of state estimators for electric power systems*, International Symp. Computerized Operation of Power System (COPOS) Proceedings, São Carlos, Brasil, pp. 104-136, Ago./1975.

**[Hol75]** J. H. Holland, *Adaptation in natural and artificial systems*, Ann Arbor:University of Michigan Press, 1975.

**[Kogl75]** H. J. Koglin, *Optimal measuring system for state estimation*, PSCC Proceedings, paper 2.3/12, Cambridge, UK, Set./1975.

**[Kogl75]** H. J. Koglin. *Optimal measuring system for state estimation*, PSCC Proceedings, paper 2.3/12, Cambridge, UK, Set./1975.

**[Korr84]** G. N. Korres, G. C. Contaxis, *A tool for the evaluation a selection of State estimation measurement skins*. IEEE Transactions in Power System, vol 9 No 2 pag 1110 - 1116, Mai./1984.

**[Laar87]** P. J. M. V. Laarhoven, E. H. L. Aarts, *Simulated annealing: theory and application*, D. Reidel Publishing Company, 1987.

**[Magn00]** F. H. Magnago, A. Abur, *A unified approach to robust meter placement against loss of measurements and branch outages*, IEEE Trans. Power Systems, vol. 15, no. 3, Ago./2000.

**[Mat00]** R. S. Guedes de Matos, *Processamento de erros grosseiros na estimação de estado em sistemas de potência em condições críticas de redundância*, Dissertação de Mestrado, CAA/UFF, Jan./2000.

**[Mich96]** Z. Michalewicz, *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996.

**[Mili91]** L. Mili, V. Phaniraj, P. Rousseeuw, *Least median of square estimation in power systems*, vol. 6, pp. 511-523, Mai./1991.

**[Mira96]** V. Miranda, D. Srinivasan, L. M. Proença, *Evolutionary computation in power systems*, PSCC Proceedings, Dresden, Germany, Ago./1996.

**[Mira00]** V. Miranda, M. Matos, J.P. Lopes, J. T. Saraiva, J.N. Fidalgo, M.T. Ponce de Leão, *Intelligent Tools in a Real-World DMS Environment*, IEEE 2000 Summer Meeting Proceedings, Seattle, USA, 2000.

**[Mont85a]** A. Monticelli, F. F. Wu, *Network Observability: theory*, IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-102, no. 12, pp. 3769-3777, Dez./1983.

**[Mont85b]** A. Monticelli, F. F. Wu, *Network Observability: Identification of Observable islands and measurement Placement*, IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-102, no. 12, pp. 3769-3777, Dez./1983.

**[Mont99]** A. Monticelli, *Power System state estimation: a generalized approach*, Kluwer Academic Press, 1999.

**[Mori99]** H. Mori, O. Matsuzaki, *A tabu search based approach to meter placement in static state estimation*, ISAO99, Rio de Janeiro, RJ, pp. 365-369, Abr./1999.

**[Park88]** Y. M. Park, Y. H. Moon, J. B. Choo, *Design of reliable measurement system for state estimation*, IEEE Trans. PS, vol. III, no. 3, pp. 830-836, Ago./1988.

**[Phua77]** K. Phua, T. S. Dillon, *Optimal choice of measurements for state estimation*, Power Industry Computer Applications Conference (PICA), Toronto, Canada, pp. 431-441, Mai./1977.

**[Ricc99a]** O. F. Ricciari, *Planejamento de sistemas de medição utilizando algoritmos genéticos*, Dissertação de Mestrado, Ago./1999.

**[Ricc99b]** O. F. Ricciari, D. M. Falcão, *A meter placement for state estimation using genetic algorithms*, Intelligent System Application to Power Systems (ISAP), Rio de Janeiro, RJ, pp. 360-364, Abr./1999.

**[Sarm94]** N. D. R. Sarma, V. Veera Raju, K. S. Prakasa Rao, *Design of telemetering configuration for energy management systems*, IEEE Trans. PS, vol. 9, pp. 381-387, Fev./1994.

**[Schw70]** F.C.Schwepe, J. Wilder, *Power system static state estimation*, IEEE Trans. PAS, vol. PAS-89, pp.120-135, Jan./1970.

**[Schw70]** F.C.Schwepe, J. Wilder, *Power system static state estimation*, IEEE Trans. PAS, vol. PAS-89, pp.120-135, Jan./1970.

**[Simo90]** A. Simões-Costa, T. S. Piazza, A. Mandel, *Qualitative methods to solve qualitative problems in power system state estimation*, IEEE Trans. Ps, vol. 5, pp. 941-949, Ago./1990.

**[Srin96]** D. Srinivasan, F. Wen, C. S. Chang, A. C. Liew, *A survey of applications of evolutionary computing to power system state estimation*, IEEE Trans. PS, vol. 5, pp. 941-949, Ago./1990.

**[Souz03]** J. C. S. Souza, M. B. Do Coutto Filho, E. M. Meza, M. Th. Schilling, *Optimal meter placement for reliable state estimation*, Proc. 12th Intelligent Systems Application to Power Systems Conf. (ISAP'03). On PS, vol., pp 1700-1708, Ago./ 2003.

**[Souz05]** J. C. S. Souza, M. B. Do Coutto Filho, E., M. Th. Schilling, Ch. Capdeville, *Optimal metering systems for monitoring power networks under multiple topological scenarios*, IEEE Trans. PS, vol.20, pp 1700-1708, Nov./2005.

**[Souz96]** J. C. S. Souza, A. M. Leite da Silva, A. P. Alves da Silva *Data visualization and identification of Anomalies in power system state estimation using artificial neural networks*, IEEE Trans. PS, vol. 11, p 1592-1599, Ago./1996.

**[Wu90]** F. F. Wu, *Power system state estimation: a survey*, Electrical Power & Energy System, vol. 12, pp. 80-87, Jan./1990.