HELDER ROBERTO DE OLIVEIRA ROCHA

CONSTRUÇÃO DE PLANOS DE MEDIÇÃO PARA A ESTIMAÇÃO DE ESTADO EM SISTEMAS DE POTÊNCIA VIA METAHEURÍSTICAS

Tese de Doutorado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal Fluminense. Área de concentração: Computação Científica e Sistemas de Potência.

Orientadores:
Prof. Julio Cesar Stacchini de Souza, D.Sc.
Prof. Milton Brown do Coutto Filho, D.Sc.

Niterói
2010

Livros Grátis

http://www.livrosgratis.com.br

Milhares de livros grátis para download.

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

R672 Rocha, Helder Roberto de Oliveira.
Construção de planos de medição para a estimação de estado em sistemas de potência via metaheurísticas / Helder Roberto de Oliveira Rocha. – Niterói, RJ : [s.n.], 2010.
141 f.

Tese (Doutorado em Computação) - Universidade Federal Fluminense, 2010.

Orientadores: Julio César Stacchini de Souza, Milton Brown do Coutto Filho

1. Sistemas de potência. 2. Estimação de estado (Energia elétrica).
3. Otimização (Computação). 4. Metaheurística. I. Título.

CDD621.3191

CONSTRUÇÃO DE PLANOS DE MEDIÇÃO PARA A ESTIMAÇÃO DE ESTADO EM SISTEMAS DE POTÊNCIA VIA METAHEURÍSTICAS

Tese de Doutorado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para obtenção do Grau de Doutor. Área de concentração: Computação Científica e Sistemas de Potência.

Aprovada em 17 de Novembro de 2010.

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. Luiz Satoru Ochi, D. Sc.
UFF – Universidade Federal Fluminense

Prof. Carmen Lucia Tancredo Borges, D. Sc.
UFRJ– Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. João Bosco Augusto London Junior, D. Sc.
USP/SC – Universidade de São Paulo

À minha família em especial aos meus pais, pela orientação, apoio, incentivo e compreensão.

AGRADECIMENTOS

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

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

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 (EE) tornou-se de fundamental importância para a operação em tempo real dos sistemas de potência atuais, por ser capaz de fornecer dados completos e confiáveis para outras funções avançadas integrantes de um Sistema de Gerenciamento de Energia. 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 erros grosseiros, 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.

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 em virtude da indisponibilidade de medidas tornando inadequado o processamento de erros grosseiros. Para obter um processo de EE eficiente é necessário planejar a configuração de sistemas de medição levando em consideração diversos requisitos e correspondentes níveis de redundância.

Esta Tese trata do problema de planejar a configuração de sistemas de medição adequados para a EE usando uma modelagem flexível que considera aspectos como: observabilidade, ausência de medidas críticas, ausência de conjuntos críticos, alterações na configuração da rede e perda de unidades terminais remotas (UTRs). Para tal é proposta uma heurística construtiva que leva em consideração as especificidades do problema de forma a gerar soluções que serão usadas por metaheurísticas (Algoritmo Genético, GRASP e Colônia de Formigas) para a solução do problema. Investiga-se também a decomposição do problema para solução em ambiente paralelo.

Palavras-chave: estimação de estado, otimização, metaheurísticas

ABSTRACT

State Estimation is crucial for real-time power system operation, being able to provide a complete and reliable database for advanced functions of Energy Management Systems. Data redundancy is one of main requirements for the success of State Estimation. The term redundancy refers to a surplus of measurements acquired in the system with respect to the minimum necessary to estimate all the state variables. With an adequate redundancy, State Estimation can detect, identify and suppress bad data. Besides, the quality and reliability of the estimated quantities are not affected in case of a temporary loss of measurements. Redundancy level is evaluated considering the number, type and topological distribution of the meters in the supervised network.

Processing highly redundant data is always desirable for State Estimation. However, in some cases this is not possible, as it would demand high costs related to the investments on metering and communication equipments. Besides, during system operation, the State Estimation function may experience low data redundancy conditions due to the loss of previously available measurements, affecting bad data processing capabilities. For an efficient State Estimation process, it is necessary to plan the power metering system considering several requisites and adequate redundancy levels.

This Thesis presents a flexible approach for planning low cost metering systems for State Estimation, taking into account aspects such as: observability, absence of critical measurements, absence of critical sets of measurements, changes in network configuration and loss of remote terminal units (RTUs). To accomplish this, a constructive heuristic that takes into account characteristics of the problem has been developed to generate solutions that will be further used by metaheuristics (genetic algorithm, GRASP and Ant Colony). A problem decomposition, suitable for a parallel implementation, has also been investigated.

Keywords: state estimation, optimization, metaheuristics

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 1
1.1 Considerações Gerais 1
1.2 Desenvolvimento Histórico 4
1.3 Objetivo 9
1.4 Estrutura da Tese 10
2. ESTIMAÇÃO DE ESTADO 11
2.1 Introdução 11
2.2 Etapas 12
2.2.1 Configuração da rede 12
2.2.2 Observabilidade 12
2.2.3 Filtragem 13
2.2.4 Análise de resíduos 13
2.3 Estimação de Estado Não Linear 14
2.4 Estimação de Estado Linear 16
2.5 Análise de Observabilidade da Rede 17
2.6 Filtragem do Estado 20
2.7 Detecção de Erros Grosseiros 20
2.8 Análise de Resíduos 21
2.9 Identificação de Medidas e Conjuntos Críticos 22
2.10 Conclusões 24
3. METAHEURÍSTICAS: ASPECTOS BÁSICOS 25
3.1 Introdução 25
3.2 Algoritmos Genéticos 26
3.3 GRASP 28
3.4 Colônia de Formigas 31
3.5 Conclusões 36
4. ALOCAÇÃO DE PONTOS DE MEDIÇÃO: FORMULAÇÃO 37
4.1 Introdução 37
4.2 Níveis de Redundância 37
4.3 Requisitos de Redundância 39
4.4 Formulação Proposta 41
4.4.1 Requisito de observabilidade 42

4.4.2 Requisitos de confiabilidade 43
4.4.3 Requisitos de robustez 44
4.5 Flexibilização do Planejamento 47
4.6 Função Aptidão 48
4.7 Conclusões 51
5. METODOLOGIA PROPOSTA 52
5.1 Introdução 52
5.2 Heurística Construtiva 52
5.2.1 Características inerentes ao problema de alocação de medidores 53
5.2.2 Heurística construtiva gulosa 56
5.2.3 Heurística construtiva probabilística 62
5.2.4 Consideração de diferentes condições topológicas 67
5.2.5 Consideração de perda de UTRs 69
5.2.6 Flexibilização da supervisão em áreas não prioritárias 69
5.3 Solução via Metaheurísticas e Heurística Construtiva 73
5.3.1 Algoritmo genético 73
5.3.2 GRASP 76
5.3.3 ACO 78
5.4 Decomposição do Problema 83
5.5 Conclusões 85
6. TESTES E RESULTADOS 86
6.1 Introdução 86
6.2 Dados dos Sistemas Utilizados 88
6.3 Testes para os Requisitos de Observabilidade e Confiabilidade 95
6.3.1 Sistema IEEE-14 barras 95
6.3.2 Sistema IEEE-30 barras 98
6.3.3 Sistema brasileiro de 61 barras 99
6.4 Testes para os Requisitos de Robustez 101
6.4.1 Sistema IEEE-14 barras 101
6.4.2 Sistema IEEE-30 barras 107
6.4.3 Sistema brasileiro 61 barras 110
6.4.4 Sistema IEEE-118 barras 113
6.5 Testes Considerando a Flexibilização 116
6.5.1 Sistema IEEE-14 barras 116

6.5.2 Sistema IEEE-30 barras....118
6.5.3 Sistema brasileiro 61 barras....119
6.5.4 Sistema IEEE-118 barras....120
6.6 ACO com Decomposição da Rede....122
6.6.1 Sistema IEEE-118 barras....122
6.6.2 Sistema IEEE-300 barras....123
6.7 Comentários....125
7. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS....127
7.1 Conclusões....127
7.2 Principais Contribuições....129
7.3 Propostas para Trabalhos Futuros....131
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS....132
APÊNDICE A: IDENTIFICAÇÃO DE MEDIDAS E CONJUNTOS CRÍTICOS....141

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Etapas básicas do processo de EE 14
Figura 3.1 - Exemplo de operador de cruzamento em um ponto 27
Figura 3.2 - Procedimento construtivo do AG 28
Figura 3.3 - Procedimento construtivo do GRASP 29
Figura 3.4 - Procedimento de busca local 31
Figura 3.5 - Algoritmo ACO 33
Figura 3.6 - Procedimento atualização 33
Figura 5.1 - Áreas observadas por UTRs 53
Figura 5.2 - Rede não observável 54
Figura 5.3 - Rede observável sem medidas críticas 54
Figura 5.4 - Rede observável sem conjuntos críticos 54
Figura 5.5 - Sistema de medição para observabilidade e ausência de medidas críticas 55
Figura 5.6 - Sistema de medição para ausência de conjuntos críticos 55
Figura 5.7 - Alocação de UTRs usando a heurística construtiva gulosa para os requisitos observabilidade e ausência de medidas críticas no sistema IEEE-14 58
Figura 5.8 - Alocação de UTRs usando a heurística construtiva gulosa para o requisito de ausência de conjuntos críticos no sistema IEEE-14 60
Figura 5.9 - Heurística construtiva gulosa 61
Figura 5.10 - Alocação de UTRs usando a heurística construtiva probabilística para os requisitos observabilidade e ausência de medidas críticas no sistema IEEE-14 65
Figura 5.11 - Heurística construtiva probabilística 66
Figura 5.12 - Alocação de UTRs usando a heurística construtiva com ausência de conjuntos críticos apenas na área prioritária do sistema IEEE-14 71
Figura 5.13 - Heurística construtiva com áreas de interesse 72
Figura 5.14 - Codificação da solução para AG 76
Figura 5.15 - Algoritmo GRASP proposto 77
Figura 5.16 - Busca local (GRASP) 78

Figura 5.17 - Algoritmo ACO proposto 82
Figura 5.18 - Busca local (ACO) 83
Figura 5.19 - Sistema IEE-118 dividido em três subsistemas 85
Figura 6.1 - Sistema IEEE de 14 barras e 20 ramos 88
Figura 6.2 - Sistema IEEE de 30 barras e 41 ramos 90
Figura 6.3 - Sistema Real de 61 Barras e 74 ramos 91
Figura 6.4 - Sistema IEEE de 118 barras e 179 ramos 92
Figura 6.5 - Sistema IEEE de 300 barras e 411 ramos 94
Figura 6.6 - Requisito de observabilidade (IEEE-14) 95
Figura 6.7 - Requisito de ausência de medidas críticas (IEEE-14) 96
Figura 6.8 - Requisito de ausência de conjuntos críticos (IEEE-14) 97
Figura 6.9 - Requisito de ausência de medidas críticas em múltiplos cenários topológicos (IEEE-14) 102
Figura 6.10 - Requisito de ausência de conjuntos críticos em múltiplos cenários topológicos (IEEE-14) 103
Figura 6.11 - Requisito de ausência de UTRs críticas (IEEE-14) 104
Figura 6.12- Requisito de ausência de conjunto crítico de UTRs (IEEE-14) 105
Figura 6.13 - Requisito de ausência de conjuntos críticos em múltiplos cenários topológicos e ausência de UTRs críticas no cenário base (IEEE-14) 106
Figura 6.14 - Requisito de ausência de medidas críticas na Área 1(IEEE-14) 117
Figura 6.15 - Requisito de ausência de conjuntos críticos na Área 1(IEEE-14) 118
Figura A.1 - Fluxograma simplificado para identificação de medidas críticas e conjuntos críticos 141

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 - Exemplo do funcionamento da heurística construtiva gulosa para os requisitos observabilidade e ausência de medidas críticas no sistema IEEE-14 58
Tabela 5.2 - Exemplo do funcionamento da heurística construtiva gulosa para o requisito de ausência de conjuntos críticos no sistema IEEE-14 59
Tabela 5.3 - Exemplo do funcionamento da heurística construtiva probabilística para os requisitos observabilidade e ausência de medidas críticas no sistema IEEE-14 64
Tabela 5.4 - Exemplo do funcionamento da heurística construtiva com ausência de conjuntos críticos e diferentes cenários topológicos no sistema IEEE-14 67
Tabela 5.5 - Exemplo do funcionamento da heurística construtiva para ausência de conjuntos críticos na área prioritária no sistema IEEE-14 70
Tabela 6.1 - Alterações na configuração (IEEE-14) 89
Tabela 6.2 - Alterações na configuração (IEEE-30) 90
Tabela 6.3 - Alterações na configuração (SB-61) 92
Tabela 6.4 - Alterações na configuração (IEEE-118) 93
Tabela 6.5 - Resultados: requisito observabilidade (IEEE-14) 95
Tabela 6.6 - Resultados: requisito de ausência de medidas críticas (IEEE-14) 96
Tabela 6.7 - Resultados: requisito de ausência de conjuntos críticos (IEEE-14) 97
Tabela 6.8 - Resultados: requisito de observabilidade (IEEE-30) 98
Tabela 6.9 - Resultados: requisito de ausência de medidas críticas (IEEE-30) 98
Tabela 6.10- Resultados: requisito de ausência de conjuntos críticos (IEEE-30) 99
Tabela 6.11- Resultados: requisito de observabilidade (SB-61) 99
Tabela 6.12- Resultados: requisito de ausência de medidas críticas (SB-61) 100
Tabela 6.13- Resultados: requisito de ausência de conjuntos críticos (SB-61) 100
Tabela 6.14- Resultados: requisito de observabilidade em múltiplos cenários topológicos (IEEE-14) 101
Tabela 6.15- Resultados: requisito de ausência de medidas críticas em múltiplos cenários topológicos (IEEE-14) 102

Tabela 6.16- Resultados: requisito de ausência de conjuntos críticos em múltiplos cenários topológicos (IEEE-14) 103
Tabela 6.17- Resultados: requisito de ausência de UTRs criticas (IEEE-14) 104
Tabela 6.18- Resultado: requisito de ausência de conjunto crítico de UTRs (IEEE-14) 105
Tabela 6.19- Resultados: requisito de ausência de conjuntos críticos em múltiplos cenários topológicos e ausência de UTRs críticas no cenário base (IEEE-14) 106
Tabela 6.20- Resultados: requisito de observabilidade em múltiplos cenários topológicos (IEEE-30) 107
Tabela 6.21- Resultados: requisito de ausência de medidas críticas em múltiplos cenários topológicos (IEEE-30) 108
Tabela 6.22- Resultados: requisito de ausência de conjuntos críticos em múltiplos cenários topológicos (IEEE-30) 108
Tabela 6.23- Resultados: requisito de ausência de UTRs criticas (IEEE-30) 109
Tabela 6.24- Resultados: requisito de ausência de conjunto crítico de UTRs (IEEE-30) 109
Tabela 6.25- Resultados: requisito de ausência de medidas críticas em múltiplos cenários topológicos e ausência de UTRs críticas no cenário base (IEEE-30) 110
Tabela 6.26- Resultados: requisito de observabilidade em múltiplos cenários topológicos (SB-61) 110
Tabela 6.27- Resultados: requisito de ausência de medidas críticas em múltiplos cenários topológicos (SB-61) 111
Tabela 6.28- Resultados: requisito de ausência de conjuntos críticos em múltiplos cenários topológicos (SB-61) 111
Tabela 6.29- Resultados: requisito de ausência de UTRs criticas (SB-61) 112
Tabela 6.30- Resultados: requisito de ausência de conjunto crítico de UTRs (SB-61) 112
Tabela 6.31- Resultados: requisito de ausência de conjuntos críticos em múltiplos cenários topológicos e ausência de UTRs críticas no cenário base (SB-61) 113
Tabela 6.32- Resultados: requisito de observabilidade em múltiplos cenários topológicos (IEEE-118) 113

Tabela 6.33- Resultados: requisito de ausência de medidas em múltiplos cenários topológicos (IEEE-118) 114
Tabela 6.34- Resultados: requisito de ausência de conjuntos críticos em múltiplos cenários topológicos (IEEE-118) 114
Tabela 6.35- Resultados: requisito de ausência de UTRs críticas (IEEE-118) 114
Tabela 6.36- Resultados: requisito de ausência de conjunto crítico de UTRs (IEEE-118) 115
Tabela 6.37- Resultados: requisito de ausência de conjuntos críticos em múltiplos cenários topológicos e ausência de UTRs críticas no cenário base (IEEE-118) 115
Tabela 6.38- Resultados: requisito de ausência de medidas críticas apenas na Área 1 (IEEE-14) 116
Tabela 6.39- Resultados: requisito de ausência de conjuntos críticos apenas na Área 1 (IEEE-14) 117
Tabela 6.40- Resultados: requisito de ausência de medidas críticas apenas na Área 2 (IEEE-30) 118
Tabela 6.41- Resultados: requisito de ausência de conjuntos críticos apenas na Área 2 (IEEE-30) 119
Tabela 6.42- Resultados: requisito de ausência de medidas críticas apenas na Área 2 (SB-61) 119
Tabela 6.43- Resultados: requisito de ausência de conjuntos críticos apenas na Área 2 (SB-61) 120
Tabela 6.44- Resultados: requisito de ausência de medidas críticas apenas na Área 1 (IEEE-118) 121
Tabela 6.45- Resultados: requisito de ausência de conjuntos críticos apenas Área 1 (IEEE-118) 121
Tabela 6.46- Resultados: requisito de observabilidade (IEEE-118) 122
Tabela 6.47- Resultados: requisito de ausência de medidas críticas (IEEE-118) 123
Tabela 6.48- Resultados: requisito de ausência de conjuntos críticos (IEEE-118) 123
Tabela 6.49- Resultados: requisito de observabilidade (IEEE-300) 124
Tabela 6.50- Resultados: requisito de ausência de medidas críticas (IEEE-300) 124
Tabela 6.51- Resultados: requisito de ausência de conjuntos críticos (IEEE-300) 124

LISTA DOS PRINCIPAIS SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ACO	Ant Colony Optimization
AG	Algoritmo Genético
Cmed	Custo dos medidores a instalar
COS	Centro(s) de Operação de Sistemas
Cutr	Custo das remotas a instalar
E	Matriz de covariância dos resíduos
EE	Estimação de Estado
EGs	Erros Grosseiros
E{.}	Operador valor esperado
G	Matriz ganho
GRASP	Greedy Randomized Adaptative Search Procedure
h	Vetor das funções não lineares que relaciona x e z
H	Matriz jacobiana
LC	Lista de Candidatos
LRC	Lista Restrita de Candidatos
mCrit	Número de medidas críticas pertencentes a um plano de medição
MQP	Mínimos Quadrados Ponderados
n	Número de variáveis de estado
nb	Número de barras
Nt	Número cenários topológicos de interesse
Nu	Número de UTRs do sistema de medição
Medcri	Número de medidas críticas presentes em um plano de medição
Medconj	Número total de medidas pertencentes a conjuntos críticos

Pconj	Penalidade associada à presença de conjuntos críticos
Pmed	Penalidade associada à presença de medidas críticas.
Pobs	Penalidade imposta a planos de medição não observáveis
r	Vetor dos resíduos
r_N	Resíduo normalizado
R	Matriz de covariância
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SGEs	Sistema de Gerenciamento de Energia
U	Matriz identidade
UMF	Unidade de Medição Fasorial
UTR	Unidade Terminal Remota
x	Vetor de estado
$\hat{x}$	Vetor de estado filtrado
z	Vetor das medidas
$\hat{z}$	Vetor de medidas filtradas
α	Define Tamanho da LRC
α_{ACO}	Sensibilidade à trilha de feromônio
β	Sensibilidade à informação heurística
$\Delta\tau$	Feromônio depositado pela formiga
ε	Vetor de erros ou incertezas nas medidas
η	Informação heurística
ρ	Evaporação da trilha de feromônio
τ	Feromônio

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

A forma de atuação das empresas de energia elétrica modernas tem sido influenciada pelo aumento do grau de exigência dos consumidores quanto à qualidade do serviço, bem como por procedimentos regulatórios estabelecidos pelo governo, os quais norteiam a avaliação desta qualidade. Assim, as empresas de energia elétrica têm lidado com blocos de energia cada vez maiores, oferecidos em espaços de tempo mais curtos e requisitando o dispêndio de menos recursos (capital, pessoal, instalações e equipamentos).

No que concerne aos Centros de Operação de Sistemas (COS), diversas ferramentas para Sistemas de Gerenciamento de Energia (SGEs) vêm sendo desenvolvidas para fazer frente à necessidade de captura em tempo real de dados provenientes de diversas fontes, com a devida correção de possíveis erros. Neste sentido, a função Estimação de Estado (EE) cumpre importante papel.

A 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 uso de outras funções avançadas (e.g., aquelas que se ocupam das tarefas de segurança e otimização), integrantes de um SGE [Wu90]. Desde sua origem [Schw70], a EE em sistemas de potência vem sendo estudada intensivamente sob diversos ângulos [Cout90], visando basicamente atuar como um filtro para: suavizar erros estatisticamente pequenos (corriqueiros, inerentes à medição) e 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].

Para obter um processo de EE eficiente é necessário planejar a configuração de sistemas de medição, levando em consideração diversos requisitos e correspondentes níveis de redundância. O problema do planejamento é bastante complexo, não apenas pela sua dimensão (natureza combinatória do elevado número de possíveis configurações do sistema de medição), como também pela necessidade de se estabelecer um compromisso bem ajustado entre o desempenho da EE 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.

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 individual de medidas, bem como de blocos de medidas (perda de UTRs) e também de elementos da rede. Isto faz com que níveis críticos de redundância sejam alcançados, caracterizando situações de perda iminente de observabilidade e conseqüente desempenho inadequado da EE. Quanto à alocação otimizada de recursos financeiros, por vezes priorizam-se investimentos em áreas de interesse da rede. Assim, pode-se projetar sistemas de medição em que, por exemplo, o requisito observabilidade seja atendido em toda a rede e os requisitos de ausência de medidas e conjuntos críticos sejam atendidos em áreas específicas, em função da prioridade da sua supervisão. Com

isto, o custo total de investimento deverá ser menor do que nos casos que os requisitos mais severos sejam atendidos considerando toda a rede. Este é apenas um exemplo de como se pode controlar de forma planejada a relação custo versus benefício de um investimento em planos de medição.

Vários modelos foram propostos na literatura especializada para a obtenção de planos de medição otimizadas, [Bara95], [Souz05], [Vigl08], etc. Estes trabalhos utilizam metaheurísticas em que as soluções iniciais são aleatórias, as quais são aperfeiçoadas iterativamente de forma a se obter soluções melhores. Em muitas aplicações as metaheurísticas empregam como ponto de partida soluções obtidas a partir de heurísticas construtivas, as quais são baseadas nas especificidades do problema tratado e, em geral, auxiliam na obtenção de soluções de alta qualidade. No que diz respeito ao problema de alocação de pontos de medição para EE, a utilização de heurísticas construtivas adequadas podem melhorar a eficiência e eficácia do processo de otimização.

Esta Tese trata do problema de planejar sistemas de medição adequados para a EE usando uma nova modelagem que engloba além de observabilidade, ausência de medidas críticas e ausência de conjuntos críticos, diferentes requisitos para supervisão de áreas específicas, alterações na configuração da rede e perda de UTRs. Além disso pretende-se investigar a aplicação de heurísticas construtivas para a geração de soluções a serem utilizadas por metaheurísticas como Algoritmo Genético (AG), *Greedy Randomized Adaptative Search Procedure* (GRASP) e Colônia de Formigas (Ant Colony Optimization-ACO). Para tal, será desenvolvida uma heurística construtiva que leva em consideração as especificidades do problema de planejamento de sistemas de medição para EE.

Finalmente, será apresentada uma decomposição do problema, com o objetivo de investigar possíveis benefícios de sua solução em ambiente computacional de processamento paralelo.

A seguir, apresenta-se um resumo do desenvolvimento histórico da pesquisa em 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 amplamente conhecidos, estando sempre entre os mais 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 computacional responsável por tal tarefa denomina-se Estimador de Estado.

Usualmente 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 na rede elétrica considerando tipo e quantidade é o problema que se busca resolver nesta Tese. Para tal, os seguintes requisitos devem ser levados em consideração:

- 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. Isto se deve não apenas ao porte do problema, mas também ao caráter antagônico existente entre o custo de investimentos e demais requisitos. Assim, muitas vezes a formulação do problema de alocação ótima de medidores é realizada de forma não rigorosa ou incompleta.

A literatura técnica aponta uma série de métodos que abordam o problema de alocação 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 alocação 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 alocação ótima de medidores são [Fetz75] e [Phua77]. Fetzer 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] e [Clem83] foi proposto um método de reforço de um sistema de medição baseado na observabilidade topológica da rede supervisionada. Com o mesmo objetivo, em [Mont85a] e [Mont85b] 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 UTRs que considera a observabilidade da rede, a existência de medidas críticas e a perda de pontos de medição.

Em [Bara95], encontra-se 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 do uso do método de programação linear Simplex 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.

Diversos trabalhos de pesquisa sobre aplicações de Algoritmos Genéticos (AGs) em problemas de sistemas de potência têm surgido, como se vê em [Srin96] e [Mira96]. Em [Ricc99a,b], é proposto um método de solução para o problema de alocação 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.

Em [Souz03], o uso de AGs garante um alto grau de confiabilidade no planejamento de um sistema de medição específico para determinado cenário topológico, garantindo a ausência de medidas críticas e conjuntos críticos a mínimo custo. Em 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.

Em [Cos06], [Vigl08] e [Vigl09], usam-se Algoritmos Evolutivos para a obtenção de sistemas de medição confiáveis, isto é, aqueles isentos de medidas críticas, conjuntos críticos e UTRs críticas. Em [Vigl09] o atendimento a diferentes cenários topológicos também é considerado.

Outra metaheurística para a solução do problema de localização de medidores se encontra em [Mori99]. O problema é formulado como o de otimização combinatória, com solução proposta pelo enfoque da Busca Tabu [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, onde a metaheurística utilizada é Recozimento Simulado (*Simulated Annealing*). Em [Anto00] também foi utilizada a técnica da otimização microcanônica [Barn87].

Recentemente, além das medidas de fluxo e injeção de potência presentes nos sistemas de medição tradicionais, medidas de sincrofasores (tensões e correntes) fornecidas por unidades de medição fasorial (UMFs) vêm sendo utilizadas com parcimônia pela função EE. Em [Chen06] e [Emam08], os autores descrevem uma estratégia de alocação ótima (via programação inteira) de sincrofasores para melhorar a capacidade de processamento de EGs, mantendo a observabilidade da rede supervisionada sujeita a contingências. Da mesma forma, em [Chen08], o

projeto de um sistema de medição ótimo que privilegie o processamento de erros de configuração da rede foi tratado. Além disto, encontra-se em [Emam10] uma proposta para construção de um sistema de medição robusto que se beneficie de sincrofasores otimamente dispostos em ramos da rede, levando em conta contingências simples e múltiplas.

Atualmente, assim como em futuro próximo, restrições financeiras não permitem a instalação de sincrofasores em toda e qualquer barra de uma rede de potência supervisionada através da função EE. Desta forma, sem perda de generalidade da metodologia proposta na presente Tese, não serão abordados sistemas de medição que contenham UMFs.

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

- Trata-se de um problema de otimização NP-Completo [Brue95], se considerados todos os requisitos anteriormente descritos, necessários a um planejamento adequado de pontos de medição;
- Metaheurísticas com soluções iniciais aleatórias foram até então aplicadas (Recozimento Simulado, Busca Tabu, Algoritmo Genético), verificando-se grande potencial para resolver o problema aqui tratado.

1.3 Objetivo

O objetivo desta Tese é desenvolver uma metodologia abrangente para o problema de planejamento de sistemas de medição para EE, conjugando aspectos tais como: observabilidade, ausência de medidas criticas, ausência de conjuntos críticos, supervisão de áreas específicas, alterações na configuração da rede e perda de UTRs. Além disso, pretende-se investigar a aplicação de uma heurística construtiva que leve em consideração as especificidades do problema de planejamento de forma a gerar soluções que serão posteriormente usadas por metaheurísticas. A possibilidade de flexibilização do planejamento, priorizando a supervisão em áreas de maior interesse e reduzindo custos, será abordada.

Pretende-se também investigar a decomposição do problema de forma a avaliar potenciais benefícios de sua solução em ambiente de computação paralela.

1.4 Estrutura da Tese

Sete capítulos, resumidamente descritos a seguir, integram o presente documento:

Capítulo 1: Introdução e Revisão Bibliográfica.

Capítulo 2: Revisão de aspectos básicos do problema de Estimação de Estado, visando caracterizar alguns elementos necessários à construção de planos de medição adequados.

Capítulo 3: Aborda os principais conceitos sobre as metaheurísticas usadas.

Capítulo 4: Apresenta a formulação proposta para o problema, de acordo com os vários aspectos de interesse prático.

Capítulo 5: É proposta uma heurística construtiva e uma metodologia baseada em metaheurísticas para a alocação de medidores para a EE, considerando os aspectos apresentados no Capítulo 4.

Capítulo 6: A metodologia proposta é testada para diferentes sistemas, os resultados obtidos são apresentados e discutidos.

Capítulo 7: Apresenta as conclusões do trabalho e propostas para a continuidade da pesquisa.

CAPÍTULO 2

ESTIMAÇÃO DE ESTADO

2.1 Introdução

A EE em sistemas de potência foi introduzida por Schweppe [Schw70], sendo hoje uma ferramenta encontrada em Sistemas de Gerenciamento de Energia (SGEs).

A EE tem como objetivo processar informações da rede elétrica, obtidas através de um Sistema de Aquisição de Dados, de forma que se obtenha uma base de dados confiável e completa, e que permita o conhecimento das condições de operação correntes do sistema elétrico.

A implementação da função EE fornece ao operador condições de:

- Monitorar o comportamento do sistema de forma que não sejam tomadas decisões baseadas em medidas espúrias;

- Obter todas as grandezas de interesse para a operação, inclusive aquelas que não sejam telemedidas;

- Obter informações completas e confiáveis sobre o sistema para uso em monitoração e controle.

Conforme anteriormente mencionado, a EE atua como um filtro para suavizar erros estatisticamente pequenos, suprimir erros grosseiros (EGs) eventuais, determinando configuração atual da rede elétrica e sua observabilidade. Para cumprir tais objetivos, o processo de EE requer fundamentalmente medidas

redundantes (usualmente, fluxos, injeções de potência e magnitudes de tensão) e indicações corretas de *status* de chaves/disjuntores da rede. A seguir, descreve-se as etapas necessárias à consecução dos referidos objetivos.

2.2 Etapas

Basicamente, são quatro as etapas da EE em sistema de potência: Configuração da Rede, Observabilidade, Filtragem e Análise de Resíduos. Pode-se também realizar previamente à etapa de Filtragem, a verificação de limites de aceitabilidade dos valores das grandezas medidas, considerando os estados dos equipamentos de chaveamento, de maneira a eliminar medidas com erros demasiadamente elevados e corrigir eventuais inconsistências na configuração da rede.

2.2.1 Configuração da rede

Etapa necessária à transformação do modelo físico seção de barra-dispositivo de chaveamento no modelo barra-ramo, através do processamento de medidas digitais de *status* (estado aberto/fechado de chaves/disjuntores).

2.2.2 Observabilidade

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

2.2.3 Filtragem

Etapa em que a estimativa das variáveis de estado é efetivamente obtida, a partir do conhecimento de um conjunto de grandezas medidas e da configuração da rede.

2.2.4 Análise de resíduos

Aqui são realizados testes estatísticos para se detectar e identificar possíveis erros na topologia da rede e erros grosseiros nas grandezas medidas que não foram eliminados na etapa de pré-filtragem.

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.

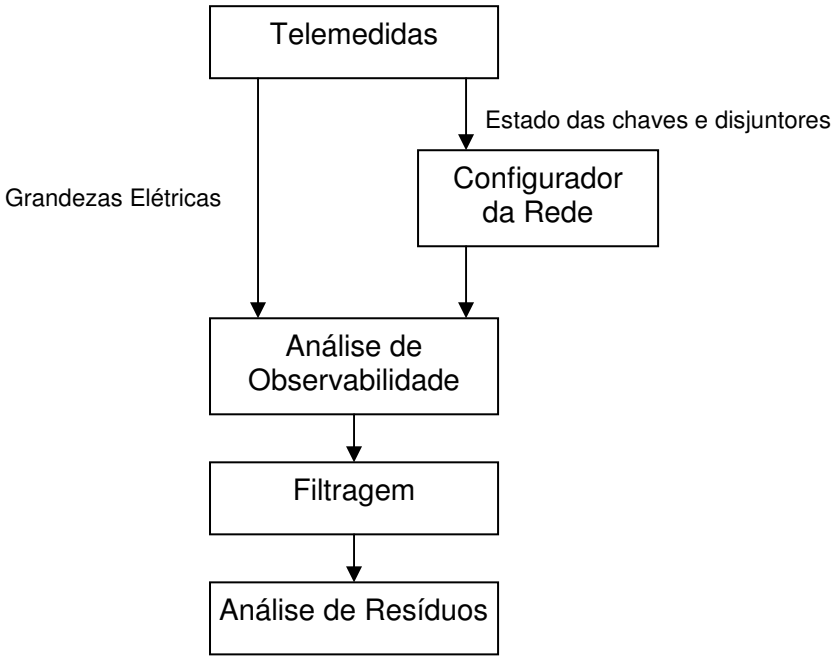

Figura 2.1 - Etapas básicas do processo de EE.

2.3 Estimação de Estado Não Linear

Usualmente, 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:

$$z = h(x) + \varepsilon \tag{2.1}$$

Onde:

- z : vetor de medidas, (m x 1); m=número de medidas;
- h(.) : vetor de funções não-lineares, (m x 1), que relacionam o estado verdadeiro com medidas não corrompidas;
- x : vetor de estado, (n x 1), representando módulos e ângulos das tensões nodais;
- n =2nb – 1; nb é número de barras da rede; (uma barra do sistema é considerada como referência angular e, portanto, seu ângulo não faz parte do processo de estimação);
- ε :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 [ε . ε^T] = diag. (σ_i^2), sendo E [.] o operador esperado e σ_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:

$$J(x) = \sum_{i=1}^{m} \varepsilon_i^2 \cdot \alpha_i = \sum_{i=1}^{m} \left[z_i - h_i(x) \right]^2 \alpha_i \tag{2.2}$$

Sendo:

J(x) : função objetivo;

z_i : i-ésima medida;

α_i : peso atribuído à i-ésima medida;

m : número de medidas.

Em notação matricial:

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

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

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

Para minimizá-la, a seguinte condição deve ser atendida:

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

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

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

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:

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

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 Jacobiana.

A convergência do processo estabelecido por (2.7) é avaliada verificando se a norma do vetor desvio $\left|\Delta x^{(i)}\right| = \left|x^{(i+1)} - x^{(i)}\right|$ 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 telemedidas a serem processadas se relacionam através de:

$$z = Hx + \varepsilon \tag{2.8}$$

Sendo:

z: vetor de medidas, (m x 1);

x: vetor de estado verdadeiro, (n x 1);

ε: vetor de erros associados às medidas z;

H: matriz Jacobiana, (m x 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:

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

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

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

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

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

Sendo:

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

A utilização de Estimadores Lineares é mais simples, apresenta 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 telemedidas recebidas para processamento. A análise da observabilidade consiste em:

- Verificar a existência de telemedidas 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 complementar mínimo de pseudomedidas que permita estabelecer o processo de EE de toda a rede.

Quando a rede não for observável como um todo, mas apenas em parte, formam-se ilhas observáveis. Uma ilha observável é aquela na qual os fluxos de potência em todos os seus ramos podem ser calculados, a partir das medidas disponíveis. A utilização de pseudomedidas [Cout99], [Mira00] pode melhorar a observabilidade e se necessário restaurá-la. Estas pseudomedidas podem ser providas através de dados típicos/históricos, previsão de carga, etc.

A observabilidade de uma rede depende unicamente do conjunto de medidas disponíveis para a EE, de sua localização e da configuração da rede. Durante a supervisão em tempo real, este conjunto de medidas pode 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.

Em geral, 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.

Nesta Tese, a análise de observabilidade será tratada do ponto de vista numérico, por ser mais simples e utilizar rotinas de cálculo já construídas para o processo de EE. Além disso, usa-se o estimador linear por apresentar um baixo custo computacional e ser suficiente para problemas estruturais como mencionado anteriormente.

A verificação de deficiência de medidas para a observabilidade é realizada levando-se em conta o desacoplamento entre os conjuntos de grandezas P – θ (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 - θ.

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:

- As equações de fluxos de potência ativa são dadas por:

$$P_{k_i m_i} = \frac{\left(\theta_{k_i} - \theta_{m_i}\right)}{x_i} \tag{2.14}$$

Onde: i é o número do ramo e k_i e m_i são suas barras terminais e x_i a reatância série;

- As equações para a injeção de potência ativa são:

$$P_j = \sum_{i \in I_j} \frac{\left(\theta_{k_i} - \theta_{m_i}\right)}{x_i} \tag{2.15}$$

Onde: I_j representa o conjunto dos ramos que se ligam à barra j;

- R = U (matriz identidade);

A matriz H é obtida a partir das equações de fluxos e injeções ativas apresentadas, onde as linhas representam as medidas e as colunas correspondem aos ângulos das barras. A referência angular não pertence à matriz por se tratar de uma variável conhecida.

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

2.6 Filtragem do Estado

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

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

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

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:

$$\hat{z} = H\hat{x} \tag{2.16}$$

2.7 Detecção de Erros Grosseiros

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 os limites de escala;
- Comparação entre valores de fluxo nos dois extremos de um circuito;

Os procedimentos anteriores 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].

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:

$$r = z - \hat{z} \tag{2.17}$$

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

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:

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

Na presença de apenas um EG, a medida errônea é aquela que apresenta provavelmente 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:

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

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

onde $\sigma_E(i)$ representa o desvio padrão da i-ésima componente do vetor dos resíduos e γ, 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], o teste dos resíduos normalizados é considerado 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 em bloco pode provocar a perda de observabilidade do sistema ou o 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 Identificação de Medidas e Conjuntos Críticos

Além da verificação da observabilidade, diferentes níveis de criticalidade das medidas processadas podem ser estabelecidos. Por exemplo, 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 tornar o sistema não observável. O mesmo conceito de criticalidade individual de medidas pode ser estendido para grupos de medidas. Um conjunto crítico é definido como sendo um conjunto formado por medidas não críticas, no qual a eliminação de qualquer medida a ele pertencente torna as demais deste conjunto críticas [Cout01].

Medidas críticas

Uma medida não tem redundância e portanto apresenta resíduos e respectivos desvios nulos. Numericamente, identifica-se uma medida i como crítica por:

$$r(i) = z(i) - \hat{z}(i) = 0 \tag{2.22}$$

$$\sigma_E(i) = \sqrt{E(i,i)} = 0 \tag{2.23}$$

$$E = U - H(H^t H)^{-1} H^t \tag{2.24}$$

Na verdade, não apenas o elemento E(i,i) é nulo, mas toda a linha e coluna i da referida matriz, já que, por ser critica, a medida i não se correlaciona a nenhuma outra medida do sistema.

Conjuntos críticos

Medidas pertencentes a conjuntos críticos apresentam resíduos normalizados (r_N) idênticos, em valor absoluto, e coeficientes de correlação (γ) unitários. Suponha que as medidas i e j pertençam a um conjunto crítico. Assim, as seguintes relações se verificam [Ayre86]:

$$\rho_{ij} = \frac{r_N(i)}{r_N(j)} = 1 \tag{2.25}$$

$$\gamma_{ij} = \frac{E(i,j)^2}{E(i,i)E(j,j)} = 1 \tag{2.26}$$

Em [Cout07] é apresentado um algoritmo para a identificação de medidas críticas e conjuntos críticos, o qual foi empregado no desenvolvimento desta Tese. Tal algoritmo é apresentado no Apêndice A.

Outras condições de criticalidade podem ser caracterizadas, como será visto no Capitulo 4 (e.g., UTRs críticas e conjuntos críticos de UTRs).

2.10 Conclusões

Neste capítulo foram descritas as principais etapas envolvidas no processo de EE. A redundância dos dados a serem processados é um requisito fundamental para o sucesso de qualquer projeto e implementação da função de EE em um 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 à perda de observabilidade. Sistemas de medição devem ser projetados de modo à fazer frente a situações como estas.

CAPÍTULO 3

METAHEURÍSTICAS: ASPECTOS BÁSICOS

3.1 Introdução

Durante as últimas décadas, muito se tem estudado sobre heurísticas direcionadas à solução de problemas de Otimização Combinatória NP-Completo. Essas heurísticas são limitadas e quando gulosas tendem a fornecer sempre a mesma solução se iniciadas de um mesmo ponto de partida.

As metaheurísticas ou heurísticas genéricas são mais flexíveis, situadas em domínios ainda pouco explorados pela literatura, buscando-se aproximar de uma otimização global de um problema, podendo conter diferentes procedimentos de busca local na solução obtida a cada passo. Em outras palavras, as metaheurísticas, quando aplicadas a problemas de otimização, tem como um de seus objetivos gerar procedimentos de busca em vizinhanças que evitem uma parada prematura em ótimos locais, ainda distantes de um ótimo global. Nas últimas décadas, surgiram vários procedimentos enquadrados como metaheurísticas, na solução de diversos problemas fortemente combinatórios. Algumas das mais amplamente divulgadas são: Recozimento Simulado, Busca Tabu, Algoritmos Genéticos, *Iterated Local Search* (ILS), *Variable Neighborhood Search* (VNS), GRASP, Colônia de Formigas, etc.

Neste trabalho, diversas metaheurísticas (incluindo-se Busca Tabu e recozimento Simulado) foram testadas, com destaque para: Algoritmos Genéticos, GRASP e Colônia de Formigas, que se mostraram mais promissores para a solução do problema tratado.

3.2 Algoritmos Genéticos

A metaheurística conhecida por Algoritmos Genéticos (AGs) se inspira nos mecanismos de evolução dos seres vivos, tendo sido proposta por John Holland [Holl75]. Baseia-se na teoria da evolução por seleção natural desenvolvida por Charles Darwin.

Basicamente, o AG parte de uma população de cromossomos, para gerar novos cromossomos com propriedades genéticas superiores às de seus antecedentes. Esta idéia foi então associada a soluções de um problema em que, a partir de um conjunto de soluções atuais, são geradas novas soluções superiores às antecedentes, sob algum critério pré-estabelecido.

Os AGs originalmente trabalhavam com uma representação binária (zero-um) para associar uma solução/ou componentes de uma solução do problema abordado. Embora esta representação tenha se mostrado eficiente para vários problemas, observou-se, à medida que foram crescendo as aplicações de AGs, que em diversos problemas com um elevado número de restrições, esta representação pode não ser a mais adequada. Assim, surgiram alternativas como, por exemplo, a representação por inteiros, onde um cromossomo é descrito por um vetor de números inteiros. Independentemente do tipo de representação selecionada, deve-se sempre verificar se a representação está corretamente associada às características do problema analisado e ao seu domínio.

Gerar uma população inicial de cromossomos em um AG não é normalmente uma tarefa das mais difíceis. Em muitos problemas, a população é gerada de forma aleatória. Após a geração da população inicial é feita a avaliação dos cromossomos, ou seja, determina-se o seu nível de aptidão para sobrevivência.

Em seguida, são aplicados os operadores genéticos cujo objetivo é produzir novos cromossomos que possuam propriedades genéticas superiores às encontradas nos pais.

As operações genéticas mais usadas são: seleção, cruzamento e mutação.

Seleção:

A seleção é a operação genética na qual os cromossomos dos indivíduos tidos como mais aptos são escolhidos para formar a base genética da geração subseqüente a deles. Os indivíduos podem ser selecionados de acordo com sua função de aptidão: quanto maior a função de aptidão, maior a chance de o indivíduo ser selecionado.

Cruzamento:

No cruzamento são determinados cortes (um ou mais) entre dois genes adjacentes de cada cromossomo pai. Para um corte, são gerados dois novos cromossomos reunindo os genes à esquerda do corte do pai 1 com os genes à direita do corte do pai 2 e os genes à direita do pai 2 com os genes à esquerda do corte do pai 1, como é visto na Figura 3.1.

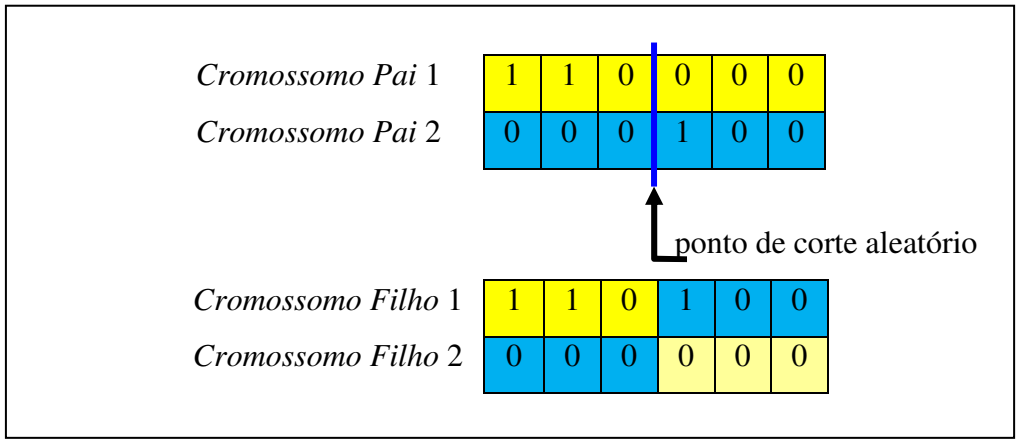

Figura 3.1 - Exemplo de operador de cruzamento em um ponto

Mutação:

A mutação corresponde a alterações aleatórias que ocorrem nos genes de um cromossomo. No AG, a mutação é definida como mudanças de valores em algumas posições do cromossomo.

O algoritmo que descreve um AG convencional é apresentado a seguir:

Procedimento AG ( )
Inicia t, P(t);
Enquanto critério de parada não for satisfeito faça:
    Calcular aptidões de $s^* \in P(t)$ *;*
    $t \leftarrow t+1$*;*
    Selecionar P(t) a partir de P(t-1);
    Aplicar cruzamento em P(t);
    Aplicar mutação em P(t);
Fim Enquanto;
Fim do Procedimento AG;

Figura 3.2 – Procedimento construtivo do AG

Em um AG, existe um conjunto de parâmetros e critérios a serem definidos no momento da implementação. Por exemplo, deve-se definir:

- O tamanho de uma população;
- A seleção dos cromossomos reprodutores;
- O critério de sobrevivência dos cromossomos;
- O critério de parada de um AG.

A especificação mais adequada destes e de outros parâmetros depende de cada problema, mas normalmente em AGs convencionais costumam-se adotar valores típicos [Gold89].

3.3 GRASP

GRASP, proposto por Feo e Resende [Feo95], é um procedimento iterativo em que cada iteração compõe-se de duas fases: construção e busca local. A fase de construção é responsável por criar uma solução inicial viável e a fase de busca local percorre a vizinhança desta solução inicial tentando melhorá-la.

A fase de construção consiste em criar uma solução inicial, iterativamente, elemento a elemento. Cada elemento candidato a fazer parte da solução é avaliado e ordenado de acordo com sua contribuição na função objetivo, a partir daí é criada uma lista LRC (lista restrita de candidatos) com os melhores elementos. Após a criação desta lista, o algoritmo escolhe um elemento aleatoriamente e o adiciona na solução parcial. Para a escolha do próximo, cada elemento restante é reavaliado e forma-se uma nova lista LRC. Devido a este procedimento, pode-se dizer que o algoritmo de construção é iterativo, guloso, aleatório e adaptativo.

Para definir a inclusão de um elemento na lista LRC em um problema de maximização, considere t um elemento candidato a entrar na lista, C o conjunto de todos os elementos candidatos, g(t) a função gulosa utilizada , t_{min} e t_{max} o menor e o maior valor encontrado pela função até o momento e $\alpha \in [0,..,1]$ o fator de aleatoriedade. Desta forma, a inclusão de um elemento na lista LRC pode ser determinada por $t \in \mid g(t) \geq (t_{min} + (1- \alpha).(t_{max} - t_{min}))$. A Figura 3.3 apresenta o pseudocódigo do procedimento construtivo padrão.

Procedimento Construtivo (semente)
Semente- geração de números aleatórios.
Solução ← 0;
Definir: LC;
Enquanto LC ≠ 0 faça

$$g(t_{min}) = \min\{g(t) | t \in C\};$$
$$g(t_{max}) = \max\{g(t) | t \in C\};$$
$$LCR = \{t \in C | g(t) \leq g(t_{min}) + \alpha(g(t_{max}) - g(t_{min}))\}$$

i← rand(semente);
Selecione elemento i de LRC;
Solução ← Solução ∪ elemento i;
Atualize o conjunto de candidatos LC;
Fim enquanto
Retorne Solução;
Fim Procedimento Construtivo

Figura 3.3 - Procedimento construtivo do GRASP

O parâmetro α define o nível de aleatoriedade da escolha de um elemento na lista LRC. Se $\alpha = 0$ as escolhas serão totalmente gulosas ($|LRC| = 1$) e se $\alpha = 1$, as escolhas serão totalmente aleatórias ($|LRC| = C$).

Em [Feo95], discute-se o efeito do valor de α na qualidade da solução e na diversidade das soluções geradas durante a fase de construção. Valores de α que levam a uma LRC de tamanho muito limitado (ou seja, valor de α próximo da escolha gulosa) implicam em soluções de qualidade muito próxima àquela obtida de forma puramente gulosa, de baixo esforço computacional. Em contrapartida, provocam uma baixa diversidade de soluções construídas. Já uma escolha de α com valor próximo da seleção puramente aleatória leva a uma grande diversidade de soluções construídas mas, por outro lado, muitas destas são de qualidade inferior, tornando mais lento o processo de busca local. Conclui-se então que a escolha do parâmetro α é crítica e fundamental para o bom desempenho do algoritmo GRASP.

O GRASP pode ser visto como uma técnica de múltiplos reinícios (multistart), onde cada iteração produz uma solução a partir de uma distribuição desconhecida. Desta forma, a média e a variância das soluções obtidas ao longo das iterações dependem da geração da LRC. Por exemplo, se a LRC for restrita a um único elemento (puramente guloso), então a mesma solução será gerada em todas as iterações e a variância da distribuição será nula. Se a LRC possuir vários elementos, então a variância das soluções será maior e o valor médio das soluções será pior, porém a melhor solução encontrada tende a ser melhor do que a solução gerada pelo algoritmo puramente guloso.

Após a geração da solução inicial pela fase de construção, um algoritmo GRASP tradicional realiza uma fase de busca local com base nesta solução para tentar encontrar soluções vizinhas. A busca local examina cada solução vizinha através de uma medida de desempenho f() e verifica se alguma é melhor do que a solução inicial. Após verificar a vizinhança, é retornada a melhor solução encontrada. Um procedimento de busca local parte sempre de uma solução inicial $x_0 \in X$. Para um problema de minimização é gerada uma vizinhança $N(x_k)$ de x_k e a cada iteração procura-se encontrar uma solução $x_{k+1} \in N(x_k)$, tal que $f(x_{k+1}) < f(x_k)$.

Quando uma solução que melhora a solução corrente é encontrada, ela passa a ser a nova solução corrente e analisa-se sua vizinhança. Caso contrário, a busca termina e a solução corrente é um ótimo local. A eficiência de um procedimento de busca local depende de vários fatores, tais como a estrutura da vizinhança, a função que deve ser otimizada e a solução inicial.

A Figura 3.4 apresenta o pseudocódigo do procedimento de Busca Local.

```
Procedimento Busca Local (Solução)
Melhor Solução= Gerar vizinhança (Solução)
Enquanto (f(Melhor Solução) < f(Solução)) faça
        Solução ← Melhor Solução
 Fim enquanto
 Retorne (Solução)
Fim Procedimento Busca Local
```

Figura 3.4 – Procedimento de busca local

Esse procedimento ajuda a obtenção de um ótimo local ou global de uma função fornecida pelo procedimento construtivo.

3.4 Colônia de Formigas

A otimização por Colônia de Formigas é uma metaheurística proposta por Dorigo [Dori96], para resolução de problemas de otimização combinatória. Inspirada no comportamento das formigas à procura de comida, a ACO foi desenvolvida para solucionar o problema do caixeiro viajante, sendo posteriormente aperfeiçoada e utilizada em outros problemas.

A ACO baseia-se na forma em que formigas procurarem alimento. Ao sair em busca de comida, formigas depositam no solo uma substância chamada feromônio, por elas perceptível. A concentração de feromônio depende principalmente do tamanho do caminho. Comprovou-se que a chance de uma formiga escolher um

determinado caminho é fortemente influenciada pela concentração de feromônio nesse caminho.

Dorigo sugeriu a criação de uma formiga artificial, capaz de construir a solução de um problema escolhendo os componentes da solução com base em uma regra probabilística, que é função da concentração de feromônio artificial, e das informações heurísticas do problema. Portanto, a ACO é classificada como heurística de construção.

A trilha de feromônio reflete a experiência de busca adquirida pelas formigas e as informações heurísticas são informações do problema as quais as formigas não têm acesso. As informações heurísticas são usadas para guiar as formigas para soluções boas do problema. A melhor solução é obtida após certo número de iterações ou pelo "comportamento estagnado" das formigas (todas passam a percorrer o mesmo caminho, gerando a mesma solução).

As formigas artificiais possuem as seguintes características e funções:

1. Constroem soluções para o problema;
2. Depositam feromônio na trilha percorrida por elas para construir a solução;
3. Decidem o caminho a ser seguido, ou componente a ser adicionado, por meio de uma regra probabilística;
4. Possuem uma pequena memória;

Algumas alterações foram propostas para tornar a ACO mais eficiente. Para evitar a convergência prematura (devido à trilha de feromônio) criou-se a evaporação da trilha de feromônio. Desenvolveram-se também estratégias elitistas para se obter soluções de maior qualidade.

A heurística ACO é descrita na Figura 3.5.

```
Procedimento ACO ( )
Definir: Matriz de Informações, Semente
Inicialize: Formigas, Parâmetros
Para i = 1 até Máxima Iteração faça
        Chamar procedimento Construtivo (Semente)
        Chamar procedimento Atualize Estatísticas
        Chamar procedimento para Atualizar Feromônio (Solução)
Fim Para
Fim Procedimento ACO
```

Figura 3.5 - Algoritmo ACO

Procedimento Construtivo:

Cada formiga irá construir uma solução movendo-se de um nó i a um nó j escolhido probabilisticamente. Essa probabilidade vai depender do feromônio e da informação heurística inerente ao problema em questão.

Procedimento Atualização das Estatísticas:

O principal objetivo deste procedimento é salvar a melhor solução encontrada até a iteração corrente;

```
Procedimento Atualizar Feromônio ( )
Evaporação ( )
Para k=1 até m
        Depositar Feromônio (k)
Fim Para
Computar Matriz de Informações
Fim procedimento Atualizar Feromônio
```

Figura 3.6 - Procedimento atualização

A solução construída pela ACO é determinada pela probabilidade de seleção, definida como:

$$p_i(t) = \frac{[\tau_i(t)]^{\alpha_{ACO}} [\eta_i]^{\beta}}{\sum_{l \in N_i^k} [\tau_l(t)]^{\alpha_{ACO}} [\eta_l]^{\beta}} \quad (3.6)$$

Sendo:

$\tau_i(t)$: feromônio contido no ramo ou nó i;

η_i : informação heurística;

α_{ACO}: sensibilidade à trilha de feromônio;

β : sensibilidade às informações heurísticas;

N_i^k : ramos ou nós não visitados pela formiga;

Os parâmetros da ACO são: a sensibilidade das formigas à trilha de feromônio, a sensibilidade das formigas às informações heurísticas, a atualização da trilha de feromônio. O tamanho da colônia de formigas também tem influência nos resultados da ACO.

Sensibilidade à trilha de feromônio:

A trilha de feromônio na ACO representa a experiência de busca adquirida pelas formigas durante o processo. Portanto, a sensibilidade das formigas à trilha de feromônio regula o peso que a experiência de busca tem nas decisões das formigas. Quando as formigas têm uma sensibilidade elevada, as soluções construídas por cada uma delas são muito próximas e às vezes idênticas. A susceptibilidade ao comportamento estagnado aumenta consideravelmente com o aumento da sensibilidade à trilha de feromônio. Quando a sensibilidade é pequena, a construção das soluções é mais diversificada e as soluções criadas pelas formigas são bem diferentes.

Sensibilidade às informações heurísticas:

As formigas não têm a capacidade de distinguir quais caminhos são bons ou não para o problema. Isso ocorre porque a trilha de feromônio reflete a experiência

de busca, mas não contém nenhuma informação referente ao problema. Para contornar esse fato, da mesma forma que são sensíveis à trilha de feromônio, as formigas têm sensibilidade ao que se denomina de informações heurísticas. Estas são informações sobre o problema a ser solucionado. A função das informações heurísticas é forçar as formigas a construir soluções boas para o problema. Portanto, quando a sensibilidade das formigas a esse parâmetro é grande, a ACO comporta-se como uma heurística construtiva gulosa [Dori00]. Entretanto, se o seu valor for muito pequeno, a ACO tende rapidamente ao comportamento estagnado.

A atualização da trilha de feromônio:

A forma de atualização da trilha de feromônio afeta a escolha das formigas. Existem diversas formas de atualização da trilha, a mais usada é a forma clássica descrita a seguir:

$$\tau_i(t+1) = (1-\rho)\tau_i(t) + \Delta\tau_i(t) \tag{3.7}$$

Onde:

ρ: evaporação da trilha de feromônio;

$\Delta\tau_{ij}(t)$: feromônio depositado no ramo ou nó i;

O fator (1-ρ) é utilizado para evitar a estagnação precoce da ACO.

Tamanho da colônia:

O tamanho da colônia interfere na decisão das formigas. A presença de várias formigas permite a troca de informações, o que aumenta a experiência de busca e torna a ACO mais robusta. Entretanto, o esforço computacional aumenta. A programação paralela da ACO atenua esse inconveniente.

3.5 Conclusões

As metaheurísticas são técnicas genéricas direcionadas à otimização global de um problema. Entre as mais amplamente divulgadas e investigadas neste trabalho, as que se mostram mais promissoras para resolver o problema de alocação de medição são: Algoritmos Genéticos, GRASP e Colônia de Formigas. Os principais aspectos relacionados a estas metaheurísticas foram apresentados e a sua aplicação ao problema de alocação de medidores para EE será abordada nos capítulos subsequentes. Maiores informações sobre as metaheurísticas AGs, GRASP e ACO podem ser encontradas em [Holl75], [Feo95], [Dori96].

CAPÍTULO 4

ALOCAÇÃO DE PONTOS DE MEDIÇÃO: FORMULAÇÃO

4.1 Introdução

A redundância dos dados se constitui um requisito fundamental para o processo de EE. Quanto mais elevada e qualificada for a redundância em termos do tipo e localização dos medidores, 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 elétricas é um problema NP-Completo, como demonstrado em [Brue05]. Este é um problema de otimização, no qual objetiva-se determinar uma solução que minimize os custos de investimento em UTRs e medidores, para garantir um desempenho desejável para a função EE.

Adiante serão discutidos aspectos relacionados à redundância de planos de medição, de modo que se possa propor uma solução para o problema.

4.2 Níveis de Redundância

Durante a operação, níveis inferiores à redundância de projeto são usualmente atingidos, refletindo a perda de medidas causada por: desligamento de linhas de transmissão ou transformadores, falha dos canais de comunicação ou eliminação de erros grosseiros. Entretanto, devido à tendência atual de redução de investimentos, níveis de deterioração da redundância têm sido mais freqüentemente alcançados. Tais níveis, descritos a seguir, correspondem às violações dos requisitos de projeto da redundância, acarretando problemas de natureza cumulativa.

1º Nível de deterioração:

Este nível é caracterizado pela perda de qualidade do estado/medidas estimadas, no que se refere ao grau de incerteza das estimativas produzidas. Os requisitos de observabilidade e confiabilidade são preservados.

2º Nível de deterioração:

A presença de conjuntos críticos apenas (nenhuma medida crítica) indica ingresso no 2º nível de deterioração da redundância. Conforme discutido no Capítulo 2, um conjunto crítico é definido como aquele formado por um grupo de medidas não críticas em que a eliminação de qualquer uma destas torna críticas as remanescentes do conjunto. Neste nível, a confiabilidade da EE é parcialmente comprometida. Medidas pertencentes a conjuntos críticos apresentam resíduos normalizados idênticos e coeficientes de correlação unitária [Ayre86]. Isto significa que um erro grosseiro em uma destas medidas é detectável, mas não identificável pela análise de resíduos.

3º Nível de deterioração:

A redução até este nível compromete significativamente a confiabilidade da EE. Também, a perda de observabilidade torna-se iminente, indicada pela presença de medidas críticas. Uma medida é chamada de crítica se estando ausente do conjunto de medidas disponíveis, torna o sistema não observável. Os resíduos da estimação (e respectivos desvios) de medidas críticas são nulos [Clem81], [Simo90]. Assim, erros em medidas críticas não podem ser detectados e identificados pela análise de resíduos; mesmo que pudessem, a dificuldade de supressão de tais medidas persistiria, pois a observabilidade seria perdida.

Após o 3º nível de deterioração da redundância, o requisito observabilidade não é mais atendido. A restauração da redundância a um nível mínimo pode ser conseguida por meio de pseudomedidas.

4.3 Requisitos de Redundância

Ao se planejar um sistema de medição, deve-se ter em mente que, independente do modelo matemático adotado para o processo de EE, a qualidade dos resultados obtidos depende da configuração do sistema de medição, ou seja, da quantidade, tipo e localização dos medidores nas subestações da rede elétrica que se deseja supervisionar.

É desejável que o sistema de medição permita que a supervisão do sistema seja realizada de maneira precisa e confiável, atendendo com sucesso os requisitos relacionados às etapas discutidas nas seções anteriores. Estes requisitos são:

Requisito de Precisão:

O atendimento a esse requisito depende fundamentalmente da quantidade e qualidade dos equipamentos/medidores envolvidos no processo de aquisição de dados.

Requisito de Observabilidade:

É importante que a rede de interesse possa ser supervisionada em sua totalidade. A observabilidade de uma dada rede depende diretamente da

quantidade e tipo de medidores disponíveis, assim como de sua localização geográfica na rede.

Requisito de Confiabilidade:

Em alguns casos, uma ou mais medidas podem apresentar erros grosseiros, ou seja, erros que não sejam simplesmente aqueles inerentes ao sistema de medição. Tais erros, quando não detectados e/ou identificados, podem comprometer a qualidade da supervisão do sistema. Métodos para detecção e identificação de medidas portadoras de erros grosseiros foram discutidos no Capítulo 2, sendo a eficácia desses métodos dependente do conjunto de medidas disponíveis. Pode-se conceber um sistema de medição que permita o tratamento adequado de erros grosseiros, preservando assim a confiabilidade e qualidade da supervisão a ser realizada.

Requisito de Robustez:

Este requisito é importante para assegurar certo nível de redundância através do qual os requisitos anteriores ainda sejam atendidos, caso haja alterações topológicas e/ou indisponibilidade de medidas.

Requisito de Custo:

No planejamento do sistema de medição deve-se ter em mente que os recursos financeiros para a implantação de tal sistema não são ilimitados. Logo, dentre os requisitos de projeto deve-se também considerar o 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, UTRs, telessinalização e telemedição.

4.4 Formulação Proposta

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

$$Min\ \left(\sum_{u=1}^{NUTRs} (Cutr_u \times \mathrm{c}_u + \sum_{z=1}^{Nmed_u} Cmed_{uz} \times \mathrm{d}_{uz}) \right) \qquad (4.1)$$

$$\text{Sujeito a requisitos de desempenho}$$

Onde:

NUTRs - Número total de barras elegíveis para alocação de UTRs

$Nmed_u$ - Número total de medidas elegíveis para instalação na u-ésima UTR

$Cutr_u$ - custo de aquisição e instalação de uma UTR na barra *u*

$Cmed_{uz}$ - custo de aquisição e instalação do z-ésimo medidor na UTR da barra *u*

$c_u \in \{0,1\}$ - c_u= 1 se uma UTR é instalada na barra *u* e c_u=0 em caso contrário

$d_{uz} \in \{0,1\}$ - d_{uz}= 1 se a medida z é instalada na UTR da barra *u* e d_{uz}=0 em caso contrário

Os requisitos de desempenho referem-se à quantidade, tipo e localização de medidores na rede, de modo a garantir um desempenho desejado para o processo de EE. Os requisitos básicos aqui estabelecidos são: observabilidade; ausência de medidas críticas; ausência de conjuntos críticos de medidas.

Quando o requisito de desempenho visa garantir apenas a observabilidade da rede [Clem90], busca-se uma distribuição de pontos de medição de modo a permitir apenas supervisionar a rede como um todo. Por outro lado, quando também se requer a ausência de medidas e conjuntos críticos [Ayre86], garante-se que o sistema possa ainda ser observado, mesmo no caso da perda de medidas. Além disso, EGs podem ser detectados/identificados, conferindo também uma maior confiabilidade ao processo de supervisão, no que diz respeito à utilização dos dados

validados. Porém, em tais situações sistemas de medição mais redundantes são requeridos, implicando em maiores investimentos. Considerando então os requisitos citados, o problema (4.1) pode ser formulado como:

$$
\begin{aligned}
& Min\ \left(\sum_{u=1}^{NUTRs} (Cutr_u \times \mathrm{c}_u + \sum_{z=1}^{Nmed_u} Cmed_{uz} \times \mathrm{d}_{uz}) \right) \\
& \text{Sujeito a :} \\
& \quad \text{requisito de observabilidade} \\
& \quad \text{requisito de ausência de medidas críticas} \\
& \quad \text{requisito de ausência de conjuntos críticos}
\end{aligned}
\tag{4.2}
$$

Na metodologia proposta neste trabalho é possível tratar o problema (4.2) de forma tal que o atendimento aos requisitos seja feita apenas parcialmente. Tal flexibilização 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).

4.4.1 Requisito de observabilidade

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. O problema passa a ser formulado como:

$$
\begin{aligned}
& Min\ \left(\sum_{u=1}^{NUTRs} (Cutr_u \times \mathrm{c}_u + \sum_{z=1}^{Nmed_u} Cmed_{uz} \times \mathrm{d}_{uz}) \right) \\
& S.A \\
& \sum_{u=1}^{NUTRs} \sum_{z=1}^{Nmed_u} \mathrm{d}_{uz} \geq NBarras - 1 \qquad (1) \\
& \det(\mathrm{G}) \neq 0 \qquad (2) \\
& \mathrm{c}_{\mathrm{u}}, \mathrm{d}_{\mathrm{uz}} \in \{0,1\}
\end{aligned}
\tag{4.3}
$$

Onde *NBarras* representa o número total de barras cujo estado se deseja supervisionar e *G* é a matriz de Ganho do processo de EE linear. A restrição (1) assegura o número mínimo de medidas para observar a rede, enquanto que a restrição (2) representa a observabilidade da rede, que é determinada observando o determinante não nulo da matriz de Ganho do processo de EE.

4.4.2 Requisitos de confiabilidade

A avaliação do requisito de confiabilidade se dá pela ausência de medidas críticas e conjuntos críticos. Nesta Tese, para a avaliação de criticalidades será considerada a metodologia apresentada em [Cout07]. Para cada um destes requisitos, a função objetivo pode ser construída conforme descrito a seguir.

<u>Ausência de Medidas Críticas</u>

A incorporação deste requisito é feita da seguinte forma:

$$
\begin{aligned}
& Min\ \left(\sum_{u=1}^{NUTRs} (Cutr_u \times \mathrm{c}_u + \sum_{z=1}^{Nmed_u} Cmed_{uz} \times \mathrm{d}_{uz}) \right) \\
& S.A \\
& \sum_{u=1}^{NUTRs} \sum_{z=1}^{Nmed_u} \mathrm{d}_{uz} \geq NBarras - 1 \qquad (1) \\
& \det(\mathrm{G}) \neq 0 \qquad (2) \\
& E(i,i) \neq 0; \quad \mathrm{i} = 1, \mathrm{Nmed} \qquad (3) \\
& \mathrm{c}_{\mathrm{u}}, \mathrm{d}_{\mathrm{uz}} \in \{0,1\}
\end{aligned}
\tag{4.4}
$$

Onde a restrição (3) assegura a ausência de medidas críticas, determinada pela ausência de valor nulo na diagonal da matriz de covariância dos resíduos. *Nmed* representa o número total de medidas no plano de medição considerado.

<u>Ausência de Conjuntos Críticos</u>

A incorporação deste requisito apresenta-se em (4.5).

$$
\begin{aligned}
& Min\ \left(\sum_{u=1}^{NUTRs} (Cutr_u \times \mathrm{c}_u + \sum_{z=1}^{Nmed_u} Cmed_{uz} \times \mathrm{d}_{uz}) \right) \\
& S.A \\
& \sum_{u=1}^{NUTRs} \sum_{z=1}^{Nmed_u} \mathrm{d}_{uz} \geq NBarras - 1 \qquad (1) \\
& \det(\mathrm{G}) \neq 0 \qquad (2) \\
& E(i,i) \neq 0; \quad \mathrm{i} = 1, \mathrm{Nmed} \qquad (3) \\
& \rho_{ij} \neq 1 \vee \gamma_{ij} \neq 1; \mathrm{i} = 1, \mathrm{Nmed}; \mathrm{j} = 1, \mathrm{Nmed}; \mathrm{i} \neq \mathrm{j} \qquad (4) \\
& \mathrm{c}_\mathrm{u}, \mathrm{d}_\mathrm{uz} \in \{0,1\}
\end{aligned}
\tag{4.5}
$$

Onde a restrição (4) assegura a ausência de conjuntos críticos, sendo para isso verificada a igualdade de resíduos normalizados e coeficientes de correlação unitários entre duas medidas. As expressões para se determinar ρ_{ij} e γ_{ij} foram apresentadas na Seção 2.9.

Na metodologia proposta, o atendimento aos requisitos de observabilidade, ausência de medidas críticas e ausência de conjuntos críticos podem ser considerados isoladamente, mas o atendimento à restrição de observabilidade é sempre requerida.

4.4.3 Requisitos de robustez

Durante a operação de um sistema de potência, situações decorrentes da indisponibilidade de grupos de medidas (e.g. perda de UTRs), bem como alterações na configuração da rede, muitas vezes trazem reduções de redundância em que criticalidades se fazem presentes. A robustez de um sistema de medição pode então se caracterizar pela sua capacidade em atender requisitos tais como os anteriormente descritos (precisão, observabilidade e confiabilidade), mesmo se ocorrem indisponibilidades de UTRs e reconfiguração na rede. A incorporação de requisitos de robustez na formulação proposta passa a ser descrita.

Diferentes condições topológicas

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 de interesse. O atendimento aos requisitos de redundância para diferentes condições topológicas da rede leva o problema a ser formulado como descrito a seguir:

$$
\begin{aligned}
& Min\ \left(\sum_{u=1}^{NUTRs} (Cutr_u \times \mathrm{c}_u + \sum_{z=1}^{Nmed_u} Cmed_{uz} \times \mathrm{d}_{uz}) \right) \\
& S.A \\
& \sum_{u=1}^{NUTRs} \sum_{z=1}^{Nmed_u} \mathrm{d}_{uz} \geq NBarras - 1 && (1) \\
& \det(\mathrm{G_t}) \neq 0; \quad \mathrm{t} = 1, \mathrm{N_t} && (2) \\
& E_t(i,i) \neq 0; \quad \mathrm{i} = 1, \mathrm{Nmed};\ \mathrm{t} = 1, \mathrm{N_t} && (3) \\
& \rho^t{}_{ij} \neq 1 \vee \gamma^t{}_{ij} \neq 1; \mathrm{i} = 1, \mathrm{Nmed}; \mathrm{j} = 1, \mathrm{Nmed};\ \mathrm{t} = 1, \mathrm{N_t}\ \mathrm{i} \neq \mathrm{j} && (4) \\
& \mathrm{c_u}, \mathrm{d_{uz}} \in \{0,1\}
\end{aligned}
\qquad (4.6)
$$

Onde N_t é o número de cenários topológicos de interesse; G_t representa a matriz de Ganho para a t-ésima topologia; $E_t(i,i)$ é o i-ésimo elemento da diagonal da matriz de covariância dos resíduos da t-ésima topologia; ρ^t_{ij} e γ^t_{ij} são calculados para a t-ésima topologia.

Perda de UTRs

Nos sistemas de potência, perdas de UTRs ocorrem durante sua operação, podendo resultar em criticalidades. Para que tais níveis não sejam alcançados é necessário considerar no processo de planejamento do sistema de medição a possibilidade da perda de UTRs.

Quando perde-se uma UTR (torna-se indisponível) e a rede supervisionada resulta inobservável, tal UTR é dita crítica [Cose06], [Vigl08]. Um sistema de medição sem UTRs críticas é aquele em que mesmo com a remoção de qualquer UTR não resulta na perda de observabilidade. Pode-se dizer que, nestes casos, provavelmente não existem medidas ou conjuntos críticos no plano de medição.

Com o intuito de melhor qualificar a redundância do sistema de medição, é também introduzido neste trabalho o conceito de conjunto crítico de UTRs (CconjUTR). Um CconjUTR é aqui definido como sendo aquele no qual a perda de qualquer UTR a ele pertencente leva ao surgimento de uma ou mais medidas críticas. Pela sua definição, o conjunto crítico de UTRs, caso exista, será único e, assim como acontece para as UTRs críticas, a sua ausência implicará também na ausência de conjuntos críticos de medidas. Considerando esta restrição, o problema de planejamento de sistemas de medição pode ser formulado como:

$$
\begin{aligned}
& Min\ \left(\sum_{u=1}^{NUTRs} (Cutr_u \times \mathrm{c}_u + \sum_{z=1}^{Nmed_u} Cmed_{uz} \times \mathrm{d}_{uz}) \right) \\
& S.A \\
& \sum_{u=1}^{NUTRs} \sum_{z=1}^{Nmed_u} \mathrm{d}_{uz} \geq NBarras - 1 \qquad (1) \\
& \det(\mathrm{G_s}) \neq 0 \quad \mathrm{s} = 1, \mathrm{N_u} \qquad (2) \\
& E_s(i,i) \neq 0; \quad \mathrm{i} = 1, \mathrm{Nmed};\ \mathrm{s} = 1, \mathrm{N_u} \qquad (3) \\
& \rho^s{}_{ij} \neq 1 \vee \gamma^s{}_{ij} \neq 1; \mathrm{i} = 1, \mathrm{Nmed}; \mathrm{j} = 1, \mathrm{Nmed};\ \mathrm{s} = 1, \mathrm{N_u}\ \mathrm{i} \neq \mathrm{j} \qquad (4) \\
& \mathrm{c_u}, \mathrm{d_{uz}} \in \{0,1\}
\end{aligned}
\qquad (4.7)
$$

Onde N_U é o número de UTRs do sistema de medição; G_s representa a matriz de Ganho da EE sem a s-ésima UTR; $E_s(i,i)$ é o i-ésimo elemento da diagonal da matriz de covariância dos resíduos da EE sem a s-ésima UTR. A restrição (2) garante o requisito de ausência de UTRs críticas, enquanto que a restrição (3) garante a ausência de conjuntos críticos de UTRs.

Como já foi mencionado anteriormente, é possível tratar o atendimento aos requisitos de observabilidade, ausência de medidas críticas e ausência de conjuntos críticos separadamente, isto é, atendidos apenas para alguns cenários topológicos. Em (4.6) ao se fazer N_t=1 apenas na restrição (4), o atendimento ao requisito de ausência de conjuntos críticos é exigido apenas para um único cenário topológico de interesse.

É importante notar que, por questão de simplicidade, apresentou-se separadamente as formulações para o problema considerando diferentes condições topológicas (em (4.6)) e perda de UTRs (em (4.7)). Porém, nada impede que tais

situações sejam consideradas em conjunto, em uma única formulação, de forma a contemplar os cenários de interesse decorrentes de variações na topologia e perda de UTRs.

4.5 Flexibilização do Planejamento

Quando há escassez de recursos financeiros, é preferível muitas vezes priorizar investimentos em áreas de interesse da rede. Assim, pode-se projetar sistemas de medição em que, por exemplo o requisito observabilidade seja atendido em toda a rede e os requisitos de ausência de medidas e conjuntos críticos sejam atendidos apenas em áreas específicas, em função da prioridade da sua supervisão. Com isto, o custo total de investimento deverá ser menor do que aquele em que os requisitos mais severos sejam atendidos para toda a rede. Esta é mais uma possibilidade de flexibilizar o custo-benefício de um investimento em planos de medição, explorando diferentes relações de compromisso, em função do conhecimento e experiência que se tem sobre a rede elétrica.

A incorporação de áreas de interesse para observabilidade, ausência de medidas críticas e ausência de conjuntos críticos, é feita de acordo com:

$$
\begin{aligned}
& Min\ \left(\sum_{u=1}^{NUTRs} (Cutr_u \times \mathrm{c}_u + \sum_{z=1}^{Nmed_u} Cmed_{uz} \times \mathrm{d}_{uz}) \right) \\
& S.A \\
& \sum_{u=1}^{NUTRs} \sum_{z=1}^{Nmed_u} \mathrm{d}_{uz} \geq NBarras - 1 && (1) \\
& \det(\mathrm{G_t}) \neq 0 \wedge \det(\mathrm{G_s}) \neq 0 \quad \mathrm{t} = 1, \mathrm{N_t}; \mathrm{s} = 1, \mathrm{N_u} && (2) \\
& E_t(i,i) \mathrm{x}\ \mathrm{A_i} + (1 - \mathrm{A_i}) \neq 0 \wedge E_s(i,i) \mathrm{x}\ \mathrm{A_i} + (1 - \mathrm{A_i}) \neq 0; \ \mathrm{i} = 1, \mathrm{Nmed}; \mathrm{t} = 1, \mathrm{N_t}; \mathrm{s} = 1, \mathrm{N_u} && (3) \\
& \rho^t{}_{ij} \mathrm{x}\ \mathrm{A_i} \neq 1 \vee \gamma^t{}_{ij} \mathrm{x}\ \mathrm{A_i} \neq 1 \vee \rho^t{}_{ij} \mathrm{x}\ \mathrm{A_j} \neq 1 \vee \gamma^t{}_{ij} \mathrm{x}\ \mathrm{A_j} \neq 1; \ \mathrm{i} = 1, \mathrm{Nmed}; \mathrm{j} = 1, \mathrm{Nmed}; \mathrm{t} = 1, \mathrm{N_t}; \ \mathrm{i} \neq \mathrm{j} && (4) \\
& \mathrm{c_u}, \mathrm{d_{uz}}, A_i \in \{0,1\}
\end{aligned}
\tag{4.8}
$$

Por ser a condição base para o processo de EE, não é possível inserir o requisito de observabilidade no atendimento a áreas de interesse, ou seja, neste caso o sistema é visto como uma única área. A flexibilização de supervisão em certas áreas da rede é feita para os requisitos de ausência de medidas e conjuntos

críticos. A_i representa se a medida *i* está localizada em área prioritária ou não. Se a área onde está localizada a i-ésima medida for prioritária, A_i=1, caso contrário A_i =0.

4.6 Função Aptidão

A função aptidão, visando avaliar a adequação de cada solução candidata para o problema de alocação ótima de pontos de medição, pode ser então formulada como:

$$FA = \left(\left(\sum_{u=1}^{Nu} Cutr_u + \sum_{z=1}^{Nmed} Cmed_z \right) + \sum_{t=1}^{Nt} \left[Obs_t \times Pobs + medcri(t) \times Pmed(t) + medconj(t) \times Pconj(t) \right] + \sum_{u=1}^{Nu} \left[Obs_u \times Pobs + medcri(u) \times Pmed(u) + medconj(u) \times Pconj(u) \right] \right) \quad (4.9)$$

onde:

$$medcri(t) = \sum_{i=1}^{Nmed_t} mc_i(t) \times A_i \quad (4.10)$$

$$medconj(t) = \sum_{i=1}^{Nmed_t} mcc_i(t) \times A_i \quad (4.11)$$

$$medcri(u) = \sum_{u=1}^{Nmed_u} mc_i(u) \times A_i \quad (4.12)$$

$$medconj(u) = \sum_{u=1}^{Nmed_u} mcc_i(u) \times A_i \quad (4.13)$$

O primeiro termo da função de aptidão apresentada em (4.9), a ser minimizada, corresponde ao custo do sistema de medição proposto, sendo *Nu* e *Nmed* o número total de UTRs e medidas propostas, respectivamente. A minimização do segundo termo busca garantir o atendimento aos requisitos de redundância para os cenários topológicos de interesse, enquanto o terceiro termo de (4.9) inclui o atendimento aos requisitos para cenários de contingência de UTRs. No segundo termo de (4.9), Obs_t indica se o t-ésimo cenário topológico é observável ($Obs_t=0$) ou não observável ($Obs_t=1$), enquanto *Pobs* é a penalidade imposta à existência de cenários não observáveis. A variável *medcri(t)* indica o número de medidas críticas presentes no t-ésimo cenário topológico, enquanto *Pmed(t)* é a penalidade imposta à existência de medidas críticas em tal cenário. Analogamente, *medconj(t)* representa o número total de medidas pertencentes a conjuntos críticos no t-ésimo cenário e *Pconj(t)* é a penalidade imposta á existência de conjuntos críticos em tal cenário. No terceiro termo de (4.9), as variáveis anteriormente definidas estão também presentes, porém trocando-se o índice "*t*" pelo índice "*u*", indicando que elas são agora consideradas para os *Nu* cenários derivados da perda de uma UTR em vez dos *Nt* diferentes cenários topológicos. A definição de tais variáveis é idêntica à anteriormente apresentada, sendo que neste caso elas se aplicam ao u-ésimo cenário com perda de UTR em vez do t-ésimo cenário topológico.

Note que o número de medidas críticas (*medcri*) em cada cenário topológico ou com perda de UTR pode ser obtido de acordo com (4.10) ou (4.12), respectivamente. Nestas expressões, $Nmed_t$ representa o número total de medidas presentes no plano de medição da t-ésima topologia, enquanto $Nmed_u$ representa o número total de medidas presentes no plano de medição do u-ésimo cenário com perda de UTR. As variáveis $mc_i(t)$ e $mc_i(u)$ indicam se a i-ésima medida é crítica ($mc_i=1$) ou não crítica ($mc_i=0$) no cenário considerado. A variável A_i indica se a i-ésima medida pertence à área prioritária ($A_i=1$) ou não prioritária ($A_i=0$). Dessa maneira, é também representada a possibilidade de flexibilizar o atendimento a certos requisitos em função da prioridade associada à supervisão de cada área da rede. Por exemplo, caso se admita tolerar a presença de medidas críticas em uma certa área da rede, estas, quando existirem ($mc_i=1$), não serão contabilizadas em

(4.10) ou (4.12) para se determinar o total de medidas críticas presentes, uma vez que nestes casos tem-se $A_i=0$. Isto pode levar a soluções nas quais o total de medidas críticas calculado é igual a zero, embora existam medidas críticas em áreas não prioritárias. Neste caso, o planejamento é flexibilizado de forma a exigir a ausência de medidas críticas apenas em áreas prioritárias, requerendo menor redundância do plano de medição e reduzindo custos. Nas expressões (4.11) e (4.13) são contabilizados os totais de medidas pertencentes a conjuntos críticos (medconj) em cada cenário topológico ou com perda de UTR. Analogamente ao que ocorre nas expressões (4.10) e (4.12), as variáveis $mcc_i(t)$ e $mcc_i(u)$ indicam se a i-ésima medida pertence a conjunto crítico ($mcc_i=1$) ou não ($mcc_i=0$) no cenário considerado. Da mesma forma, a variável A_i indica se a i-ésima medida pertence à área prioritária ou não prioritária, permitindo flexibilizar o atendimento ao requisito de ausência de conjuntos críticos em certas áreas da rede.

A função aptidão apresentada em (4.9) permite a realização do planejamento de forma bastante flexível e buscando atender os interesses do planejador. Por exemplo, se o objetivo for planejar o sistema de medição para atender os requisitos de ausência de medidas e conjuntos críticos para apenas um cenário topológico de interesse e sem considerar a possibilidade de perda de UTRs, o terceiro termo de (4.9) é desconsiderado e no segundo termo tem-se N_t = 1. Se, por outro lado, é desejável atender N_t cenários topológicos garantindo a ausência de medidas e conjuntos críticos apenas para o primeiro deles e para os demais apenas a ausência de medidas críticas, tem-se $Pmed(t) \neq 0$ para os N_t cenários topológicos e $Pconj(1) \neq 0$, sendo $Pconj(t) = 0$ para os N_t-1 cenários topológicos restantes. Para exigir que se atenda apenas o requisito de observabilidade em cenários com perda de UTRs, basta considerar $Pmed(u)$ e $Pconj(u)$ iguais a zero no terceiro termo de (4.9). Neste caso, busca-se assegurar a não existência de UTRs críticas. Para se garantir a ausência de um conjunto crítico de UTRs basta fazer também $Pmed(u) \neq 0$. Conforme já comentado anteriormente, a flexibilização do atendimento aos requisitos em função da prioridade de supervisão de cada área da rede pode ser implementada no cálculo da quantidade de medidas críticas e medidas pertencentes a conjuntos críticos nas expressões de (4.10) a (4.13).

No Capítulo 6 serão apresentadas simulações e resultados de estudos de planejamento realizados segundo diferentes objetivos. O sétimo capítulo apresenta a metodologia empregada para a obtenção de soluções ótimas a partir da combinação de metaheurísticas e uma heurística construtiva.

4.7 Conclusões

Este capítulo apresentou a formulação proposta para a solução do problema de alocação ótima de pontos de medição, considerando aspectos como minimização de custos e atendimento a requisitos de observabilidade, confiabilidade e robustez. A possibilidade de flexibilizar o atendimento a tais requisitos em função da prioridade de supervisão de diferentes áreas da rede foi também apresentada como uma forma de melhor explorar as relações custo-benefício do planejamento. A partir da formulação apresentada foi proposta uma função aptidão que permite ao planejador definir de forma bastante flexível os objetivos a serem considerados no planejamento.

CAPÍTULO 5

METODOLOGIA PROPOSTA

5.1 Introdução

Neste capitulo, serão discutidos aspectos relacionados à construção de uma metodologia para alocação de pontos de medição, baseada na aplicação das metaheurísticas apresentadas anteriormente.

De modo a melhorar a eficiência e eficácia na busca pela solução, é proposto neste trabalho um procedimento heurístico para a construção de soluções de boa qualidade, empregado em conjunto com as metaheurísticas AG, GRASP e ACO durante o processo de otimização. Tal heurística é baseada em certas características inerentes ao problema aqui tratado, as quais foram identificadas durante o desenvolvimento desta pesquisa e que estão baseadas na forma com que medidas e variáveis de estado se relacionam através da rede elétrica. Além disso, leve-se também em conta os requisitos de redundância necessários para que não se atinja condições críticas.

5.2 Heurística Construtiva

Como em toda heurística, o algoritmo aqui proposto não garante a obtenção da solução ótima global, mas permite chegar a soluções de alta qualidade com relação aos objetivos desejados.

A inclusão da heurística construtiva proposta nas metaheurísticas AGs, GRASP e ACO busca a obtenção de soluções de melhor qualidade, em tempos computacionais mais atraentes.

5.2.1 Características inerentes ao problema de alocação de medidores

Para a definição da heurística construtiva foram levadas em consideração diversas características do problema de alocação de medidores descritas a seguir.

Abrangência da Observabilidade:

Uma UTR (e respectivos medidores associados) alocada em uma barra que apresenta um maior número de conexões com outras barras, é capaz de permitir a observabilidade de uma maior área da rede elétrica, como é ilustrado na Figura 5.1, onde se compara a abrangência de uma UTR localizada na barra 2 com outra localizada na barra 4.

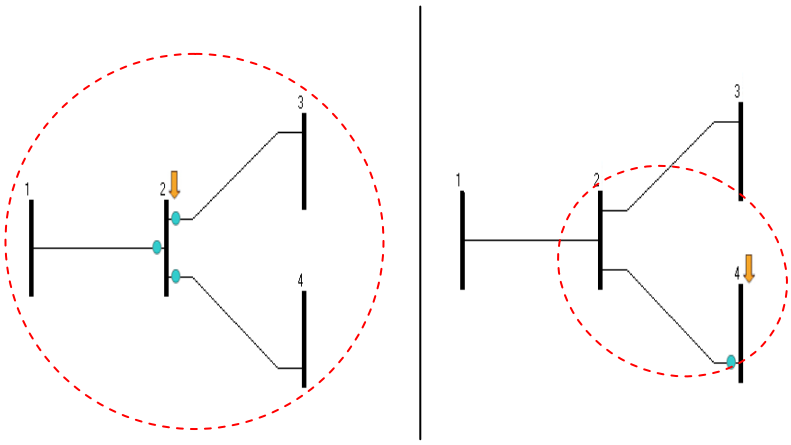

Figura 5.1 - Áreas observadas por UTRs

A seguir, serão apresentadas características observadas em função do tipo de rede a ser supervisionada e da necessidade do não atingimento de níveis críticos de redundância.

Redes do Tipo Radial:

Para garantir as restrições de observabilidade e ausência de medidas críticas em redes radiais, o estado de cada barra deve ser relacionado pelas equações correspondentes a pelo menos duas medidas associadas à UTRs

diferentes. De outro modo, surge um ramo irrelevante (sem medidas de fluxo ou de injeção em seus terminais), caracterizando neste caso um sistema não observável. Diferentes situações podem ser exemplificadas utilizando as redes das Figuras 5.2 e 5.3. Para o caso dos conjuntos críticos é necessário que todas as barras tenham uma UTR, conforme mostra a Figura 5.4.

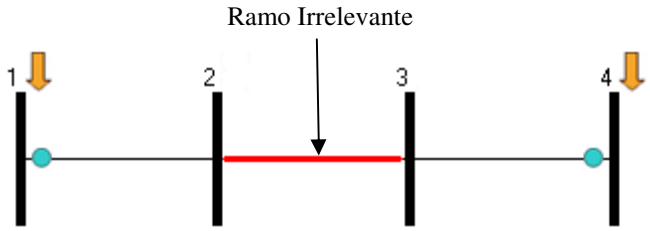

Figura 5.2 - Rede não observável

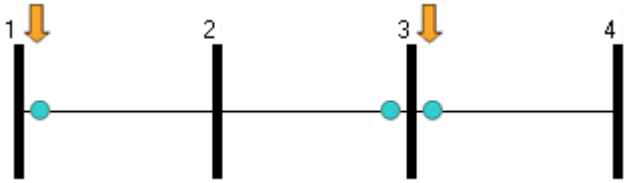

Figura 5.3 - Rede observável sem medidas críticas

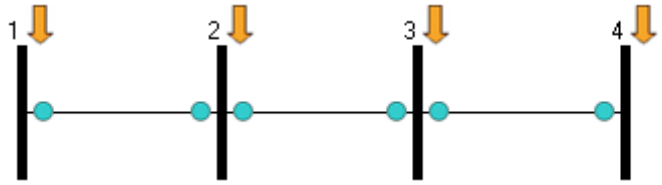

Figura 5.4 - Rede observável sem conjuntos críticos

<u>Redes do Tipo Malha:</u>

Para garantir as restrições de observabilidade e ausência de medidas críticas, o estado das barras que pertencem a uma malha devem ser relacionados por pelo menos um medidor alocado na própria barra ou nas barras adjacentes, como se vê na Figura 5.5. É possível haver ramos irrelevantes. Para o caso dos conjuntos críticos é comumente necessário que o estado de uma barra seja observado por medidas associadas à UTRs diferentes, o que é ilustrado na Figura 5.6.

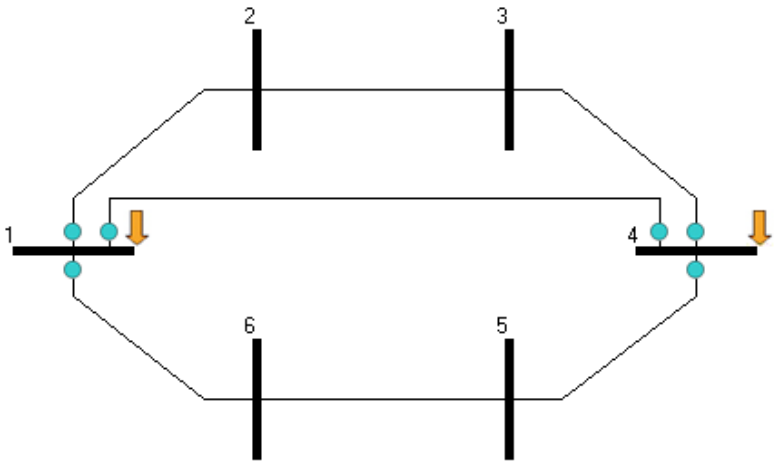

Figura 5.5 - Sistema de medição para observabilidade e ausência de medidas críticas

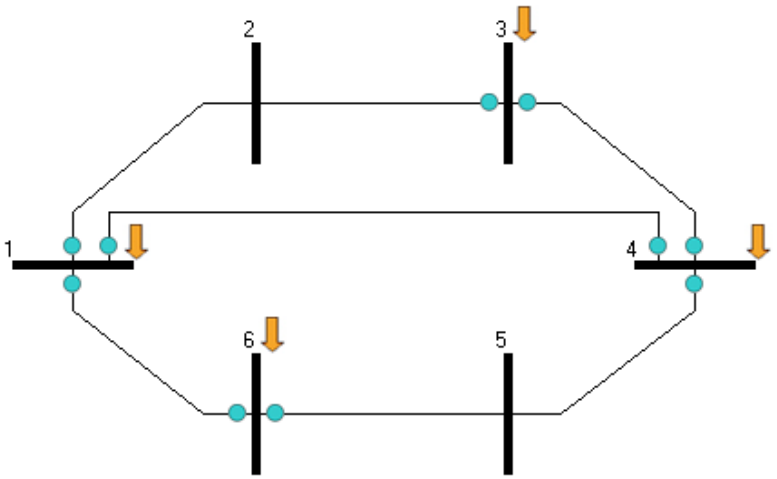

Figura 5.6- Sistema de medição para ausência de conjuntos críticos

As combinações que podem ser encontradas nas redes em malha são mais variadas do que em redes radiais. Além disso, as redes elétricas apresentam combinações de trechos radiais e em malha interconectados, gerando uma maior diversidade de situações. Contudo, as características identificadas para cada caso podem ser empregadas com sucesso para a formulação de uma heurística construtiva.

5.2.2 Heurística construtiva gulosa

Uma heurística foi construída a partir das características anteriormente apresentadas, onde são utilizadas quatro listas que se alteram dinamicamente durante o processo de construção do plano de medição.

L1: contém as barras do sistema ordenadas de forma decrescente em função do número de ramos a elas conectados (barras elegíveis para alocação de URTs);

L2: contém as barras onde são alocadas UTRs;

L3: contém as barras já observadas para fins de EE e não mais elegíveis para alocação de UTR;

L4: contém a contagem de número de vezes que o estado de cada barra é relacionado pelas medidas de fluxo já instaladas;

A seguir é descrito o algoritmo construtivo visando ao atendimento dos requisitos de observabilidade e ausência de medidas e conjuntos críticos.

(i) Criar a lista L1, que contém as barras do sistema ordenadas decrescentemente pelo número de conexões. Inicialmente, L2 e L3 estão vazias e as contagens em L4 são nulas.

(ii) Selecionar a próxima barra i em L1 (aquela com maior número de conexões) e transferi-la para L2, considerar à alocação de uma UTR na barra i (e medidas associadas);

(iii) Atualizar em L4 o número de vezes que o estado de cada barra adjacente à barra i, ainda pertencente a L1, é observada por medidas de fluxo;

(iv) Verificar se é possível descartar a alocação de UTRs nas barras adjacentes à barra i, a partir das informações em L4. Levando-se em conta os requisitos de redundância desejados:

1. Caso apenas os requisitos de observabilidade e ausência de medidas críticas sejam almejados, a alocação de uma UTR em uma barra k, adjacente a i, será descartada quando:
   - Barra k pertence a uma malha, seu estado é observado por ao menos uma medida de fluxo;
   - Barra k pertence a trecho radial, seu estado é observado por ao menos duas medidas de fluxo em UTRs distintas;
   - Barra k é terminal e seu estado é observado por ao menos uma medida de fluxo.

2. Caso o requisito de ausência de conjuntos críticos (o qual englobará os anteriores) seja desejado, a alocação de uma UTR em uma barra k, adjacente a i, será descartada quando pertencente a uma malha, sendo seu estado observado por ao menos duas medidas de fluxo. Para este requisito, uma UTR será sempre alocada em barras pertencentes a um trecho radial ou se forem terminais.

(v) As barras adjacentes nas quais a alocação de UTR foi descartada no passo (iv) são transferidas para L3, enquanto as demais permanecem em L1;

(vi) Enquanto houver elementos em L1, retornar ao passo (II). Caso L1 se torne uma lista vazia, o algoritmo construtivo é encerrado.

Ao final do processo construtivo é obtido um plano de medição que atende aos requisitos pretendidos. A lista L2 armazenará as barras onde a instalação de UTRs é proposta, sendo considerada também a instalação de todas as medidas associadas a tais UTRs.

O algoritmo apresentado para os requisitos de observabilidade e ausência de medidas críticas é ilustrado através do exemplo na Tabela 5.1 e Figura 5.7. As barras selecionadas e as alterações realizadas nas listas em cada etapa do algoritmo estão destacadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Exemplo do funcionamento da heurística construtiva gulosa para os requisitos observabilidade e ausência de medidas críticas no sistema IEEE-14

ETAPA 1	Barras ordenadas	L1	4	2	5	6	9	7	13	1	3	10	11	12	14	8
	Barras para alocação	L2														
	Barras observadas	L3														
	N° de vezes obser.	L4														
ETAPA 1	Barras ordenadas	L1				6		7	13	1		10	11	12	14	8
	Barras para alocação	L2	4													
	Barras observadas	L3		2	5		9				3					
	N° de vezes obser.	L4		1	1		1	1			1					
ETAPA 2	Barras ordenadas	L1						7		1		10			14	8
	Barras para alocação	L2	4			6										
	Barras observadas	L3		2	5		9		13		3		11	12		
	N° de vezes obser.	L4		1	1		1	1	1				1	1		
ETAPA 3	Barras ordenadas	L1								1		10			14	
	Barras para alocação	L2	4			6		7								
	Barras observadas	L3		2	5		9		13		3		11	12		8
	N° de vezes obser.	L4		1	1		1	1	1		1		1	1		1
ETAPA 4	Barras ordenadas	L1										10			14	
	Barras para alocação	L2	4			6		7		1						
	Barras observadas	L3		2	5		9		13		3		11	12		8
	N° de vezes obser.	L4		1	1		1	1	1		1		1	1		1
ETAPA 5	Barras ordenadas	L1													14	
	Barras para alocação	L2	4			6		7		1		10				
	Barras observadas	L3		2	5		9		13		3		11	12		8
	N° de vezes obser.	L4		1	1		1	1	1		1		1	1		1
ETAPA 6	Barras ordenadas	L1														
	Barras para alocação	L2	4			6		7		1		10			14	
	Barras observadas	L3		2	5		9		13		3		11	12		8
	N° de vezes obser	L4		1	1		1	1	1		1		1	1		1

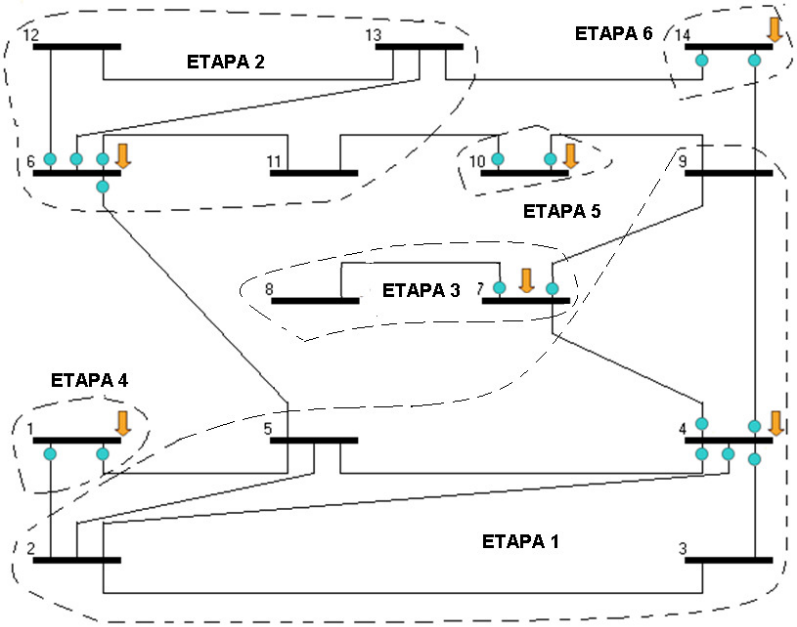

Figura 5.7- Alocação de UTRs usando a heurística construtiva gulosa para os requisitos observabilidade e ausência de medidas críticas no sistema IEEE-14

A Tabela 5.2 e a Figura 5.8 ilustram o processo de construção de um plano de medição visando à ausência de conjuntos críticos.

Tabela 5.2 – Exemplo do funcionamento da heurística construtiva gulosa para o requisito de ausência de conjuntos críticos no sistema IEEE-14

ETAPA 0	Barras ordenadas	L1	4	2	5	6	9	7	13	1	3	10	11	12	14	8
	Barras para alocação	L2														
	Barras observadas	L3														
	N° de vezes obser.	L4														
ETAPA 1	Barras ordenadas	L1		2	5	6	9	7	13	1	3	10	11	12	14	8
	Barras para alocação	L2	4													
	Barras observadas	L3														
	N° de vezes obser.	L4		1	1		1	1			1					
ETAPA 2	Barras ordenadas	L1				6	9	7	13	1		10	11	12	14	8
	Barras para alocação	L2	4	2												
	Barras observadas	L3			5						3					
	N° de vezes obser.	L4		1	2		1	1		1	2					
ETAPA 3	Barras ordenadas	L1					9	7	13	1		10	11	12	14	8
	Barras para alocação	L2	4	2		6										
	Barras observadas	L3			5						3					
	N° de vezes obser.	L4		1	2		1	1	1	1	2		1	1		
ETAPA 4	Barras ordenadas	L1						7	13	1		10	11	12	14	8
	Barras para alocação	L2	4	2		6	9									
	Barras observadas	L3			5						3					
	N° de vezes obser.	L4		1	2		1	2	1	1	2	1	1	1	1	
ETAPA 5	Barras ordenadas	L1							13	1		10	11	12	14	8
	Barras para alocação	L2	4	2		6	9	7								
	Barras observadas	L3			5						3					
	N° de vezes obser.	L4		1	2		1	2	1	1	2	1	1	1	1	1
ETAPA 6	Barras ordenadas	L1								1		10	11			8
	Barras para alocação	L2	4	2		6	9	7	13							
	Barras observadas	L3			5						3			12	14	
	N° de vezes obser.	L4		1	2		1	2	1	1	2	1	1	2	2	1
ETAPA 7	Barras ordenadas	L1										10	11			8
	Barras para alocação	L2	4	2		6	9	7	13	1						
	Barras observadas	L3			5						3			12	14	
	N° de vezes obser.	L4		1	2		1	2	1	1	2	1	1	2	2	1
ETAPA 8	Barras ordenadas	L1														8
	Barras para alocação	L2	4	2		6	9	7	13	1		10				
	Barras observadas	L3			5						3		11	12	14	
	N° de vezes obser.	L4		1	2		1	2	1	1	2	1	2	2	2	1
ETAPA 9	Barras ordenadas	L1														
	Barras para alocação	L2	4	2		6	9	7	13	1		10				8
	Barras observadas	L3			5						3		11	12	14	
	N° de vezes obser.	L4		1	2		1	2	1	1	2	1	2	2	2	1

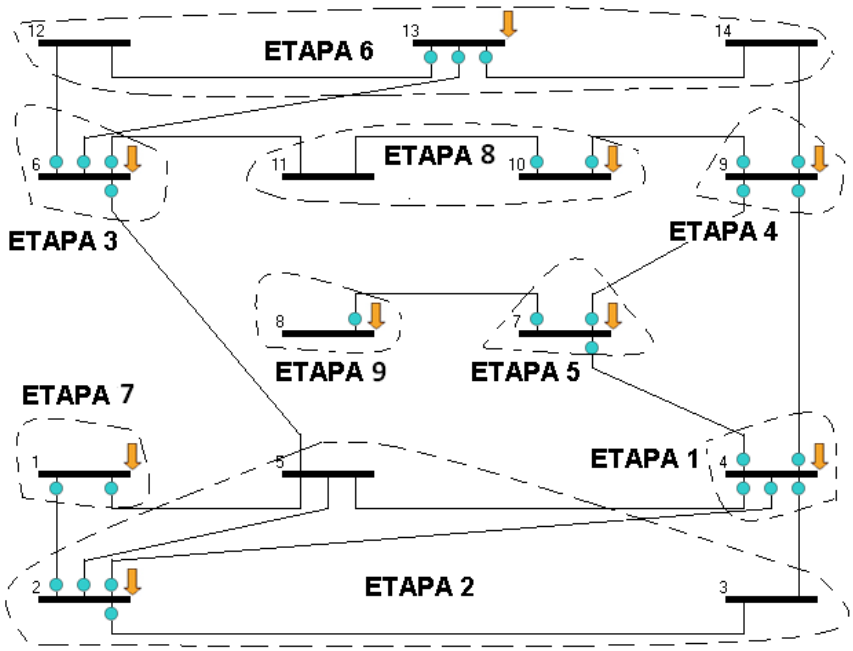

Figura 5.8 – Alocação de UTRs usando a heurística construtiva gulosa para o requisito de ausência de conjuntos críticos no sistema IEEE-14

O pseudocódigo da Heurística Construtiva gulosa é descrito na Figura 5.9.

```
Procedimento Heurística()
Para n=1 até Total de Barras
        Construtivo (Barras Ordenadas [n])
Fim Para
Fim do Procedimento

Procedimento Construtivo (Barra)
Aloca UTR na Barra Selecionada
Para i=1 até Número Total de Barras Adjacentes
        Se (Barra Adjacentes [i] = "Malha")
                Se (requisito="Obs|MedCrit" & Barra Adjacentes [i]=1medObs)
                        Remove (Barra Adjacentes [i])
                Senão (requisito ="ConjCrit" & Barra Adjacentes [i]=2medObs)
                        Remove (Barra Adjacentes [i])
                 Fim Se
        Senão (Barra Adjacentes [i] = "Radial")
                Se (requisito ="Obs|MedCrit" & Barra Adjacentes [i]=2medObs)
                        Remove (Barra Adjacentes [i])
                 Senão (requisito ="ConjCrit")
                         Remove (Barra Adjacentes [i])
                  Fim Se
        Senão (Vizinho da Barra [i] = "Radial Terminal")
                Se (requisito ="Obs|MedCrit" & Barra Adjacentes [i]=1medObs)
                        Remove (Barra Adjacentes [i])
                Senão (requisito ="ConjCrit")
                        Remove (Barra Adjacentes [i])
                Fim Se
        Fim Se
 Fim Para
// XmedObs : Número x de medidas observando a barra
Fim do Procedimento Construtivo1
```

Figura 5.9- Heurística construtiva gulosa

5.2.3 Heurística construtiva probabilística

A Heurística Construtiva gulosa sempre alcança a mesma solução, uma vez que todas as decisões tomadas durante o processo de construção da solução são determinísticos. Tal heurística tende a não alocar UTRs em duas barras adjacentes. Por outro lado, se duas barras com muitas conexões são adjacentes, pode ser mais vantajoso alocar UTRs nestas duas barras, uma vez que uma maior área tenderá a ser observada com um menor número de UTRs.

Desta forma, foi criada uma heurística construtiva probabilística, que busca ser mais flexível e pode apresentar soluções diferentes a cada vez que for executada, sendo para isto usada uma roleta. A roleta é criada cada vez que uma barra i é selecionada para instalação de UTR. O número de cavidades da roleta equivale ao número de barras n conectadas à barra i. Cada cavidade está associada a um número inteiro K (K=1,...,n), sendo sua área dada por:

$$Área(cavidade\ \mathrm{K}) = \frac{K}{\sum_{j=1}^{n} j} \tag{5.1}$$

Desta maneira, se três barras estão conectadas à barra i, tem-se uma roleta com três cavidades e áreas iguais a 1/6, 2/6 e 3/6.

Cada vez que uma barra i é selecionada para instalação de uma UTR, a roleta será executada e indicará um certo número de conexões K (no exemplo acima, K=1,2, ou 3), o qual será comparado com o número de barras conectadas a cada barra adjacente à barra i. As barras adjacentes que apresentam um número de conexões superior a K continuarão elegíveis para instalação de UTRs (permanecendo na lista L1), enquanto as demais são transferidas para a lista L3. Assim, busca-se a instalação de UTRs em barras adjacentes que apresentam elevado número de conexões. A heurística construtiva probabilística para requisitos de observabilidade e ausência de medidas e conjuntos críticos, incorporando a idéia da roleta, consiste dos seguintes passos:

(i) Criar a lista L1, que contém as barras do sistema ordenadas decrescentemente pelo número de conexões. Inicialmente, L2 e L3 estão vazias e as contagens em L4 são nulas.

(ii) Selecionar a próxima barra i em L1 (aquela com maior número de conexões) e transferi-la para L2, considerar a instalação de uma UTR na barra i (e medidas associadas);

(i) Atualizar em L4 o número de vezes que o estado de cada barra adjacente à barra i, ainda pertencente a L1, é observada por medidas de fluxo;

(iii) Criar uma roleta com número de cavidades igual ao número de conexões n da barra selecionada i, cada cavidade representando um número inteiro diferente entre 1 e n, possuindo área de acordo com (5.1). Executar a roleta e obter o número de conexões a ser comparado com o das barras adjacentes à barra i. É fácil perceber que cavidades que representam números de conexões maiores (maior área) têm maior chance de serem selecionadas.

(iv) Verificar se é possível descartar a alocação de UTRs nas barras adjacentes à barra i, a partir das informações em L4. Levando-se em conta os requisitos de redundância desejados:

1. Caso apenas os requisitos de observabilidade e ausência de medidas críticas sejam almejados, a alocação de uma UTR em uma barra k, adjacente a i, será descartada quando:
   - Barra k pertence a uma malha, seu estado é observado por ao menos uma medida de fluxo e o seu número de conexões (contagem atual em L4) é menor ou igual ao obtido pela roleta;
   - Barra k pertence a trecho radial, seu estado é observado por ao menos duas medidas de fluxo em UTRs distintas;
   - Barra k é terminal e seu estado é observado por ao menos uma medida de fluxo.

2. Caso o requisito de ausência de conjuntos críticos (o qual englobará os anteriores) seja desejado, a alocação de uma UTR em uma barra k, adjacente a i, será descartada quando pertencente à uma malha, sendo seu estado observado por ao menos duas medidas de fluxo e o seu número de conexões menor ou igual ao obtido pela roleta. Para este requisito, uma UTR será sempre alocada em barras pertencentes a um trecho radial ou terminal.

(v) As barras adjacentes nas quais a alocação de UTR foi descartada no passo (iv) são transferidas para L3, enquanto as demais permanecem em L1;

(vi) Enquanto houver elementos em L1, retornar ao passo (II). Caso L1 se torne uma lista vazia, o algoritmo construtivo é encerrado.

Um exemplo de aplicação da heurística construtiva probabilística é ilustrado na Tabela 5.3 e Figura 5.10.

Tabela 5.3 – Exemplo do funcionamento da heurística construtiva probabilística para os requisitos observabilidade e ausência de medidas críticas no sistema IEEE-14

Valor da roleta -0																
ETAPA 0	Barras ordenadas	L1	4	2	5	6	9	7	13	1	3	10	11	12	14	8
	Barras para alocação	L2														
	Barras observadas	L3														
	N° de vezes obser.	L4														
Valor da roleta -3																
ETAPA 1	Barras ordenadas	L1		2	5	6	9	7	13	1		10	11	12	14	8
	Barras para alocação	L2	4													
	Barras observadas	L3									3					
	N° de vezes obser.	L4		1	1		1	1			1					
Valor da roleta -4																
ETAPA 2	Barras ordenadas	L1				6	9	7	13			10	11	12	14	8
	Barras para alocação	L2	4	2												
	Barras observadas	L3			5					1	3					
	N° de vezes obser.	L4		1	2		1	1		1	1					
Valor da roleta -3																
ETAPA 3	Barras ordenadas	L1					9	7				10			14	8
	Barras para alocação	L2	4	2		6										
	Barras observadas	L3			5				13	1	3		11	12		
	N° de vezes obser.	L4		1	2		1	1	1	1	1		1	1		

Valor da roleta -4																
ETAPA 4	Barras ordenadas	L1														8
	Barras para alocação	L2	4	2		6	9									
	Barras observadas	L3			5			7	13	1	3	10	11	12	14	
	N° de vezes obser.	L4			2		1	2	1	1	1	1	1	1	1	

Valor da roleta -1																
ETAPA 5	Barras ordenadas	L1														
	Barras para alocação	L2	4	2		6	9									8
	Barras observadas	L3			5			7	13	1	3	10	11	12	14	
	N° de vezes obser.	L4		1	2		1	1	1	1	1	1	1	1	1	

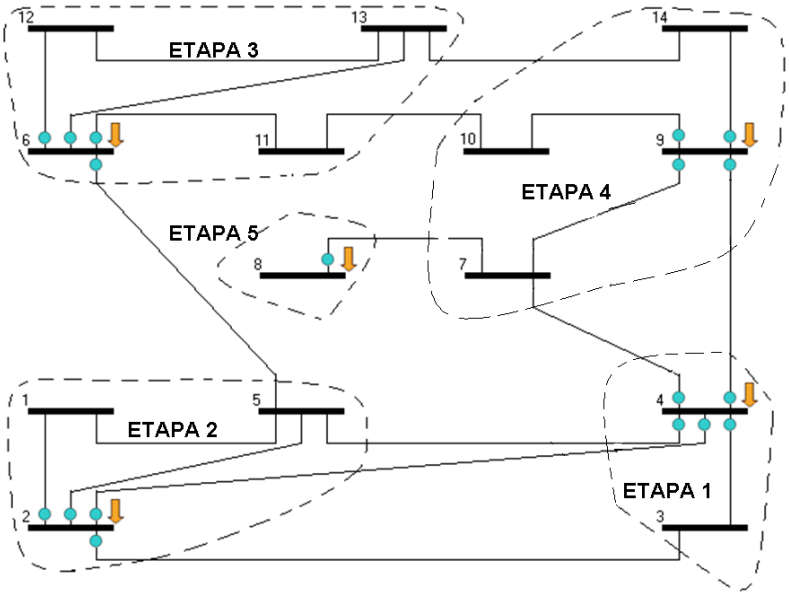

Figura 5.10- Alocação de UTRs usando a heurística construtiva probabilística para os requisitos observabilidade e ausência de medidas críticas no sistema IEEE-14

Na Figura 5.11, é descrito o pseudocódigo da heurística construtiva probabilística.

```
Procedimento Construtivo (Barra)
Aloca UTR na Barra Selecionada
Para i=1 até Número Total de Barras Adjacentes
        Se (Barra Adjacentes [i] = "Malha")
                Se (requisito="Obs|MedCrit" & Barra Adjacentes [i]=1medObs
                 & conexões (Barra Adjacentes [i]) <=roleta (conexões (Barra))
                        Remove (Barra Adjacentes  [i])
                Senão (requisito ="ConjCrit" & Barra Adjacentes [i]=2medObs
                & conexões (Barra Adjacentes [i]) <=roleta (conexões (Barra))
                        Remove (Barra Adjacentes [i])
                 Fim Se
        Senão (Barra Adjacentes [i] = "Radial")
                Se (requisito ="Obs|MedCrit" & Barra Adjacentes [i]=2medObs)
                        Remove (Barra Adjacentes [i])
                 Senão (requisito ="ConjCrit")
                         Remove (Barra Adjacentes [i])
                  Fim Se
        Senão (Vizinho da Barra [i] = "Radial Terminal")
                Se (requisito ="Obs|MedCrit" & Barra Adjacentes [i]=1medObs)
                        Remove (Barra Adjacentes [i])
                Senão (requisito ="ConjCrit")
                        Remove (Barra Adjacentes [i])
                Fim Se
        Fim Se
 Fim Para
// XmedObs : Número x de medidas observando a barra
Fim do Procedimento
```

Figura 5.11 - Heurística construtiva probabilística

Testes realizados com as duas heurísticas num sistema IEEE-14 demostraram que a heurística probabilística é mais eficiente quando usada em multi-partidas.

5.2.4 Consideração de diferentes condições topológicas

Para se levar em consideração que o plano de medição deve também ser planejado para a supervisão da rede em condições de topologia alterada, utiliza-se a mesma heurística construtiva probabilística anteriormente apresentada. Neste caso, porém, uma barra é dita pertencente a uma malha quando ela é assim classificada para todas as topologias de interesse. Por outro lado, uma barra é dita pertencente a um trecho radial se ela é assim classificada em pelo menos uma das topologias de interesse. A heurística tomará decisões sobre a alocação de UTRs nas barras da rede em função da classificação de tais barras (pertencentes a malha ou a trecho radial) considerando-se todas as topologias de interesse.

Um exemplo de aplicação da heurística construtiva quando se considera diferentes cenários topológicos é ilustrado na Tabela 5.4. Neste caso, além do cenário topológico base, considera-se também quatro outras topologias, cada uma delas derivada da saída de operação de um dos seguintes ramos: 1-2, 2-3, 4-5, 10-11.

Considerando as cinco topologias de interesse, as barras 1, 3, 4, 5, 6, 9, 10 e 11 passam ser classificadas como barras pertencentes a trecho radiais. Quando se considera apenas o cenário topológico base, tais barras eram classificadas como pertencentes a uma malha.

Tabela 5.4 – Exemplo do funcionamento da heurística construtiva com ausência de conjuntos críticos e diferentes cenários topológicos no sistema IEEE-14

Valor da roleta -0																
ETAPA 0	Barras ordenadas	L1	4	2	5	6	9	7	13	1	3	10	11	12	14	8
	Barras para alocação	L2														
	Barras observadas	L3														
	N° de vezes obser.	L4														
Valor da roleta -3																
ETAPA 1	Barras ordenadas	L1		2	5	6	9	7	13	1	3	10	11	12	14	8
	Barras para alocação	L2	4													
	Barras observadas	L3														
	N° de vezes obser.	L4		1	1		1	1			1					
Valor da roleta -4																
ETAPA 2	Barras ordenadas	L1			5	6	9	7	13	1	3	10	11	12	14	8
	Barras para alocação	L2	4	2												
	Barras observadas	L3														
	N° de vezes obser.	L4		1	2		1	1		1	2					

Valor da roleta -3																
ETAPA 3	Barras ordenadas	L1				6	9	7	13	1	3	10	11	12	14	8
	Barras para alocação	L2	4	2	5											
	Barras observadas	L3														
	N° de vezes obser.	L4		1	2	1	1	1		2	2					

Valor da roleta -4																
ETAPA 4	Barras ordenadas	L1					9	7	13	1	3	10	11	12	14	8
	Barras para alocação	L2	4	2	5	6										
	Barras observadas	L3														
	N° de vezes obser.	L4		1	2	1	1	1	1	2	2		1	1		

Valor da roleta -3																
ETAPA 5	Barras ordenadas	L1						7	13	1	3	10	11	12	14	8
	Barras para alocação	L2	4	2	5	6	9									
	Barras observadas	L3														
	N° de vezes obser.	L4		1	2	1	1	2	1	2	2	1	1	1	1	

Valor da roleta -2																
ETAPA 6	Barras ordenadas	L1							13	1	3	10	11	12	14	8
	Barras para alocação	L2	4	2	5	6	9	7								
	Barras observadas	L3														
	N° de vezes obser.	L4		1	2	1	1	2	1	2	2	1	1	1	1	1

Valor da roleta -3																
ETAPA 7	Barras ordenadas	L1								1	3	10	11			8
	Barras para alocação	L2	4	2	5	6	9	7	13							
	Barras observadas	L3												12	14	
	N° de vezes obser.	L4		1	2	1	1	2	1	2	2	1	1	2	2	1

Valor da roleta -2																
ETAPA 8	Barras ordenadas	L1									3	10	11			8
	Barras para alocação	L2	4	2	5	6	9	7	13	1						
	Barras observadas	L3												12	14	
	N° de vezes obser.	L4		1	2	1	1	2	1	2	2	1	1	2	2	1

Valor da roleta -2																
ETAPA 9	Barras ordenadas	L1										10	11			8
	Barras para alocação	L2	4	2	5	6	9	7	13	1	3					
	Barras observadas	L3												12	14	
	N° de vezes obser.	L4		1	2	1	1	2	1	2	2	1	1	2	2	1

Valor da roleta -2																
ETAPA 10	Barras ordenadas	L1											11			8
	Barras para alocação	L2	4	2	5	6	9	7	13	1	3	10				
	Barras observadas	L3												12	14	
	N° de vezes obser.	L4		1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	2	2	1

Valor da roleta -3																
ETAPA 11	Barras ordenadas	L1														8
	Barras para alocação	L2	4	2	5	6	9	7	13	1	3	10	11			
	Barras observadas	L3												12	14	
	N° de vezes obser.	L4		1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	2	2	1

Valor da roleta -2																
ETAPA 12	Barras ordenadas	L1														
	Barras para alocação	L2	4	2	5	6	9	7	13	1	3	10	11			8
	Barras observadas	L3												12	14	
	N° de vezes obser.	L4		1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	2	2	1

5.2.5 Consideração de perda de UTRs

Quando se deseja planejar o sistema de medição considerando a possibilidade de perda de UTRs, a heurística construtiva será empregada tal como apresentada anteriormente para o atendimento ao requisito de ausência de conjuntos críticos de medidas. Verificou-se que, neste caso, boas soluções são geradas para o atendimento aos requisitos de ausência de UTRs críticas ou ausência de um conjunto crítico de UTRs.

5.2.6 Flexibilização da supervisão em áreas não prioritárias

Pode-se facilmente adaptar a heurística construtiva de forma a levar em consideração que é possível flexibilizar o planejamento, requerendo uma supervisão mais confiável apenas em áreas da rede consideradas prioritárias (e, consequentemente, reduzindo custos). Para tal, a tomada de decisão sobre a alocação ou não alocação de uma UTR em uma determinada barra deve levar em conta o requisito de redundância especificado para a área da rede á qual a barra pertence.

A seguir é apresentado um exemplo da aplicação da heurística construtiva quando se considera uma área prioritária formada pelas barras 6, 9, 10, 11, 12, 13 e 14. Considera-se que as demais barras pertencem a uma área considerada não prioritária. De modo a facilitar o acompanhamento do exemplo, foi incluído um vetor binário indicando as barras pertencentes à área prioritária (o elemento em L5 é igual a 1) e não prioritária (o elemento em L5 é igual a 0). Neste exemplo, o atendimento ao requisito de ausência de conjuntos críticos é requerido apenas para a área prioritária.

Tabela 5.5 – Exemplo do funcionamento da heurística construtiva para ausência de conjuntos críticos na área prioritária no sistema IEEE-14

Valor da roleta -0																
ETAPA 0	Barras ordenadas	L1	4	2	5	6	9	7	13	1	3	10	11	12	14	8
	Barras para alocação	L2														
	Barras observadas	L3														
	N° de vezes obser.	L4														
	Área de Interresse	L5	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0

Valor da roleta -3																
ETAPA 1	Barras ordenadas	L1		2	5	6	9	7	13	1		10	11	12	14	8
	Barras para alocação	L2	4													
	Barras observadas	L3									3					
	N° de vezes obser.	L4		1	1		1	1			1					
	Área de Interresse	L5	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0

Valor da roleta -4																
ETAPA 2	Barras ordenadas	L1				6	9	7	13			10	11	12	14	8
	Barras para alocação	L2	4	2												
	Barras observadas	L3			5					1	3					
	N° de vezes obser.	L4		1	1			1		1	1					
	Área de Interresse	L5	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0

Valor da roleta -3																
ETAPA 3	Barras ordenadas	L1					9	7	13			10	11	12	14	8
	Barras para alocação	L2	4	2		6										
	Barras observadas	L3			5					1	3					
	N° de vezes obser.	L4		1	1			1	1	1	1		1	1		
	Área de Interresse	L5	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0

Valor da roleta -4																
ETAPA 4	Barras ordenadas	L1							13			10	11	12	14	8
	Barras para alocação	L2	4	2		6	9									
	Barras observadas	L3			5			7		1	3					
	N° de vezes obser.	L4		1	1			2	1	1	1	1	1	1	1	
	Área de Interresse	L5	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0

Valor da roleta -2																
ETAPA 5	Barras ordenadas	L1										10	11			8
	Barras para alocação	L2	4	2		6	9		13							
	Barras observadas	L3			5			7		1	3			12	14	
	N° de vezes obser.	L4		1	1			2	1	1	1	1	1	2	2	
	Área de Interresse	L5	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0

Valor da roleta -2																
ETAPA 6	Barras ordenadas	L1														8
	Barras para alocação	L2	4	2		6	9		13			10				
	Barras observadas	L3			5			7		1	3		11	12	14	
	N° de vezes obser.	L4		1	1			2	1	1	1	1	2	2	2	
	Área de Interresse	L5	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0

Valor da roleta -3																
ETAPA 7	Barras ordenadas	L1														
	Barras para alocação	L2	4	2		6	9		13			10				8
	Barras observadas	L3			5			7		1	3		11	12	14	
	N° de vezes obser.	L4		1	1			2	1	1	1	1	2	2	2	
	Área de Interresse	L5	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0

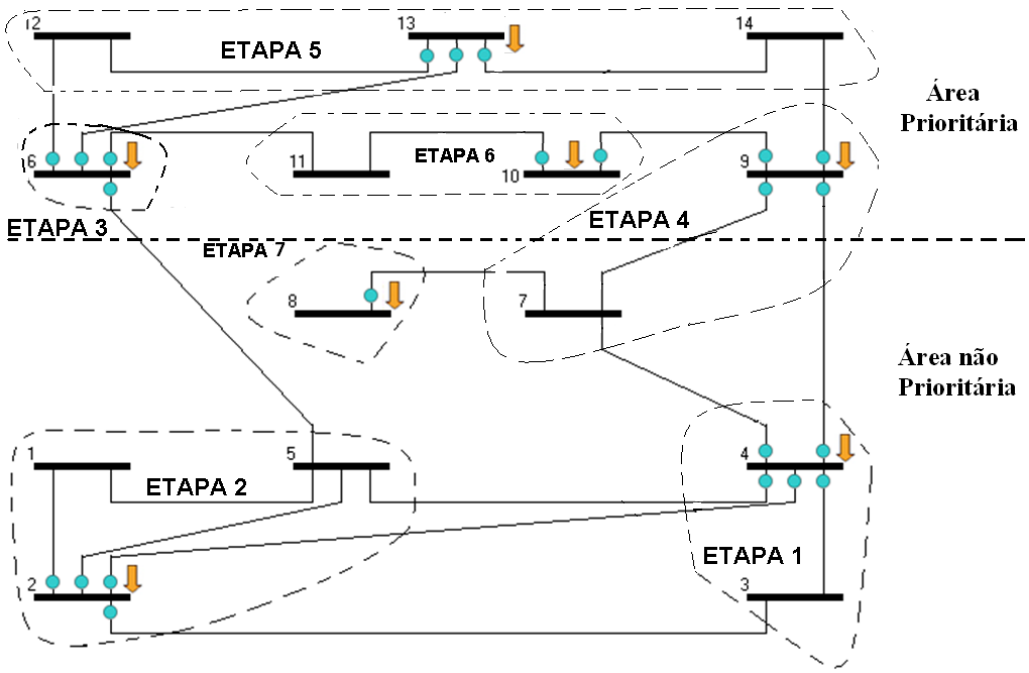

Figura 5.12- Alocação de UTRs usando a heurística construtiva com ausência de conjuntos críticos apenas na área prioritária do sistema IEEE-14

Nota-se da Figura 5.12 uma maior concentração de UTRs na área prioritária em relação à área não prioritária, a qual contém conjuntos críticos de medidas.

Na Figura 5.13, é descrito o pseudocódigo da heurística construtiva quando se pretende relaxar a confiabilidade da supervisão em áreas não prioritárias.

```
Procedimento Construtivo (Barra)
Aloca UTR na Barra Selecionada
Para i=1 até Número Total de Barras Adjacentes
        Se (Barra Adjacentes [i] = "Malha")
                Se (requisito="Obs|MedCrit" & Barra Adjacentes [i]=1medObs
                 & conexões (Barra Adjacentes [i]) <=roleta (conexões (Barra)
                 & AInt (Barra Adjacentes [i])==0))
                        Remove (Barra Adjacentes  [i])
                Senão (requisito ="ConjCrit" & Barra Adjacentes [i]=2medObs
                & conexões (Barra Adjacentes [i]) <=roleta (conexões (Barra)
                 & AInt (Barra Adjacentes [i])==1))
                        Remove (Barra Adjacentes [i])
                 Fim Se
        Senão (Barra Adjacentes [i] = "Radial")
                Se (requisito ="Obs|MedCrit" & Barra Adjacentes [i]=2medObs
                 & AInt (Barra Adjacentes [i])==0))
                        Remove (Barra Adjacentes [i])
                 Senão (requisito ="ConjCrit" & AInt (Barra Adjacentes [i])==1)
                         Remove (Barra Adjacentes [i])
                  Fim Se
        Senão (Vizinho da Barra [i] = "Radial Terminal")
                Se (requisito ="Obs|MedCrit" & Barra Adjacentes [i]=1medObs
                 & AInt (Barra Adjacentes [i])==0))
                        Remove (Barra Adjacentes [i])
                Senão (requisito ="ConjCrit" & AInt (Barra Adjacentes [i])==1)
                        Remove (Barra Adjacentes [i])
                Fim Se
        Fim Se
 Fim Para
// XmedObs : Número x de medidas observando a barra
Fim do Procedimento
```

Figura 5.13 - Heurística construtiva com áreas de interesse

5.3 Solução via Metaheurísticas e Heurística Construtiva

5.3.1 Algoritmo genético

Neste tópico será descrito o detalhamento do Algoritmo Genético (AG) usado neste trabalho sendo que a modelagem do cromossomo é representada em número binário. A população inicial é gerada aleatoriamente, sendo que está é testada antes para que a maioria das soluções sejam viáveis. Os operadores genéticos incidentes nos cromossomos são: seleção, cruzamento, mutação e elitismo. Em seguida é descrita a formulação dos operadores genéticos utilizados.

Seleção:

A seleção é a operação genética em que os cromossomos dos indivíduos tidos como mais aptos são escolhidos para formar a base genética da geração subseqüente à deles. Nesta Tese foi usada a seleção por roleta e torneiro. Para o método da roleta, a probabilidade de cada indivíduo participar da próxima geração é dada por:

$$P_{sel}(s_i) = \frac{f(s_i)}{\sum_{j=1}^{n} f(s_j)} \tag{5.2}$$

Sendo:

Si: indivíduo a ser avaliado

f: função de aptidão

Sj : indivíduo j da população

n: Número total de indivíduos da população

Para a seleção por torneio são escolhidos aleatoriamente n indivíduos e aquele dentre estes que tiver a maior aptidão será selecionado, e os outros serão descartados.

Cruzamento:

O cruzamento é aplicado nos indivíduos que passam pelo processo de seleção e visa inserir novos membros na população. Existe certa probabilidade de ocorrência de cruzamento e ela não deve ser muito pequena para evitar elitismo, e não muito alta para não dificultar a busca do AG. Uma característica importante do cruzamento é o ponto de corte. O ponto de corte define onde o cromossomo é seccionado e os segmentos são trocados. Neste trabalho foi usado cruzamento de um ponto e uniforme que são descritos a seguir.

Cruzamento de um ponto: cortam-se os cromossomos-pai em um ponto e os cromossomos-filho são formados trocando-se as cadeias de gene criadas pelos cortes.

Cruzamento uniforme: cria-se um vetor-máscara binário e aleatório com o mesmo comprimento dos cromossomos-pai. O primeiro filho é formado da seguinte forma: se o valor da j-ésima posição da máscara for 1, então o cromossomo filho receberá o j-ésimo gene do cromossomo-pai número 1, caso o dígito seja 0, o cromossomo-filho receberá o j-ésimo gene do cromossomo-pai número 2. Para o segundo filho, faz-se o contrário.

A robustez do AG é grande o suficiente para não haver diferenças significativas de desempenho entre os dois tipos de cruzamento [Beas93]. Entretanto, o cruzamento em um ponto, por preservar muitos esquemas, é indicado para grandes populações, uma vez que a variabilidade genética é elevada. Um cruzamento com um número maior de pontos dificulta a convergência do algoritmo. Para populações reduzidas, usa-se o cruzamento uniforme para garantir a diversidade genética e abranger todo o espaço de soluções.

Embora o cruzamento aumente a diversidade genética da população, destrói os blocos de construção. Por causa disso, a probabilidade de ocorrência de cruzamento não pode ser pequena, pois acarreta a convergência prematura, e também não pode ser muito grande para que não haja destruição dos blocos de

construção e o AG encontre soluções de melhor qualidade. Desta forma a probabilidade de cruzamento adotada varia entre 60% e 90% [Souz05].

Mutação:

A mutação são alterações aleatórias que ocorrem nos genes de um cromossomo. No AG a mutação é definida como mudanças de valores em algumas posições do cromossomo. A mutação ocorre para resgatar materiais genéticos perdidos durante o processo evolutivo e deve ocorrer com freqüência menor que o cruzamento. Assim a probabilidade de ocorrência de mutação escolhida varia entre 0,1% e 5% [Souz05].

Elitismo:

Consiste em não operar geneticamente o cromossomo de maior aptidão da geração corrente, o qual é copiado para a geração seguinte. Logo, a próxima geração do AG conterá indivíduos da geração anterior. O AG com elitismo tem apresentado melhor desempenho do que o AG sem elitismo.

Modelagem:

No problema de alocação ótima de medidores via AGs, cada vetor-solução representa um plano de medição, ou seja, um conjunto de medidores proposto como solução para o problema. Logo, cada plano de medição proposto é representado através de um vetor em que cada posição está associada a um tipo de medidor e sua respectiva localização na rede. A dimensão do vetor corresponde ao número máximo de medidores que podem ser instalados. Os elementos do vetor 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 visto na Figura 5.14. O custo associado a cada plano de medição

proposto é obtido somando-se os custos individuais dos medidores presentes no vetor e os custos das UTRs necessárias para a instalação de tais medidores.

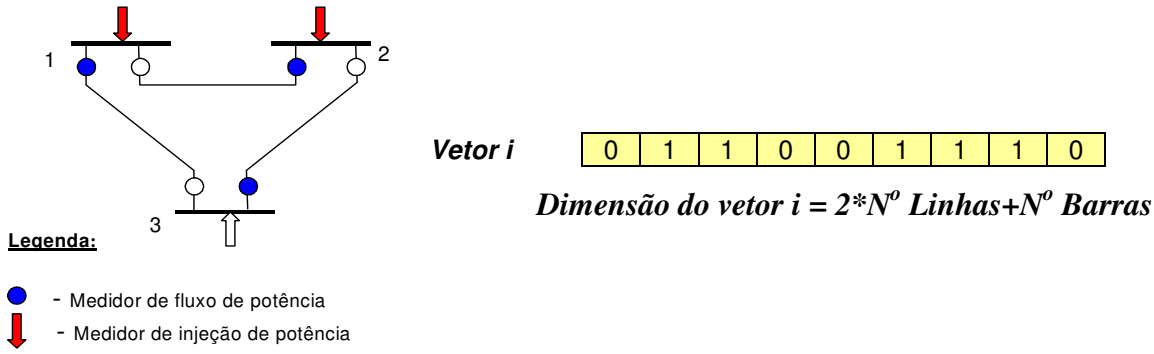

Figura 5.14- Codificação da solução para AG

Na metodologia aqui apresentada, a heurística construtiva proposta é utilizada em conjunto com o AG apenas para geração da população inicial. Daí em diante as operações genéticas (seleção, cruzamento, mutação e elitismo) são empregadas de modo a guiar o processo evolutivo na busca pela solução ótima.

5.3.2 GRASP

O procedimento GRASP aplicado ao problema de alocação ótima de pontos de medição é apresentado a seguir. Tal procedimento tem como parâmetros a lista de candidatos LC, que contém barras do sistema ordenadas de forma decrescente (em função do número de ramos a elas associados), o número máximo de iterações que serão realizadas, uma semente para o fator aleatório e a variável α, que é usada para montar a lista restrita de candidatos LRC. Executa-se a fase de construção, a busca local e o procedimento que armazena a melhor solução encontrada até o momento. Ao final do processo iterativo retorna-se com a melhor solução obtida. O algoritmo tem os seguintes passos:

1. Definir o número máximo de iterações, a lista LC e a variável α;
2. Se o número máximo de iterações não foi atingido, ir para o passo 3. Senão fim;

3. Se a lista LC estiver vazia, ir ao passo 7. Senão, formar a lista restrita de candidatos LRC, utilizando o parâmetro α;
4. Selecionar aleatoriamente uma barra em LRC;
5. Para a barra selecionada no passo 4, executar os passos (iii) a (vi) da heurística construtiva probabilística proposta na seção 5.2.3;
6. Voltar ao passo 3;
7. Realizar uma busca local para remover medidas em excesso, onde a função de avaliação é a equação (4.9);
8. Atualizar a melhor solução até então encontrada e retornar ao passo 2;

Note que o procedimento GRASP descrito implementa diversas vezes a heurística construtiva da seção 5.2.3. Porém, neste caso, a escolha da barra selecionada para alocação de UTR é feita de forma probabilística, utilizando-se a LRC. A variável α foi definida após testes, sendo seu valor apresentado no Capítulo 6.

Na Figura 5.15, é descrito o pseudocódigo do Algoritmo GRASP proposto.

```
Procedimento GRASP()
Definir: Máximo Iterações, LC, Semente e α
Para i = 1 até Máximo Iterações faça
        Enquanto (LC!=0)
                Procedimento Seleciona (Semente, α, Barras da LC)
                Procedimento Construtivo (Barra Selecionada)
        Fim Enquanto
        Procedimento da Busca Local (Dimensão do Vetor, Solução);
        Atualiza (Melhor Solução);
Fim Para
Fim GRASP.
```

Figura 5.15 – Algoritmo GRASP proposto

Na fase de busca local, que parte da solução criada pelo algoritmo construtivo, procede-se à fase de refinamento da solução. Utilizou-se um algoritmo de remoção de medidas como visto na Figura 5.16. Neste algoritmo, a melhoria do plano de medição é buscada pela remoção de medidores em excesso.

```
Procedimento Busca Local (Dimensão do Vetor, Solução)
Para m = 1 até Dimensão do Vetor
      Solução [m]= 1
Fim Para
Para m = 1 até Dimensão do Vetor
        Remove Medida (Solução [m])
        Se (Resultado < Resultado Anterior) então
                Resultado Anterior = Resultado
                Melhor Solução [m ]= Solução [m ]
        Senão
                Adiciona Medida Removida (Solução [m])
        Fim Se
Fim Para
Fim Procedimento Busca Local
```

Figura 5.16– Busca local (GRASP)

A codificação da solução para a aplicação do GRASP é a mesma utilizada para o algoritmo AG.

5.3.3 ACO

A metodologia utilizando ACO é composta por duas etapas. Na primeira etapa, o ACO emprega o algoritmo construtivo, buscando obter soluções com um menor número possível de UTRs. Na segunda etapa, faz-se uma busca local para efetuar um refinamento de modo a se obter um número mínimo de medidores na solução proposta.

No ACO, um conjunto de soluções é gerado a cada iteração, utilizando-se a heurística construtiva probabilística da Seção 5.2.3. É importante observar que a heurística construtiva probabilística tem uma característica não determinística, em função da roleta empregada no passo (iv), a qual permite que a escolha de barras onde não serão alocadas UTRs seja feita de forma probabilística. Porém, de acordo com o passo (ii), a escolha da primeira barra para alocação de UTR é feita de forma determinística, sendo sempre escolhida aquela que apresenta o maior número de conexões. Isto tende a dificultar a exploração do espaço de soluções e a obtenção de planos de medição de boa qualidade. Dessa maneira, o passo (ii) da heurística construtiva apresentada na Seção 5.2.3 é alterado e a geração de cada solução proposta se inicia também com o emprego de uma roleta, em que cada cavidade representa uma barra do sistema, sendo a área de cada cavidade proporcional à quantidade de feromônio e o número de conexões de cada barra. A probabilidade de seleção é definida como:

$$p_i(t) = \frac{[\tau_i(t)]^{\alpha} [\varphi_i \eta_i]^{\beta}}{\sum_{j=1}^{NBarras} [\tau_j(t)]^{\alpha} [\varphi_i \eta_j]^{\beta}} \tag{5.4}$$

Sendo:

$\tau_i(t)$: feromônio contido na barra i;

φ_i: informação heurística (número de conexões da barra i);

η_i: informação heurística (permissão para alocar UTR na barra i);

α: sensibilidade à trilha de feromônio;

β: sensibilidade às informações heurísticas;

O algoritmo construtivo é empregado até que um plano de medição seja gerado. Empregando este procedimento, diferentes soluções são geradas a cada iteração do processo de otimização via ACO. Ao final da primeira iteração, a melhor solução obtida é declarada a solução atual e a quantidade de feromônio em cada barra onde é proposta alocação de UTR é atualizada. Isto possibilita que na próxima iteração essas barras tenham maior probabilidade de serem escolhidas na roleta. Em cada iteração subseqüente, a melhor solução obtida é comparada com a solução atual (melhor solução obtida nas iterações anteriores) e caso seja melhor

passará a ser a nova solução atual. Ao fim de cada iteração a quantidade de feromônio é atualizada. Cada solução é avaliada segundo os objetivos propostos, sendo utilizada a função de aptidão (4.9), conforme descrito na Seção 4.7.

O algoritmo proposto consiste dos seguintes passos:

(i) Definir o número máximo de iterações e o número de formigas ns (número de soluções propostas por iteração). Fazer a quantidade de feromônios em cada barra igual a 1. Inicializar o contador de iterações;

(ii) Se o número máximo de iterações é atingido, o algoritmo é encerrado e a solução atual é a solução do problema. Caso contrário, ir para o passo (iii);

(iii) Gerar ns soluções utilizando a heurística construtiva probabilística da Seção 5.2.3 (mas considerando uma roleta no passo (ii) para a escolha da barra i onde será instalada uma UTR) e avaliar cada solução utilizando a função de aptidão (4.9), de acordo com os objetivos desejados;

(iv) Atualizar a solução do problema. Na primeira iteração, escolher a melhor solução obtida no passo (iii) como a solução atual. Nas demais iterações, a melhor solução avaliada no passo (iii) é comparada com a solução atual e, caso seja superior, passará a ser a nova solução atual.

(v) A quantidade de feromônio é atualizada, aumentando-se segundo (5.5) a quantidade previamente existente em cada barra onde, na solução atual, é proposta alocação de UTR;

(vi) Incrementar o número de iterações e voltar ao passo (ii).

Após a última iteração do algoritmo ACO é obtida uma solução com um número reduzido de UTRs e sobre esta solução realiza-se uma busca local para o refinamento das medidas não necessárias ao atendimento dos requisitos de desempenho considerados. Ao longo do processo iterativo, a quantidade de feromônio é aumentada para barras que são escolhidas para alocação de UTR, o que corresponde a incrementar artificialmente o número de conexões a ela associadas. Assim, aumentam as chances destas barras participarem da solução nas iterações subseqüentes. A atualização do feromônio da barra *i* é feita segundo a expressão 5.5.

$$\tau_i(t+1) = (1-\rho)\tau_i(t) + \Delta\tau_i(t) \tag{5.5}$$

Onde:

ρ : evaporação da trilha de feromônio;

$\Delta\tau_i(t)$: feromônio depositado pela formiga na barra i;

No segundo termo de (5.5), tem-se $\Delta\tau_i$ (t) sempre igual a uma unidade. O primeiro termo desta equação é responsável pela evaporação do feromônio.

Na estratégia adotada neste trabalho, em um primeiro estágio o vetor solução tem dimensão igual ao número de barras onde se pode alocar UTRs, sendo o problema tratado pelo algoritmo ACO como aquele de alocação ótima de UTRs (e todos os respectivos medidores associados), cujo objetivo é minimizar o número de UTRs alocadas. Em um segundo estágio, o vetor solução tem dimensão igual ao número total de medidas inicialmente alocadas e um algoritmo de busca local é empregado para refinar a solução obtida pelo ACO, minimizando o número total de medidas, mas preservando o atendimento aos requisitos estabelecidos.

Na fase de busca local, procede-se à fase de refinamento da solução. Utilizou-se um algoritmo de remoção de medidas. Neste algoritmo, a melhoria do plano de medição é buscada pela remoção de medidores em excesso, um de cada vez.

Na Figura 5.17, é descrito o pseudocódigo do Algoritmo ACO proposto.

```
Procedimento ACO ()
Ler DadosProblema()
Cria MatrizConexoes()
Cria MatrizInfo()
Inicializa Parâmetros()
Para i = 1 até Máximo Iterações faça
        Para j=1 até número máximo de Barras faça
                Enquanto (barraObs!=Barras)
                        Procedimento Roleta (Semente, Barra Selecionada)
                        Procedimento Construtivo (Barra Selecionada)
                Fim Enquanto
        Fim Para
        Avalia Soluções ( )
        Atualizar Feromônios ( )
Fim Para
Fim Procedimento ACO ()
Procedimento Busca Local (Melhor Solução)
```

Figura 5.17 – Algoritmo ACO proposto

Na fase de busca local executa-se o refinamento do excesso de medidas obtidas na solução fornecida pelo ACO, conforme descrito na Figura 5.18.

```
Procedimento Busca Local (Dimensão do Vetor)
Para m = 1 até Dimensão do Vetor
      Solução [m]= 1
Fim Para
Para m = 1 até Dimensão do Vetor
        Remove Medida (Solução [m])
        Se (Resultado < Resultado Anterior) então
                Resultado Anterior = Resultado
                Melhor Solução [m ]= Solução [m ]
        Senão
                Adiciona Medida Removida (Solução [m])
        Fim Se
Fim Para
Fim Procedimento Busca Local
```

Figura 5.18 – Busca local (ACO)

5.4 Decomposição do Problema

A idéia básica aqui é, em uma primeira etapa, dividir o problema em subproblemas menores, para os quais é aplicada a metodologia proposta. Em uma segunda etapa, as soluções obtidas para os subproblemas são coordenadas de modo a se obter uma solução final. A grande vantagem neste caso é que, na primeira etapa, os subproblemas são resolvidos de forma totalmente independente. Para cada subproblema o processo de otimização se dá em um espaço de busca reduzido, podendo ser mais eficaz na busca pela solução ótima e mais eficiente computacionalmente.

A decomposição usada neste trabalho o sistema é dividido em subsistemas independentes e para cada um desses subsistemas é executado um dos algoritmos apresentados anteriormente. Após obtidas as soluções para cada subsistema é necessário verificar se, para o sistema como um todo, o conjunto de UTRs alocadas satisfaz os requisitos de redundância estabelecidos. Para tal, é novamente

considerado um único problema, onde é verificada a necessidade de alocação de uma ou mais UTRs para satisfazer todos os requisitos de desempenho. A necessidade de realizar tal refinamento se deve ao fato de que, na decomposição do problema, são desconsideradas as interligações entre os subsistemas. Isto leva a perda de informação relevante para decidir, durante a solução de cada subproblema, sobre a necessidade e/ou conveniência de instalação de UTRs nas barras de fronteira ou em barras vizinhas a elas. Note que as barras de fronteira de um subsistema serão aquelas barras que possuem interligação direta com barras de outro subsistema. Em geral, espera-se que na etapa de refinamento eventuais acréscimos de UTRs ocorram em barras na fronteira entre áreas ou em sua vizinhança.

O algoritmo proposto para a decomposição e solução do problema consiste nos seguintes passos:

1. Dividir o sistema original em N subsistemas removendo as conexões de fronteira;
2. Resolver os N subsistemas independentes utilizando uma das metaheurísticas propostas em conjunto com a heurística construtiva;
3. Armazenar as UTRs alocadas durante a resolução dos subsistemas;
4. Restaurar o sistema original a partir das conexões removidas;
5. Usar a heurística construtiva para verificar a necessidade de alocação de UTR nas barras de fronteira;
6. Remover o excesso de medidas alocadas em cada UTR, empregando uma busca local.

É importante ressaltar que, ao se utilizar a heurística construtiva no passo 5, a lista de barras candidatas conterá apenas as barras de fronteira.

A Figura 5.21 mostra por exemplo, o sistema IEEE-118 divido em três subsistemas.

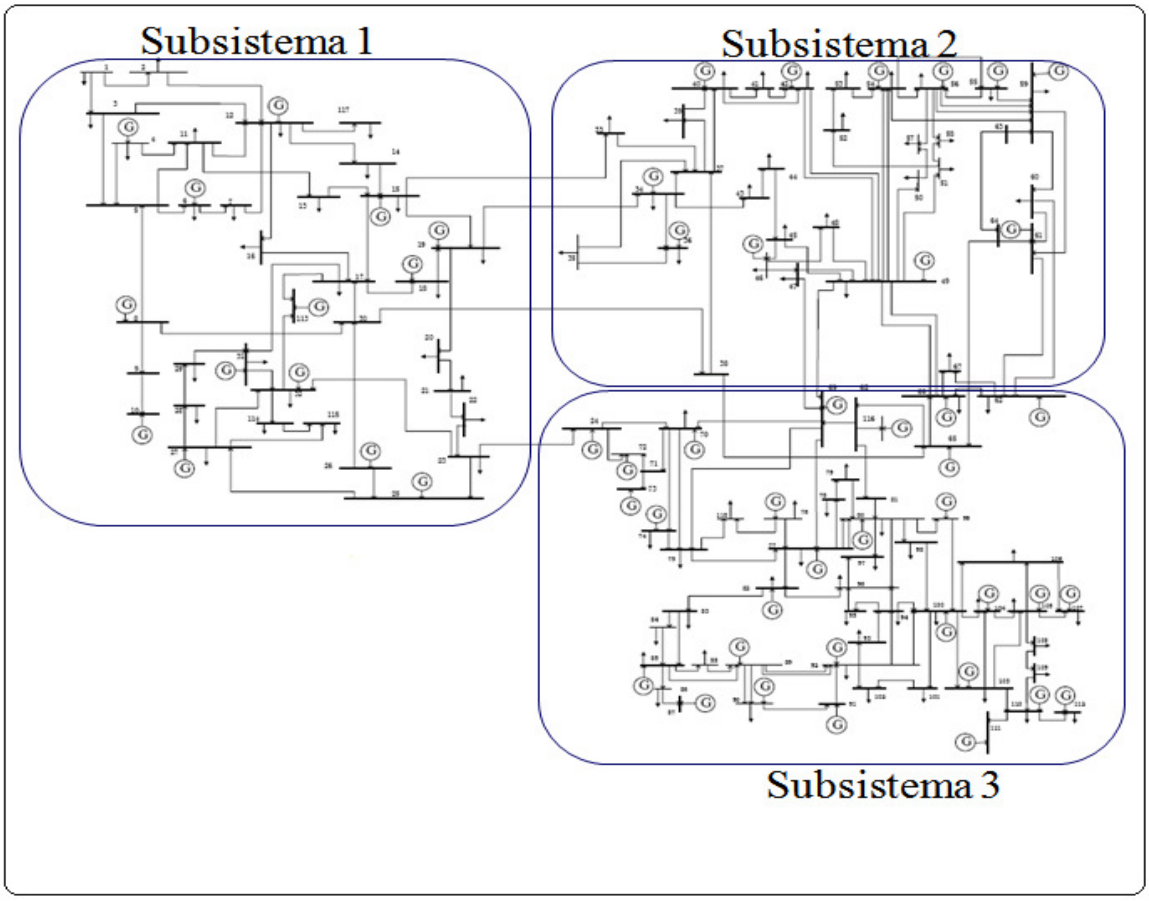

Figura 5.19- Sistema IEEE-118 dividido em três subsistemas

5.5 Conclusões

A metodologia proposta foi desenvolvida baseada na aplicação de metaheurísticas em conjunto com uma heurística construtiva de forma a obter a alocação otimizada de medidores para a EE. Uma estratégia de decomposição do sistema foi apresentada e será testada de forma a analisar potenciais benefícios no tempo computacional para a solução do problema e o efeito sobre a qualidade das soluções obtidas. No próximo capítulo serão descritas as simulações e testes relativos ao planejamento de sistemas de medição para EE, empregando as metaheurísticas e metodologia anteriormente apresentadas.

CAPÍTULO 6

TESTES E RESULTADOS

6.1 Introdução

Neste capítulo, serão apresentados resultados de testes realizados com a metodologia proposta para o planejamento de sistemas de medição.

Para avaliar o desempenho desta metodologia, considerando as diferentes metaheurísticas investigadas, foram realizados testes utilizados os sistemas IEEE 14, 30, 118 e 300 barras, além de um sistema de 61 barras que representa parte de um sistema elétrico brasileiro [Souz05]. Para cada sistema foram avaliados os requisitos de observabilidade, ausência de medidas críticas e ausência de conjuntos críticos. A possibilidade de se ter diferentes configurações topológicas e perda de UTRs também foi considerada nos estudos de planejamento realizados. Foram ainda realizados testes com o intuito de avaliar o impacto da decomposição da rede nos resultados de planejamento. Da mesma maneira, buscou-se avaliar os benefícios de redução de custo para situações nos quais o atendimento a certos requisitos de desempenho poderia ser relaxado em áreas da rede consideradas não prioritárias.

Foram explorados diferentes valores para os fatores de penalidade presentes na função aptidão (associados às restrições do problema). Os resultados apresentados neste capítulo foram obtidos utilizando as penalidades listadas a seguir, as quais se mostraram adequadas para garantir a eficiência e eficácia do processo de busca:

- Observabilidade: Pobs = 10^6;
- Ausência de medidas críticas: Pmed = 10^5;
- Ausência de Conjuntos críticos: Pconj = 10^3;

Em relação à avaliação de custos relativos ao sistema de medição, os seguintes valores, expressos em unidades monetárias, foram adotados [Souz05]: $100,00 para cada UTR instalada e $4,50 para cada medidor. Agrega-se o custo de uma UTR em pontos da rede onde a instalação de ao menos um medidor for recomendada na solução ótima.

De forma a permitir comparações de desempenho entre as metaheurísticas testadas, o critério de parada empregado para a interrupção do processo de busca foi o tempo computacional, ou seja, busca-se avaliar a melhor solução encontrada em um determinado tempo, o qual é pré-fixado. Tal tempo é descrito nas tabelas de resultados apresentadas.

Nos testes realizados, cada metaheurística foi executada quatro vezes, utilizando-se em cada execução uma semente aleatória diferente. As tabelas de resultados apresentam informações referentes ao menor custo obtido para o sistema de medição, assim como o custo médio, o qual corresponde à média aritmética dos custos obtidos em cada execução das metaheurísticas. São ainda apresentadas outras informações sobre os sistemas de medição propostos, tais como o número de UTRs e de medidores presentes em cada um deles.

Para o AG, os parâmetros de controle foram variados conforme descrito abaixo:

- Tipo de cruzamento: um ponto ou uniforme;
- Probabilidade de mutação: 0,1 a 5%;
- Tamanho da população: 50 e 100 cromossomos;
- Método de seleção: torneio ou roleta;
- Elitismo: sempre considerado.

Para o GRASP, empregou-se o parâmetro α definido como:

$$\alpha = \frac{3}{\text{Número de Barras do Sistema}} \tag{6.1}$$

Este valor permaneceu constante durante todo o processo iterativo.

Com relação ao ACO, os parâmetros empregados foram:

- Sensibilidade à trilha de feromônio: α=1,0;
- Sensibilidade às informações heurísticas: β=2,0;
- Evaporação da trilha de feromônio: ρ=0,8;
- Feromônio depositado pela formiga na barra i: $\Delta\tau$=1;

Estes valores foram definidos a partir de testes preliminares. Vale ressaltar que os resultados apresentados neste capítulo foram obtidos através da execução de códigos computacionais desenvolvidos utilizando a linguagem de programação Fortran.

Sempre que possível os resultados são comparados com outros da literatura, tais como aqueles encontrados em [Cout05], [Souz05], [Cose06], [Vigl08] e [Vigl09].

Em todos os testes realizados utilizou-se um microcomputador INTEL CORE 2 Duo, 1.88 GHz e 1GB de memória RAM, com o sistema operacional Windows XP.

6.2 Dados dos Sistemas Utilizados

Sistema IEEE-14 barras

A configuração da rede do sistema IEEE 14 barras e 20 ramos é apresentada na Figura 6.1.

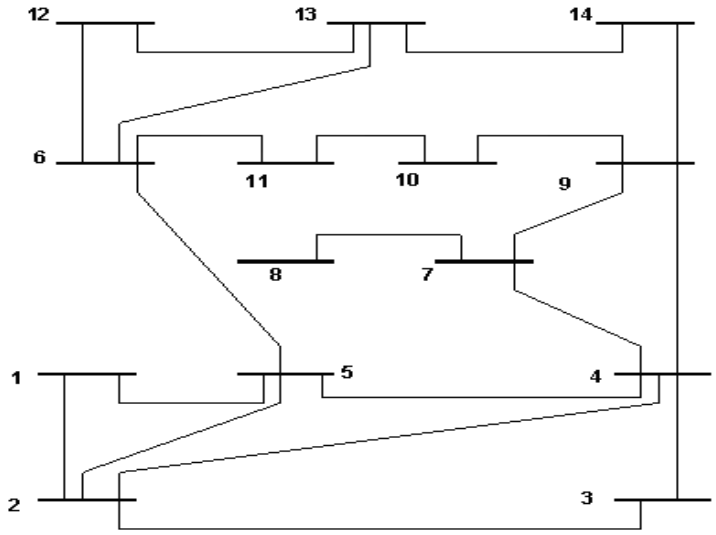

Figura 6.1 - Sistema IEEE de 14 barras e 20 ramos

Para simulações considerando diferentes áreas de interesse, o sistema foi arbitrariamente dividido em duas áreas:

Área 1: barras 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8.
Área 2: barras 9, 10, 11, 12, 13, 14.

Para simulações com diferentes topologias da rede foram definidos 20 cenários [Souz05], mostrados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1- Alterações na configuração (IEEE-14)

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

Sistema IEEE-30 barras

A rede do sistema IEEE 30 barras e 41 ramos é mostrada na Figura 6. 2.

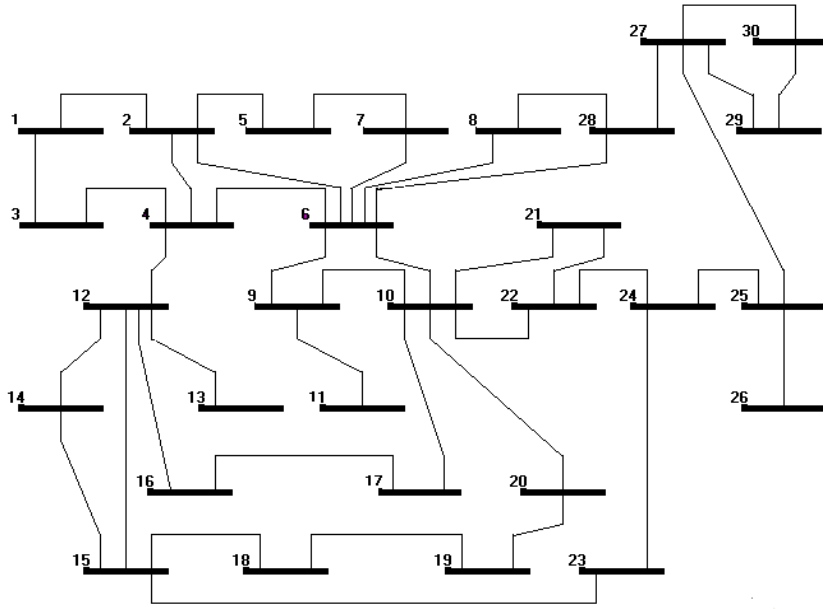

Figura 6.2 - Sistema IEEE de 30 barras e 41 ramos

Para simulações considerando diferentes áreas de interesse, o sistema foi arbitrariamente dividido em duas áreas:

Área 1: barras 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 27, 28, 29, 30.
Área 2: barras 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26.

Para simulações com diferentes topologias da rede foram definidos 6 cenários, mostrados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 - Alterações na configuração (IEEE-30)

N° Cenário	Ramo fora de operação
1	--
2	2 – 4
3	2 – 6
4	12 – 15
5	21 – 22
6	23 – 24

Sistema Real de 61 barras

A terceira simulação foi feita com um sistema real 61 barras [Souz05] que corresponde a parte da rede da empresa Eletropaulo, representado na Figura 6.3.

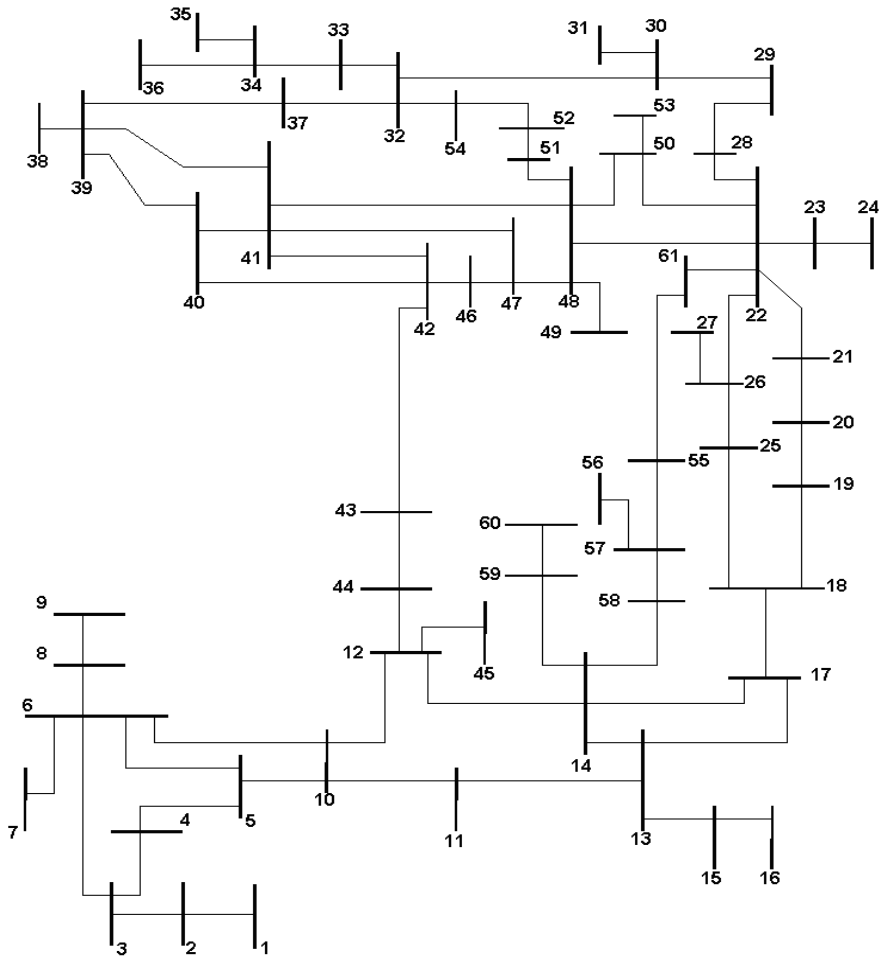

Figura 6.3 - Sistema Real de 61 Barras e 74 ramos

Para simulações considerando diferentes áreas de interesse o sistema foi arbitrariamente dividido em duas áreas:

Área 1: barras 1, 2, 3, 4, 5, 10, 11, 13, 15, 16, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 50 , 51, 52, 53, 54.

Área 2: barras 6, 7, 8, 9, 12, 14, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 22, 24, 25, 26, 27, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61.

Para simulações considerando diferentes topologias da rede foram definidos 7 cenários arbitrários, mostrados na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 - Alterações na configuração (SB-61)

N° Cenário	Ramo fora de operação
1	--
2	4 – 5
3	5 – 6
4	25 – 26
5	40 – 41
6	40 – 42
7	46 – 47

Sistema IEEE-118 barras

A rede do sistema IEEE-118 é mostrada na Figura 6.4.

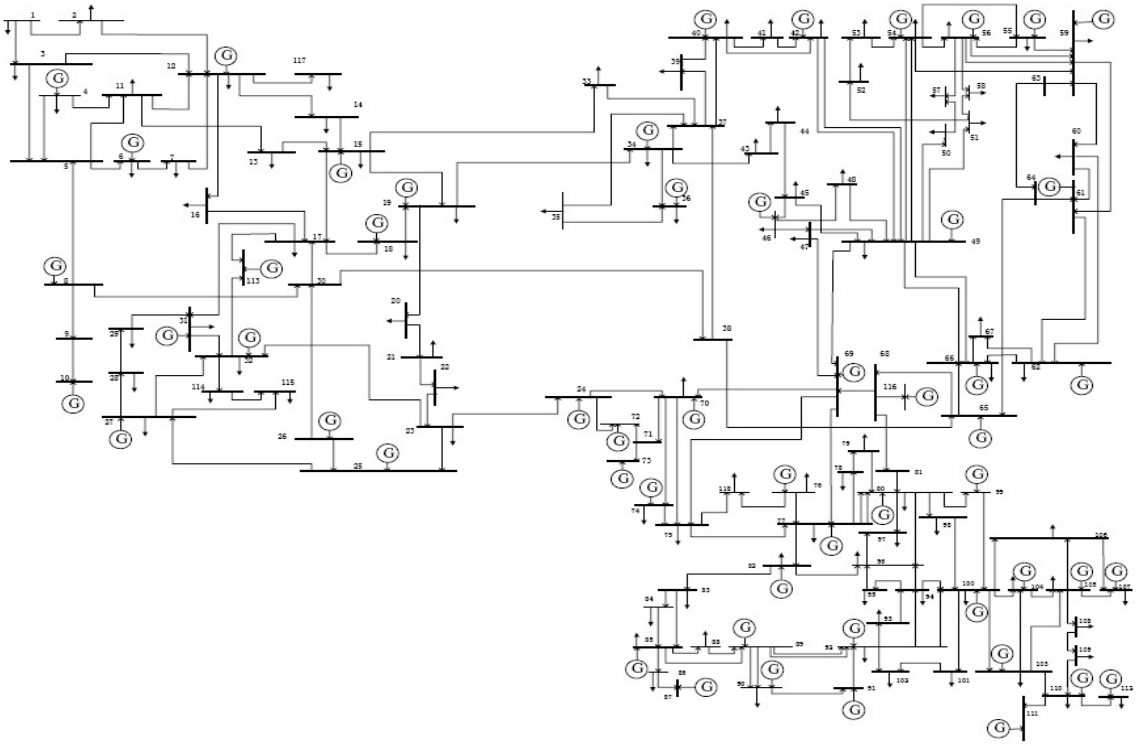

Figura 6.4 - Sistema IEEE de 118 barras e 179 ramos

Para simulações considerando diferentes áreas de interesse o sistema foi dividido em três áreas:

Área 1: barras 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: barras 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: barras 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.

Para simulações considerando diferentes topologias da rede foram definidos 9 cenários arbitrários, mostrados na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 - Alterações na configuração (IEEE-118)

N° Cenário	Ramo fora de operação
1	--
2	4 – 5
3	11 – 12
4	17 – 30
5	48 – 49
6	54 – 59
7	56 – 59
8	61 – 62
9	70-74

Sistema IEEE-300 barras

A rede do sistema IEEE-300 é mostrada na Figura 6.5.

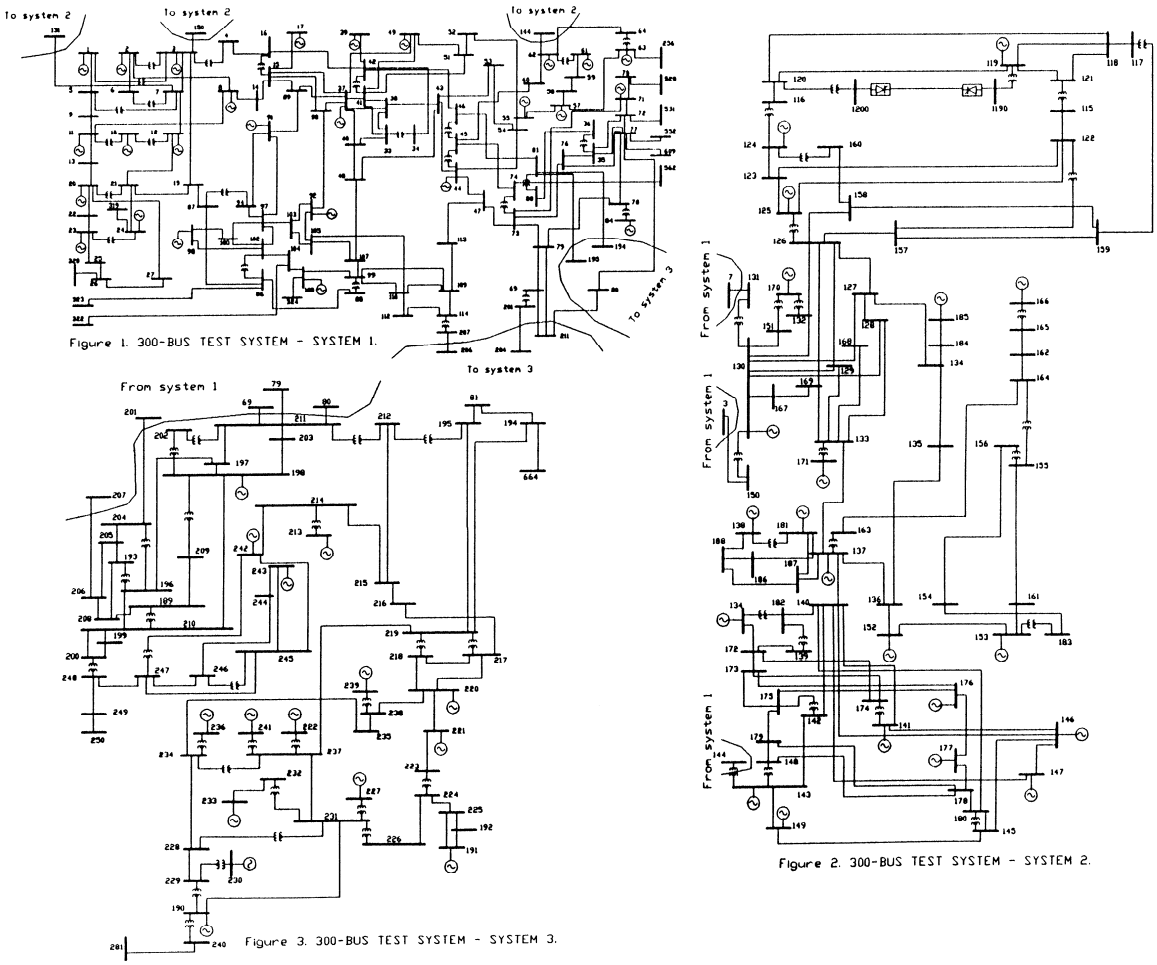

Figura 6.5 - Sistema IEEE de 300 barras e 411 ramos

Testes com este sistema serão realizados de forma a avaliar os potenciais benefícios em utilizar a decomposição da rede durante a solução do problema.

6.3 Testes para os Requisitos de Observabilidade e Confiabilidade

6.3.1 Sistema IEEE-14 barras

a) Observabilidade

Os resultados obtidos na Tabela 6.5 para o requisito observabilidade da rede IEEE 14 mostra que o GRASP e o ACO chegaram ao mesmo custo do sistema de medição em todas as simulações, enquanto o AG+HC não conseguiu chegar ao mesmo custo em todos os casos. Deve-se ressaltar que esta solução é ótima porque todas as medidas do sistema de medição são medidas críticas e o número de medidas é igual a 13, que é o número mínimo de medidas para que o sistema seja observável. O resultado obtido é o mesmo de [Souz05]. O resultado obtido pelo ACO é ilustrado na Figura 6.6.

Tabela 6.5 - Resultados: requisito observabilidade (IEEE-14)

Meta-heurísticas	N° de Medidores	N° de UTRs	Custo ($)	Custo Médio ($)	Tempo (Seg)
AG[Souz05]	13	4	458,5	--	--
AG+HC	13	4	458,5	483,5	10
GRASP	13	4	458,5	458,5	10
ACO	13	4	458,5	458,5	10

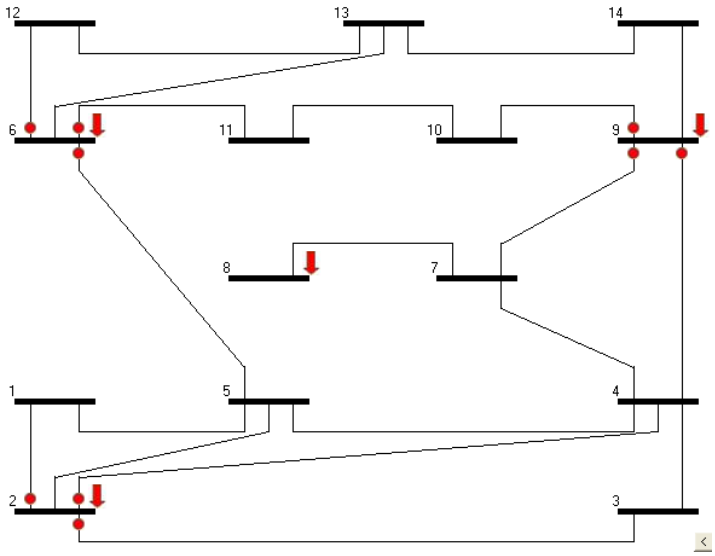

Figura 6.6 - Requisito de observabilidade (IEEE-14)

b) Ausência de medidas críticas

A Tabela 6.6 mostra que, para o requisito de ausência de medidas críticas, o algoritmo GRASP obteve menor custo, seguido pelo ACO e AG+HC. Os três algoritmos apresentados aqui obtiveram melhor resultado do que o AG apresentado em [Souz05]. O resultado obtido pelo GRASP é ilustrado na Figura 6.7.

Tabela 6.6 - Resultados: requisito de ausência de medidas críticas (IEEE-14)

Meta-heurísticas	N° de Medidores	N° de UTRs	Custo ($)	Custo Médio ($)	Tempo (Seg)
AG[Souz05]	14	5	563,0	--	--
AG+HC	16	4	476,50	499,3	15
GRASP	16	4	472,0	472,5	15
ACO	17	4	476,5	476,5	15

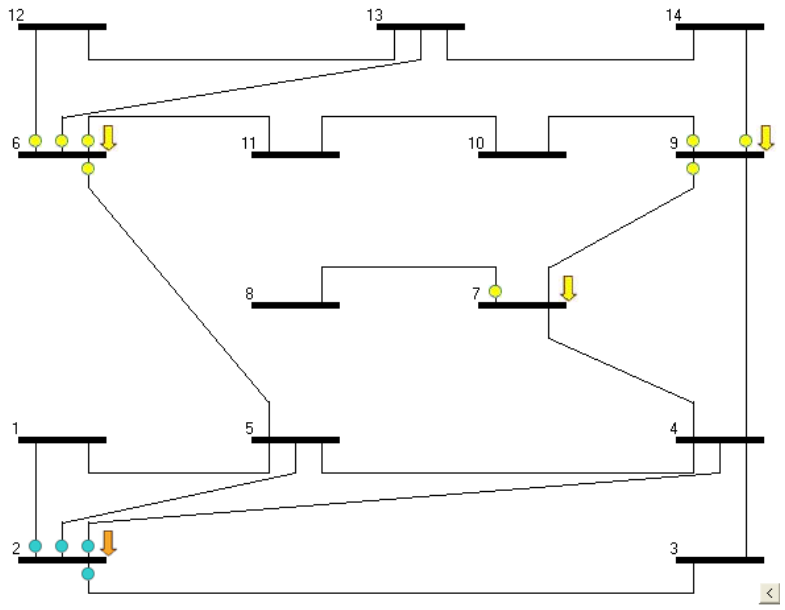

Figura 6.7 - Requisito de ausência de medidas críticas (IEEE-14)

c) Ausência de conjuntos críticos

A Tabela 6.7 mostra que, para o requisito de ausência de conjunto críticos, o algoritmo apresentado em [Souz05] obteve menor custo. O resultado obtido pelo GRASP é ilustrado na Figura 6.8.

Tabela 6.7 - Resultados: requisito de ausência de conjuntos críticos (IEEE-14)

Meta-heurísticas	N° de Medidores	N° de UTRs	Custo ($)	Custo Médio ($)	Tempo (Seg)
AG[Souz05]	14	7	763,0	--	--
AERS[Vigl09]	23	7	803,5	--	--
AG+HC	16	9	972,0	985,5	18
GRASP	16	9	972,0	972,0	18
ACO	21	8	894,5	894,5	18

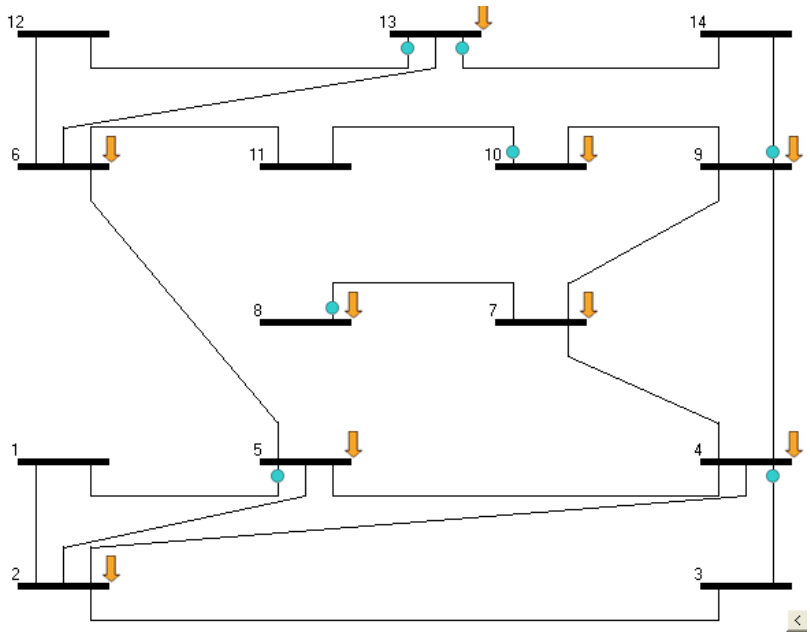

Figura 6.8 - Requisito de ausência de conjuntos críticos (IEEE-14)

6.3.2 Sistema IEEE-30 barras

a) Observabilidade

A Tabela 6.8 mostra que, para o requisito de observabilidade, o ACO, GRASP e o algoritmo proposto em [Cout05] obtiveram o mesmo custo.

Tabela 6.8 - Resultados: requisito de observabilidade (IEEE-30)

Meta-heurísticas	N° de Medidores	N° de UTRs	Custo ($)	Custo Médio ($)	Tempo (Seg)
AG[Cout05]	29	10	1130,5	--	--
AG+HC	38	10	1171,0	1214,0	20
GRASP	29	10	1130,5	1133,5	20
ACO	29	10	1130,5	1132,5	20

b) Ausência de medidas críticas

A Tabela 6.9 mostra que, para o requisito de ausência de medidas críticas, o GRASP obteve o menor custo, seguido pelo ACO. O custo obtido pelo GRASP e menor do que o obtido em [Cout05].

Tabela 6.9 - Resultados: requisito de ausência de medidas críticas (IEEE-30)

Meta-heurísticas	N° de Medidores	N° de UTRs	Custo ($)	Custo Médio ($)	Tempo (Seg)
AG[Cout05]	37	10	1166,5	--	--
AG+HC	42	10	1189,0	1782,3	100
GRASP	32	10	1144,5	1146,3	100
ACO	37	10	1166,5	1167,0	100

.

c) Ausência de conjuntos críticos

Os resultados da Tabela 6.10, para o requisito de ausência de conjuntos críticos, mostram que o ACO obteve o sistema de medição de menor custo.

Tabela 6.10 - Resultados: requisito de ausência de conjuntos críticos (IEEE-30)

Meta-heurísticas	N° de Medidores	N° de UTRs	Custo ($)	Custo Médio ($)	Tempo (Seg)
AG[Cout05]	45	18	2002,5	--	--
AG+HC	55	19	2147,5	2277,3	100
GRASP	37	19	2066,5	2068,8	100
ACO	43	18	1993,5	1995,8	100

6.3.3 Sistema brasileiro de 61 barras

a) Observabilidade

A Tabela 6.11 mostra que, para o requisito de observabilidade, o GRASP e ACO obtiveram o menor custo, e que os três algoritmos aqui apresentados obtiveram melhor resultado do que o obtido em [Souz05].

Tabela 6.11 - Resultados: requisito de observabilidade (SB-61)

Meta-heurísticas	N° de Medidores	N° de UTRs	Custo ($)	Custo Médio ($)	Tempo (Seg)
AG[Souz05]	68	30	3306,0	--	--
AG+HC	67	29	3201,5	3254,0	250
GRASP	60	23	2570,5	2597,5	250
ACO	60	23	2570,5	2570,5	250

b) Ausência de medidas críticas

A Tabela 6.12 mostra que, para o requisito de ausência de medidas críticas, o GRASP obteve o menor custo, seguido pelo ACO. Os três algoritmos aqui apresentados obtiveram melhor resultado do que o AG em [Souz05].

Tabela 6.12 - Resultados: requisito de ausência de medidas críticas (SB-61)

Meta-heurísticas	N° de Medidores	N° de UTRs	Custo ($)	Custo Médio ($)	Tempo (Seg)
AG[Souz05]	84	35	3878,0	--	--
AG+HC	94	29	3323,0	3423,0	800
GRASP	66	23	2597,5	2597,5	800
ACO	80	23	2660,5	2660,5	800

c) Ausência de conjuntos críticos

Os resultados da Tabela 6.13, para o requisito de ausência de conjuntos críticos, mostram que o GRASP obteve o menor custo do sistema de medição e o ACO obteve o segundo menor custo.

Tabela 6.13 - Resultados: requisito de ausência de conjuntos críticos (SB-61)

Meta-heurísticas	N° de Medidores	N° de UTRs	Custo ($)	Custo Médio ($)	Tempo (Seg)
AG[Souz05]	107	49	5381,5	--	--
AG+HC	132	55	6094,0	6107,5	800
GRASP	93	45	4918,5	4927,5	800
ACO	95	45	4927,5	4931,5	800

Com base nos resultados até então obtidos, nota-se que os algoritmos GRASP e ACO apresentam melhor desempenho e maior potencial para a solução do problema. Dessa maneira, serão apresentados daqui em diante apenas os resultados obtidos com estes algoritmos e, sempre que possível, também aqueles relatados na literatura.

6.4 Testes para os Requisitos de Robustez

6.4.1 Sistema IEEE-14 barras

a) Observabilidade (múltiplos cenários topológicos)

Os resultados obtidos na Tabela 6.14 mostram que, para o requisito observabilidade em múltiplos cenários topológicos, o algoritmo ACO obteve menor custo e que os dois algoritmos aqui apresentados obtiveram melhor resultado do que o AG apresentado em [Souz05].

Tabela 6.14 – Resultados: requisito de observabilidade em múltiplos cenários topológicos (IEEE-14)

Meta-heurísticas	N° de Medidores	N° de UTRs	Custo ($)	Custo Médio ($)	Tempo (Seg)
AG[Souz05]	14	8	863,0	--	--
GRASP	13	7	758,5	758,5	20
ACO	14	6	663,0	663,0	20

b) Ausência de medidas críticas (múltiplos cenários topológicos)

Os resultados obtidos na Tabela 6.15 mostram que, para o requisito de ausência de medidas críticas em qualquer dos cenários topológicos de interesse, o algoritmo ACO obteve o menor custo e que os dois algoritmos aqui apresentados

obtiveram melhor resultado do que o obtido em [Souz05]. O resultado obtido pelo ACO é ilustrado na Figura 6.9.

Tabela 6.15 – Resultados: requisito de ausência de medidas críticas em múltiplos cenários topológicos (IEEE-14)

Meta-heurísticas	N° de Medidores	N° de UTRs	Custo ($)	Custo Médio ($)	Tempo (Seg)
AG[Souz05]	20	8	890,0	--	--
GRASP	18	8	881,0	881,0	60
ACO	21	7	794,5	794,5	60

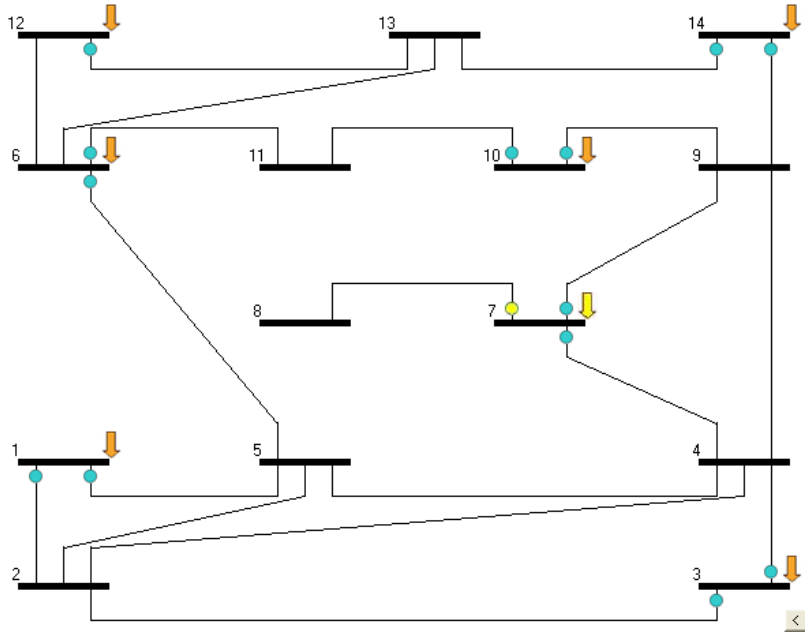

Figura 6.9 - Requisito de ausência de medidas críticas em múltiplos cenários topológicos (IEEE-14)

c) Ausência de conjuntos críticos (múltiplos cenários topológicos)

A Tabela 6.16 mostra que, para o requisito de ausência de conjuntos críticos em todos os cenários topológicos, os algoritmos ACO e GRASP obtiveram o mesmo custo que o AG apresentado em [Souz05] e menor do que o Algoritmo Evolutivo com

Representação Sequencial (AERS) apresentado em [Vigl09]. A Figura 6.10 ilustra o plano de medição obtido.

Tabela 6.16 – Resultados: requisito de ausência de conjuntos críticos em múltiplos cenários topológicos (IEEE-14)

Meta-heurísticas	N° de Medidores	N° de UTRs	Custo ($)	Custo Médio ($)	Tempo (Seg)
AG[Souz05]	27	14	1521,5	--	--
AERS[Vigl09]	36	14	1562,0	--	--
GRASP	27	14	1521,5	1521,5	60
ACO	27	14	1521,5	1521,5	60

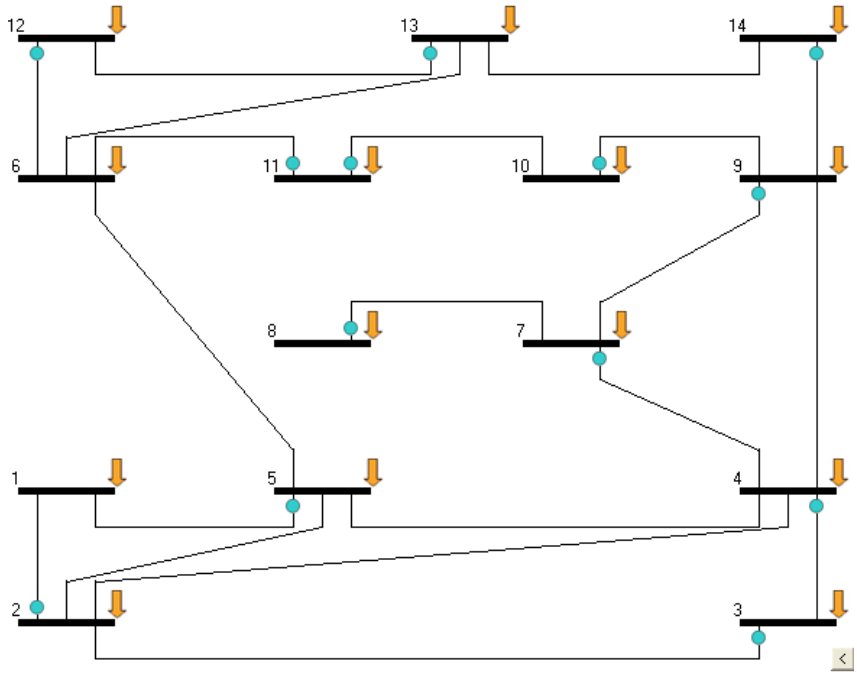

Figura 6.10 - Requisito de ausência de conjuntos críticos em múltiplos cenários topológicos (IEEE-14)

d) Ausência de UTRs críticas

A Tabela 6.17 mostra que, para o requisito de ausência de UTRs críticas o algoritmo ACO obteve menor custo do que o Steady-State Genetic Algorithm

(SSGA) apresentado em [Cose06] e o AERS apresentado em [Vigl09]. O plano de medição obtido com o ACO é apresentado na Figura 6.11.

Tabela 6.17 – Resultados: requisito de ausência de UTRs críticas (IEEE-14)

Meta-heurísticas	N° de Medidores	N° de UTRs	Custo ($)	Custo Médio ($)	Tempo (Seg)
SSGA[Cose06]	17	10	1076,5	--	--
AERS[Vigl09]	23	9	1003,5	--	15
GRASP	23	9	1003,5	1003,5	15
ACO	17	9	976,5	976,5	15

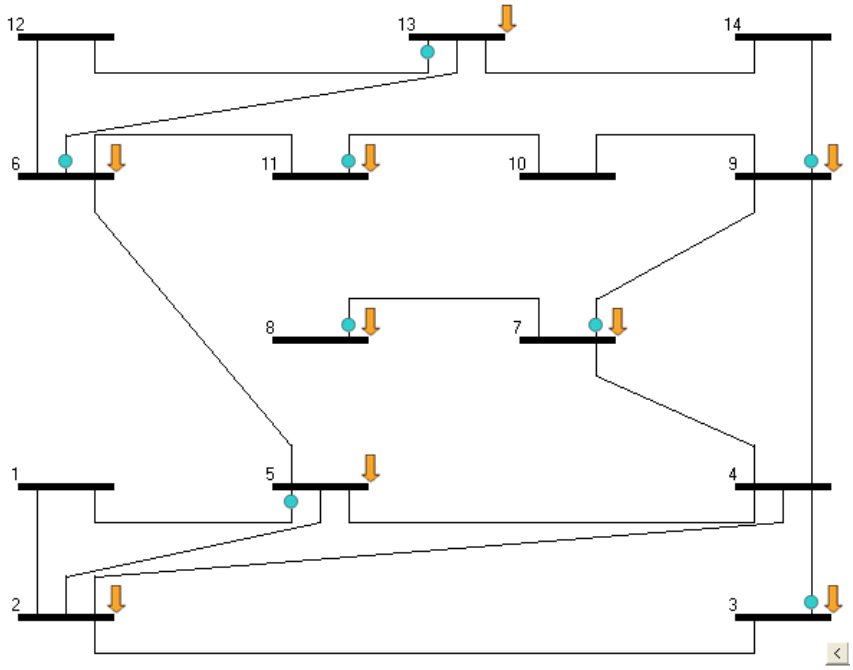

Figura 6.11 - Requisito de ausência de UTRs críticas (IEEE-14)

e) Ausência de conjunto crítico de UTRs

A Tabela 6.18 mostra que, para o requisito de ausência de conjuntos críticos de UTRs, os algoritmos GRASP e ACO obtiveram os mesmos custos. A Figura 6.12 ilustra o plano de medição obtido.

Tabela 6.18 - Resultado: requisito de ausência de conjunto crítico de UTRs (IEEE-14)

Meta-heurísticas	N° de Medidores	N° de UTRs	Custo ($)	Custo Médio ($)	Tempo (Seg)
GRASP	23	9	1003,5	1003,5	60
ACO	23	9	1003,5	1003,5	60

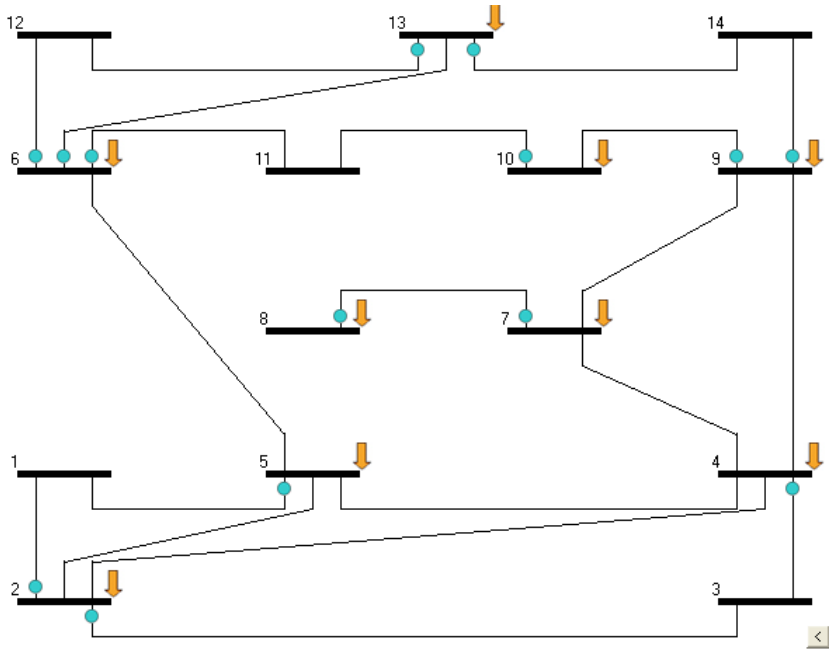

Figura 6.12 - Requisito de ausência de conjunto crítico de UTRs (IEEE-14)

Comparando-se os resultados obtidos nas Tabelas 6.17 e 6.18 é possível perceber que, com pequeno investimento adicional é possível planejar um sistema mais robusto. Apesar dos planos de medição apresentados nas Figuras 6.11 e 6.12 possuíram o mesmo número de UTRs, estas diferem em localização. Além disso, com seis medidas a mais, o plano de medição, da Figura 6.12 não apresentará medidas críticas na perda de qualquer UTR. Foi possível chegar a este ganho de robustez considerando-se este requisito durante o planejamento.

f) Ausência de conjuntos críticos em múltiplos cenários topológicos e ausência de UTRs críticas no cenário base

Neste caso, realiza-se o planejamento considerando concomitantemente o requisito de ausência de conjuntos críticos em qualquer dos cenários topológicos de interesse e o requisito de ausência de UTRs críticas no cenário topológico considerado básico (ou seja, o cenário 1 da Tabela 6.1, onde todos os ramos encontram-se em operação).

A Tabela 6.19 mostra que, para o requisito de ausência de conjuntos críticos com múltiplos cenários topológicos e ausência de UTRs críticas, o algoritmo ACO e GRASP obtiveram o mesmo custo.

Tabela 6.19 – Resultados: requisito de ausência de conjuntos críticos em múltiplos cenários topológicos e ausência de UTRs críticas no cenário base (IEEE-14)

Meta-heurísticas	N° de Medidores	N° de UTRs	Custo ($)	Custo Médio ($)	Tempo (Seg)
GRASP	28	14	1526,0	1526,0	100
ACO	28	14	1526,0	1526,0	100

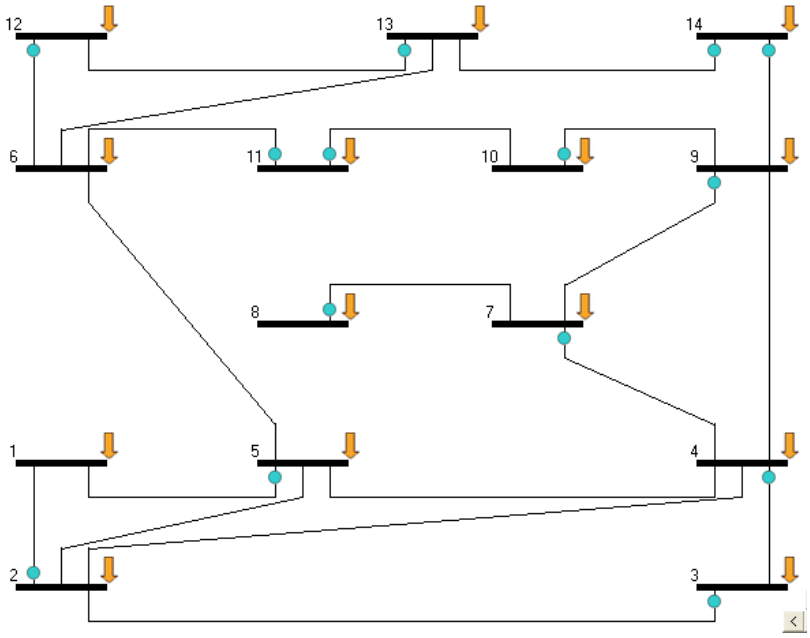

Figura 6.13 - Requisito de ausência de conjuntos críticos em múltiplos cenários topológicos e ausência de UTRs críticas no cenário base (IEEE-14)

Comparando os resultados das Tabelas 6.16 e 6.19 e as Figuras 6.10 e 6.13, nota-se que os mesmo são muito semelhantes, sendo necessário acrescentar apenas mais uma medida para atender os dois requisitos simultaneamente.

6.4.2 Sistema IEEE-30 barras

a) Observabilidade (múltiplos cenários topológicos)

A Tabela 6.20 mostra que, para o requisito de observabilidade em múltiplos cenários topológicos o algoritmo ACO e GRASP obtiveram os mesmos custos.

Comparando-se este resultado com o apresentado na Tabela 6.8, nota-se que é necessário apenas mais uma UTR para que o sistema de medição garanta a observabilidade não apenas para o cenário base como também para mais 5 cenários topológicos de interesse. Convém ressaltar que a localização das UTRs neste caso difere da obtida quando se considerou apenas um cenário topológico.

Tabela 6.20 – Resultados: requisito de observabilidade em múltiplos cenários topológicos (IEEE-30)

Meta-heurísticas	N° de Medidores	N° de UTRs	Custo ($)	Custo Médio ($)	Tempo (Seg)
GRASP	30	11	1235,0	1285,5	110
ACO	30	11	1235,0	1235,0	110

b) Ausência de medidas críticas (múltiplos cenários topológicos)

A Tabela 6.21 mostra que, para o requisito de ausência de medidas críticas em múltiplos cenários topológicos, o algoritmo GRASP obteve menor custo.

Comparando-se este resultado com o apresentado na Tabela 6.9, nota-se que é necessário apenas mais uma UTR para que o sistema de medição garanta ausência de medidas críticas não apenas para o cenário base como também para mais 5 cenários topológicos de interesse. Convém ressaltar que a localização das UTRs neste caso difere da obtida quando se considerou apenas um cenário topológico.

Tabela 6.21 – Resultados: requisito de ausência de medidas críticas em múltiplos cenários topológicos (IEEE-30)

Meta-heurísticas	N° de Medidores	N° de UTRs	Custo ($)	Custo Médio ($)	Tempo (Seg)
GRASP	34	11	1253,0	1255,3	110
ACO	37	11	1266,5	1271,0	110

c) Ausência conjuntos críticos (múltiplos cenários topológicos)

A Tabela 6.22 mostra que, para o requisito de ausência de conjuntos críticos com múltiplos cenários topológicos o algoritmo ACO obteve menor custo.

Comparando-se este resultado com o apresentado na Tabela 6.10, nota-se que é necessário apenas mais uma UTR para que o sistema de medição garanta ausência de conjuntos críticos não apenas para o cenário base como também para mais 5 cenários topológicos de interesse.

Tabela 6.22 – Resultados: requisito de ausência de conjuntos críticos em múltiplos cenários topológicos (IEEE-30)

Meta-heurísticas	N° de Medidores	N° de UTRs	Custo ($)	Custo Médio ($)	Tempo (Seg)
GRASP	40	20	2180,0	2193,0	130
ACO	44	19	2098,0	2110,0	130

d) Ausência de UTRs críticas

A Tabela 6.23 mostra que, para o requisito de ausência de UTRs críticas, o algoritmo ACO obteve menor custo do que o algoritmo SSGA apresentado em [Cose06] e o algoritmo AERS apresentado em [Vigl09].

Tabela 6.23 – Resultados: requisito de ausência de UTRs criticas (IEEE-30)

Meta-heurísticas	N° de Medidores	N° de UTRs	Custo ($)	Custo Médio ($)	Tempo (Seg)
SSGA[Cose06]	40	28	2980,0	--	--
AERS[Vigl09]	53	21	2338,5	--	63
GRASP	51	21	2329,5	2334,0	63
ACO	40	21	2280,0	2282,3	63

e) Ausência de conjunto crítico de UTRs

A Tabela 6.24 mostra que, para o requisito de ausência de conjunto crítico de UTRs, o algoritmo GRASP obteve melhor resultado que o ACO.

Tabela 6.24 – Resultados: requisito de ausência de conjunto crítico de UTRs (IEEE-30)

Meta-heurísticas	N° de Medidores	N° de UTRs	Custo ($)	Custo Médio ($)	Tempo (Seg)
GRASP	50	21	2325,5	2327,3	63
ACO	62	21	2379,0	2381,3	63

a) Ausência de medidas críticas em múltiplos cenários topológicos e ausência de UTRs críticas no cenário base

A Tabela 6.25 mostra que, para o requisito de ausência de medidas críticas em múltiplos cenários topológicos e ausência de UTRs críticas no cenário base o algoritmo ACO obteve menor custo que o algoritmo GRASP.

Tabela 6.25 – Resultados: requisito de ausência de medidas críticas em múltiplos cenários topológicos e ausência de UTRs críticas no cenário base (IEEE-30)

Meta-heurísticas	N° de Medidores	N° de UTRs	Custo ($)	Custo Médio ($)	Tempo (Seg)
GRASP	40	22	2380,0	2450,3	120
ACO	35	21	2257,5	2280,0	120

6.4.3 Sistema brasileiro 61 barras

a) Observabilidade (múltiplos cenários topológicos)

A Tabela 6.26 mostra que, para o requisito de observabilidade em múltiplos cenários topológicos, o algoritmo GRASP obteve menor custo que o algoritmo ACO.

Tabela 6.26 – Resultados: requisito de observabilidade em múltiplos cenários topológicos (SB-61)

Meta-heurísticas	N° de Medidores	N° de UTRs	Custo ($)	Custo Médio ($)	Tempo (Seg)
GRASP	63	25	2783,5	2787,5	500
ACO	62	26	2879,0	2884,3	500

b) Ausência de medidas críticas (múltiplos cenários topológicos)

A Tabela 6.27 mostra que, para o requisito de ausência de medidas críticas em múltiplos cenários topológicos, o algoritmo GRASP obteve o menor custo.

Tabela 6.27 – Resultados: requisito de ausência de medidas críticas em múltiplos cenários topológicos (SB-61)

Meta-heurísticas	N° de Medidores	N° de UTRs	Custo ($)	Custo Médio ($)	Tempo (Seg)
GRASP	76	25	2842,0	2848,0	800
ACO	82	26	2969,0	2971,5	800

c) Ausência de conjuntos críticos (múltiplos cenários topológicos)

Os resultados da Tabela 6.28, para o requisito de ausência de conjuntos críticos em múltiplos cenários topológicos, mostram que o ACO obteve o sistema de medição de menor custo.

Tabela 6.28 – Resultados: requisito de ausência de conjuntos críticos em múltiplos cenários topológicos (SB-61)

Meta-heurísticas	N° de Medidores	N° de UTRs	Custo ($)	Custo Médio ($)	Tempo (Seg)
GRASP	93	48	5218,5	5222,5	1000
ACO	97	47	5141,5	5148,8	1000

d) Ausência de UTRs críticas

A Tabela 6.29 mostra que, para o requisito de ausência de UTRs críticas o algoritmo AERS obteve um sistema de medição de menor custo do que o obtido pelos algoritmos GRASP e ACO.

Tabela 6.29 – Resultados: requisito de ausência de UTRs críticas (SB-61)

Meta-Heurísticas	N° de Medidores	N° de UTRs	Custo ($)	Custo Médio ($)	Tempo (Seg)
AERS[Vigl09]	115	42	4381,5	--	--
GRASP	71	48	5119,5	5119,5	1000
ACO	73	48	5128,5	5128,5	1000

e) Ausência de conjunto crítico de UTRs

A Tabela 6.30 mostra que, para o requisito de ausência de conjunto crítico de UTRs, os algoritmos ACO e GRASP obtiveram sistemas de medição de mesmo custo.

Tabela 6.30 – Resultados: requisito de ausência de conjunto crítico de UTRs (SB-61)

Meta-heurísticas	N° de Medidores	N° de UTRs	Custo ($)	Custo Médio ($)	Tempo (Seg)
GRASP	132	48	5394,0	5394,0	1000
ACO	132	48	5394,0	5394,0	1000

f) Ausência de conjuntos críticos em múltiplos cenários topológicos e ausência de UTRs críticas no cenário base

A Tabela 6.31 mostra que, para o requisito de ausência de conjuntos críticos em múltiplos cenários topológicos e ausência de UTRs críticas no cenário, o algoritmo ACO obteve sistema de medição de menor custo que o obtido pelo GRASP.

Tabela 6.31 – Resultados: requisito de ausência de conjuntos críticos em múltiplos cenários topológicos e ausência de UTRs críticas no cenário base (SB-61)

Meta-heurísticas	N° de Medidores	N° de UTRs	Custo ($)	Custo Médio ($)	Tempo (Seg)
GRASP	95	51	5527,5	5540,0	1200
ACO	94	48	5223,0	5231,0	1200

6.4.4 Sistema IEEE-118 barras

Os resultados apresentados para o sistema IEEE-118 foram obtidos com uma única execução dos algoritmos. Por esta razão, não são aqui apresentados os custos médios.

a) Observabilidade (múltiplos cenários topológicos)

A Tabela 6.32 mostra que, para o requisito de observabilidade em múltiplos cenários topológicos, o algoritmo ACO obteve melhor resultado que o GRASP.

Tabela 6.32 – Resultados: requisito de observabilidade em múltiplos cenários topológicos (IEEE-118)

Meta-heurísticas	N° de Medidores	N° de UTRs	Custo ($)	Tempo (min)
GRASP	120	41	4640,0	120
ACO	124	40	4558,0	120

b) Ausência de medidas críticas (múltiplos cenários topológicos)

A Tabela 6.33 mostra que, para o requisito de ausência de medidas críticas em múltiplos cenários topológicos, o algoritmo ACO obteve o melhor resultado.

Tabela 6.33 – Resultados: requisito de ausência de medidas em múltiplos cenários topológicos (IEEE-118)

Meta-heurísticas	N° de Medidores	N° de UTRs	Custo ($)	Tempo (min)
GRASP	120	41	4640,0	160
ACO	124	40	4558,0	160

c) Ausência de conjuntos críticos (múltiplos cenários topológicos)

A Tabela 6.34 mostra que, para o requisito de ausência de conjuntos críticos em múltiplos cenários topológicos, o algoritmo ACO obteve o sistema de medição de menor custo.

Tabela 6.34 – Resultados: requisito de ausência de conjuntos críticos em múltiplos cenários topológicos (IEEE-118)

Meta-heurísticas	N° de Medidores	N° de UTRs	Custo ($)	Tempo (min)
GRASP	144	74	8084,0	300
ACO	158	70	7711,0	300

d) Ausência de UTRs críticas

Os resultados da Tabela 6.35, para o requisito de ausência de UTRs críticas, mostram que o ACO obteve um sistema de medição de menor custo que os obtidos pelo GRASP e pelo AERS em [Vigl09].

Tabela 6.35 – Resultados: requisito de ausência de UTRs críticas (IEEE-118)

Meta-Heurísticas	N° de Medidores	N° de UTRs	Custo ($)	Tempo (min)
AERS[Vigl09]	206	70	7927,0	126,5
GRASP	180	70	7810,0	126,5
ACO	152	70	7684,0	126,5

e) Ausência de conjunto crítico de UTRs

Os resultados da Tabela 6.36, para o requisito de ausência de conjunto crítico de UTRs, mostram que o ACO obteve o sistema de medição de menor custo. Em comparação com os resultados da Tabela 6.35, nota-se que com um pequeno investimento adicional é possível atender a este requisito.

Tabela 6.36 – Resultados: requisito de ausência de conjunto crítico de UTRs (IEEE-118)

Meta-Heurísticas	N° de Medidores	N° de UTRs	Custo ($)	Tempo (min)
GRASP	168	70	7756,0	126,5
ACO	163	70	7733,5	126,5

f) Ausência de conjuntos críticos em múltiplos cenários topológicos e ausência de UTRs críticas no cenário base

A Tabela 6.37 mostra que, para o requisito de ausência de conjuntos críticos com múltiplos cenários topológicos ou ausência de UTRs críticas, o algoritmo ACO obteve o melhor resultado.

Tabela 6.37 – Resultados: requisito de ausência de conjuntos críticos em múltiplos cenários topológicos e ausência de UTRs críticas no cenário base (IEEE-118)

Meta-Heurísticas	N° de Medidores	N° de UTRs	Custo ($)	Tempo (min)
GRASP	169	70	7760,5	300
ACO	163	70	7733,5	300

Comparando-se este resultado com os mostrados nas Tabelas 6.34 e 6.35, é possível atender os dois requisitos simultaneamente, com pequeno investimento adicional no plano de medição.

6.5 Testes Considerando a Flexibilização

6.5.1 Sistema IEEE-14 barras

a) Ausência de medidas críticas na Área 1 (prioritária) e observabilidade na Área 2

Os resultados da Tabela 6.38 mostram que, para o requisito de ausência de medidas críticas na área 1 (prioritária) e apenas observabilidade na área 2 (não prioritária), os algoritmos GRASP e ACO obtiveram o mesmo resultado, ilustrado pelo sistema de medição da Figura 6.14.

Comparando estes resultados com aqueles apresentados na Tabela 6.6 e Figura 6.7 (obtidos para o requisito de ausência de medida críticas em toda a rede), é possível observar que a flexibilização do planejamento, requerendo que na área 2 seja atendido apenas o requisito de observabilidade, levou a uma redução do investimento realizado no plano de medição.

Tabela 6.38 – Resultados: requisito de ausência de medidas críticas apenas na Área 1 (IEEE-14)

Meta-heurísticas	N° de Medidores	N° de UTRs	Custo ($)	Custo Médio ($)	Tempo (Seg)
GRASP	15	4	467,5	467,5	10
ACO	15	4	467,5	467,5	10

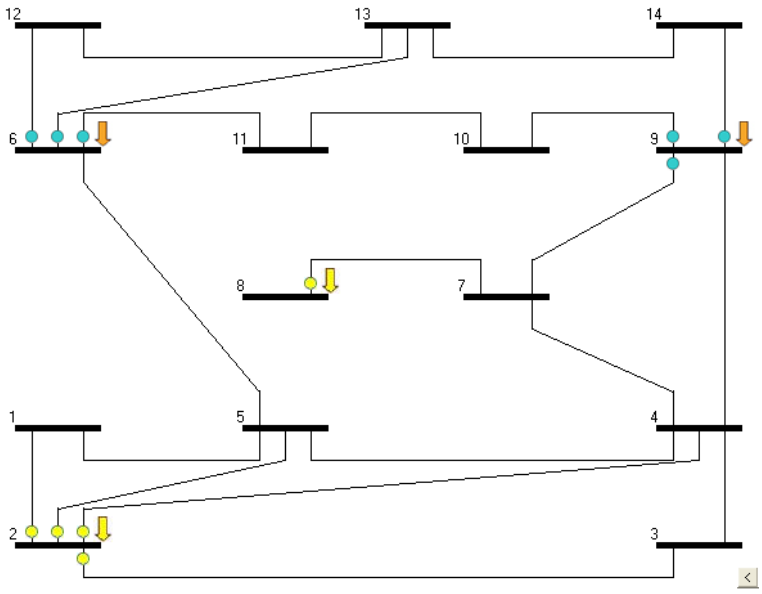

Figura 6.14 - Requisito de ausência de medidas críticas na Área 1(IEEE-14)

b) Ausência de conjuntos críticos na Área 1 (prioritária) e observabilidade na Área 2

Os resultados da Tabela 6.39 mostram que, para o requisito de ausência de conjuntos críticos na área 1 (prioritária) e observabilidade na área 2 (não prioritária), o algoritmo GRASP apresentou resultado ligeiramente melhor que o ACO, sendo este resultado ilustrado pelo sistema de medição da Figura 6.15.

Comparando este resultado com aqueles apresentados na Tabela 6.7 e Figura 6.8 (obtidos para o requisito de ausência de conjuntos críticos em toda a rede), é possível observar que a flexibilização do planejamento, requerendo que na área 2 seja atendido apenas o requisito de observabilidade, levou a um plano de medição com menos UTRs e de menor custo.

Tabela 6.39 – Resultados: requisito de ausência de conjuntos críticos apenas na Área 1 (IEEE-14)

Meta-heurísticas	N° de Medidores	N° de UTRs	Custo ($)	Custo Médio ($)	Tempo (Seg)
GRASP	17	7	766,5	766,5	15
ACO	18	7	781,0	781,0	15

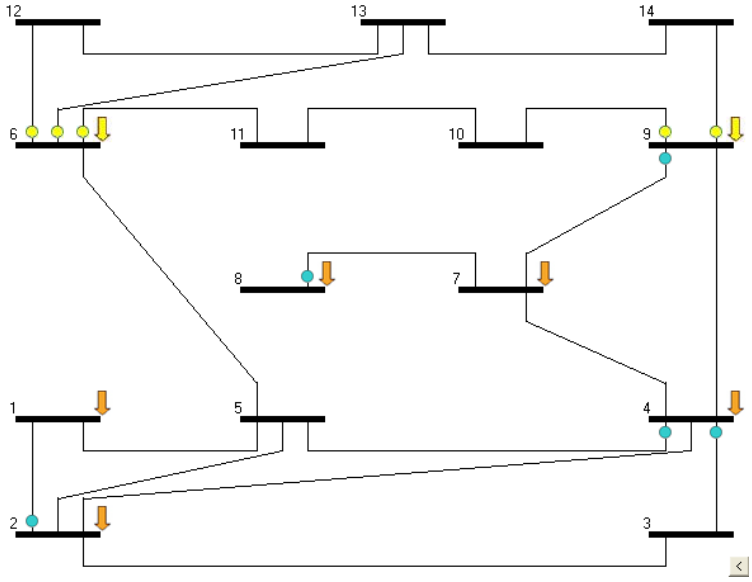

Figura 6.15 - Requisito de ausência de conjuntos críticos na Área 1 (IEEE-14)

6.5.2 Sistema IEEE-30 barras

a) Ausência de medidas críticas na Área 2 (prioritária) e observabilidade na Área 1

A Tabela 6.40 mostra que, para o requisito de ausência de medidas críticas na área 2 (prioritária) o algoritmo GRASP obteve melhor resultado que o ACO.

Tabela 6.40 – Resultados: requisito de ausência de medidas críticas apenas na Área 2 (IEEE-30)

Meta-heurísticas	N° de Medidores	N° de UTRs	Custo ($)	Custo Médio ($)	Tempo (Seg)
GRASP	34	10	1153,0	1153,0	100
ACO	35	10	1157,5	1157,5	100

Comparando estes resultados com aqueles apresentados na Tabela 6.9, é possível observar a redução de custo obtido ao se exigir o atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas apenas na área prioritária.

b) Ausência de conjuntos críticos na Área 2 (prioritária) e observabilidade na Área 1

Os resultados da Tabela 6.41, para o requisito de ausência de conjuntos críticos com área 2 prioritária, mostram que o ACO e o GRASP obtiveram sistemas de medição de igual custo.

Tabela 6.41 – Resultados: requisito de ausência de conjuntos críticos apenas na Área 2 (IEEE-30)

Meta-heurísticas	N° de Medidores	N° de UTRs	Custo ($)	Custo Médio ($)	Tempo (Seg)
GRASP	37	16	1766,5	1766,5	100
ACO	37	16	1766,5	1775,5	100

Comparando estes resultados com aqueles apresentados na Tabela 6.10, é possível observar a redução de custo obtido ao se exigir o atendimento ao requisito de ausência de conjuntos críticos apenas na área prioritária.

6.5.3 Sistema brasileiro 61 barras

a) Ausência de medidas críticas na Área 2 (prioritária) e observabilidade na Área 1

A Tabela 6.42 mostra que neste caso, o algoritmo GRASP obteve o sistema de medição de menor custo, que por sua vez é mais econômico que os apresentados na Tabela 6.12.

Tabela 6.42 – Resultados: requisito de ausência de medidas críticas apenas na Área 2 (SB-61)

Meta-heurísticas	N° de Medidores	N° de UTRs	Custo ($)	Custo Médio ($)	Tempo (Seg)
GRASP	65	23	2592,5	2598,5	1000
ACO	72	23	2624,0	2626,0	1000

b) Ausência de conjuntos críticos na Área 2 (prioritária) e observabilidade na Área 1

Os resultados da Tabela 6.43 mostram que, para o requisito de ausência de conjuntos críticos na área 2 (prioritária) e observabilidade na área 1 (não prioritária), o algoritmo ACO apresentou resultado ligeiramente melhor que o GRASP.

Tabela 6.43 – Resultados: requisito de ausência de conjuntos críticos apenas na Área 2 prioritária (SB-61)

Meta-heurísticas	N° de Medidores	N° de UTRs	Custo ($)	Custo Médio ($)	Tempo (Seg)
GRASP	102	36	4059,0	4066,0	1000
ACO	82	35	3869,5	3872,5	1000

Comparando-se este resultado com aqueles apresentados na Tabela 6.13 (obtidos para o requisito de ausência de conjuntos críticos em toda a rede), é possível observar que a flexibilização do planejamento, requerendo que na área 1 seja atendido apenas o requisito de observabilidade, levou a uma significativa redução da quantidade de UTRs e de custo do plano de medição.

6.5.4 Sistema IEEE-118 barras

a) Ausência de medidas críticas com Área 1(prioritária) e observabilidade nas outras áreas

O resultado apresentado na Tabela 6.44 se refere ao planejamento considerando um único cenário topológico (cenário 1). Neste caso, se o requisito de ausência de medidas críticas fosse exigido para todas as áreas da rede o custo do sistema de medição seria $4230,0, com 36 UTRs. Isto mostra o benefício obtido com o relaxamento deste requisito nas áreas não prioritárias.

Tabela 6.44 – Resultados: requisito de ausência de medidas críticas apenas na Área 1 (IEEE-118)

Meta-heurísticas	N° de Medidores	N° de UTRs	Custo ($)	Tempo (min)
GRASP	124	38	4558,0	100
ACO	125	36	4162,5	100

b) Ausência de conjuntos críticos na Área 1 (prioritária) e observabilidade nas outras áreas

A Tabela 6.45 se refere ao planejamento considerando um único cenário topológico. Neste caso, se o requisito de ausência de conjuntos críticos fosse exigido para todas as áreas da rede o custo do sistema de medição seria $7119,0, com 63 UTRs. Isto mostra o benefício obtido com o relaxamento deste requisito nas áreas não prioritárias.

Tabela 6.45 – Resultados: requisito de ausência de conjuntos críticos apenas na Área 1 (IEEE-118)

Meta-heurísticas	N° de Medidores	N° de UTRs	Custo ($)	Tempo (min)
GRASP	128	48	5376,0	160
ACO	142	45	5139,0	160

Nos testes até então realizados foi possível constatar que os algoritmos ACO e GRASP apresentaram resultados competitivos na otimização de planos de medição para a estimação de estado em sistemas de potência, tendo sido observada ligeira superioridade do ACO quando do planejamento do sistema de maior porte (IEEE-118).

6.6 ACO com Decomposição da Rede

Nesta seção são realizados testes de modo a avaliar os potenciais benefícios que se pode ter empregando a estratégia de decomposição proposta na Seção 5.4. Serão apresentados os resultados obtidos com o algoritmo ACO para a otimização do plano de medição considerando a rede completa e considerando a rede decomposta. Nos resultados apresentados, para efeito de comparação, o algoritmo que considera a rede completa é referido como ACO e o que inclui a decomposição da rede é referido como ACO-D. Como um dos possíveis benefícios da decomposição da rede é a possibilidade de implementação em um ambiente paralelo, são apresentados resultados apenas para os sistemas de 118 e 300 barras, que possuem maior porte. Para os resultados obtidos com o ACO-D os tempos computacionais exibidos incluem todas as etapas até a obtenção da solução final, ou seja: otimização do plano de medição de cada área, integração da rede com a verificação da necessidade de alocação de UTRs em barras de fronteira e refinamento do plano de medição.

6.6.1 Sistema IEEE-118 barras

a) Observabilidade

A Tabela 6.46 mostra que, para o requisito de observabilidade, o algoritmo ACO obteve custo ligeiramente menor, mas o ACO-D apresentou expressivo ganho de tempo computacional.

Tabela 6.46 - Resultados: requisito de observabilidade (IEEE-118)

Meta-heurísticas	N° de Medidores	N° de UTRs	Custo ($)	Tempo (min)
ACO	118	35	4031,0	100
ACO-D	121	35	4044,5	0,93

b) Ausência de medidas críticas

A Tabela 6.47 mostra que, para o requisito de ausência de medidas críticas, o algoritmo ACO-D obteve o menor custo do sistema de medição e tempo computacional bastante inferior ao obtido pelo ACO.

Tabela 6.47 - Resultados: requisito de ausência de medidas críticas (IEEE-118)

Meta-heurísticas	N° de Medidores	N° de UTRs	Custo ($)	Tempo (min)
ACO	140	36	4230,0	160
ACO-D	130	35	4085,0	5

c) Ausência de conjuntos críticos

Tabela 6.48 - Resultados: requisito de ausência de conjuntos críticos (IEEE-118)

Meta-heurísticas	N° de Medidores	N° de UTRs	Custo ($)	Tempo (min)
ACO	155	67	7397,5	160
ACO-D	186	64	7137,0	7

A Tabela 6.48 mostra que, para o requisito de ausência de conjuntos críticos, o algoritmo ACO-D obteve o menor custo do sistema de medição e tempo computacional significativamente menor.

6.6.2 Sistema IEEE-300 barras

a) Observabilidade

A Tabela 6.49 mostra que, para o requisito de observabilidade, o algoritmo ACO-D obteve um sistema de medição de menor custo em um menor tempo computacional.

Tabela 6.49 - Resultados: requisito de observabilidade (IEEE-300)

Meta-heurísticas	N° de Medidores	N° de UTRs	Custo ($)	Tempo (min)
ACO	337	106	12116,5	30
ACO-D	339	101	11625,5	18

d) Ausência de medidas críticas

A Tabela 6.50 mostra que, para o requisito de ausência de medidas críticas, o algoritmo ACO-D obteve sistema de medição de menor custo e em menor tempo computacional.

Tabela 6.50 - Resultados: requisito de ausência de medidas críticas (IEEE-300)

Meta-heurísticas	N° de Medidores	N° de UTRs	Custo ($)	Tempo (min)
ACO	389	106	12350,5	90
ACO-D	369	101	11760,5	75

e) Ausência de conjuntos críticos

A Tabela 6.51 mostra que, para o requisito de ausência de conjuntos críticos, o algoritmo ACO obteve um sistema de medição de custo ligeiramente menor, mas o ACO-D apresentou tempo computacional bastante inferior.

Tabela 6.51 - Resultados: requisito de ausência de conjuntos críticos (IEEE-300)

Meta-heurísticas	N° de Medidores	N° de UTRs	Custo ($)	Tempo (min)
ACO	505	200	22272,5	300
ACO-D	446	204	22407,0	176

6.7 Comentários

Os resultados obtidos mostram que os algoritmos GRASP e ACO, fazendo uso da heurística construtiva proposta, apresentaram resultados superiores aos demais algoritmos. Foi verificado um melhor desempenho tanto na capacidade de obter soluções de menor custo, como no tempo computacional gasto para atingir tais soluções. Isto revela que a heurística construtiva, proposta com base nas características apresentadas por planos de medição que buscam atender diferentes requisitos de redundância, é eficaz para tornar o processo de busca bem sucedido. Tal heurística direciona o processo de busca para boas regiões do espaço de soluções, tornando-o mais eficaz e eficiente.

Os testes realizados e os resultados obtidos revelaram os benefícios que se pode ter ao utilizar uma modelagem flexível para o problema de alocação ótima de pontos de medição, como a que foi aqui proposta. É possível perceber que o planejador pode explorar diferentes relações custo-benefício, definindo com facilidade os requisitos a serem atendidos nas mais diversas situações. Foi possível testar o atendimento a inúmeros requisitos de redundância, tais como: observabilidade, ausência de medidas críticas, ausência de conjuntos críticos de medidas, ausência de UTRs críticas e ausência de conjunto crítico de UTRs, bem como o planejamento considerando diferentes topologias da rede e a existência de áreas onde a supervisão é prioritária ou não prioritária. O conjunto de testes realizados mostra que são inúmeras as opções apresentadas ao planejador, de forma a melhor explorar as relações de compromisso entre custo do plano de medição e confiabilidade/robustez da supervisão da rede. Os resultados apresentados ilustram apenas uma parcela das opções de planejamento possíveis com o modelo proposto.

Os resultados obtidos quando se utilizou a decomposição da rede, empregando o algoritmo ACO-D, mostraram que esta é uma alternativa bastante interessante para a obtenção de planos ótimos de medição para sistemas de grande porte. O algoritmo ACO-D apresentou excelente desempenho no que se refere à qualidade da solução obtida e ao tempo computacional para obtê-la. Embora o ganho de tempo computacional tenha sido mais expressivo para o sistema IEEE-

118, acredita-se que melhorias significativas podem ser obtidas para o sistema IEEE-300 com a decomposição do sistema em mais áreas, cada uma delas de menor dimensão. É importante ressaltar ainda que os tempos computacionais apresentados quando se utilizou a decomposição foram obtidos considerando a solução sequencial do problema para cada sub-rede. Ganhos computacionais significativos podem ainda ser obtidos com a paralelização da solução do problema para cada sub-rede.

CAPÍTULO 7

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.

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, devido à manutenção de UTRs e também devido a reconfigurações da rede. Isto faz com que níveis críticos de redundância possam ser alcançados, caracterizando situações de perda iminente de observabilidade e conseqüente desempenho inadequado da EE. Para que tais níveis não sejam alcançados é necessário considerar no processo de planejamento do sistema de medição a possibilidade da perda de UTRs e reconfigurações da rede, os quais ocorrem no dia a dia da operação do sistema. Quanto à escassez de recursos financeiros, é preferível muitas vezes priorizar investimentos em áreas de interesse da rede.

Este trabalho apresentou uma nova modelagem para fazer frente a requisitos de observabilidade, confiabilidade e robustez, considerando a possibilidade de ocorrência de diferentes configurações topológicas da rede e perda de UTRs. No que diz respeito ao requisito de robustez, foi introduzido o conceito de

conjunto crítico de UTRs de forma a se exigir o planejamento de sistemas de medição ainda mais robustos. O problema de planejamento de sistemas de medição para a EE foi aqui tratado como um problema de otimização combinatória e formulado de maneira a levar em consideração diversos aspectos práticos de interesse, além de proporcionar ao planejador facilidade e flexibilidade para a definição dos objetivos e requisitos a serem considerados durante o planejamento. Para a sua solução foram propostas metodologias baseadas em metaheurísticas e utilizada uma função aptidão que apresenta grande flexibilidade para o planejamento. As metaheurísticas foram empregadas na metodologia proposta em conjunto com uma heurística construtiva também aqui proposta.

A heurística construtiva proposta mostrou-se extremamente eficaz para a obtenção de soluções de alta qualidade durante o processo de busca por meio de metaheurísticas como AGs, GRASP e ACO. Nos testes realizados, foi possível observar que a metodologia utilizando as metaheurísticas ACO e GRASP apresentaram melhor desempenho quando comparadas ao emprego do AG. Isto se deveu ao fato do AG empregar a heurística construtiva apenas para a geração da população inicial, enquanto o ACO e o GRASP utilizam tal heurística durante todo o processo evolutivo. Ainda assim, a eficácia da heurística construtiva permitiu ao AG obter melhores soluções em relação a quando se gerou aleatoriamente a população inicial. Comparações com outros resultados da literatura mostraram que a metodologia proposta, utilizando GRASP ou ACO em conjunto com a heurística construtiva, apresentou melhor desempenho.

A flexibilidade da formulação proposta para a definição dos objetivos práticos de interesse contemplou também a possibilidade de se admitir que áreas prioritárias e não prioritárias para supervisão podem receber investimentos diferentes no plano de medição, desta forma reduzindo custos. Esta é mais uma maneira de permitir ao planejador explorar as diferentes relações de compromisso entre custo e benefício da solução, levando em consideração o conhecimento e a experiência que se tem sobre a operação do sistema de potência. Os resultados obtidos mostraram a eficácia de tal modelagem.

Finalmente, foi apresentada uma decomposição do problema de forma a se obter ganhos computacionais, sem prejuízo significativo da qualidade da solução, de forma a permitir o planejamento eficiente de sistemas de medição para redes de grande porte. Os resultados obtidos permitiram observar que houve expressivo ganho de tempo computacional com o emprego da decomposição e que as soluções obtidas foram muito próximas (e por vezes até melhores) às obtidas considerando a rede completa. Isto abre caminho para a implementação da solução do problema em um ambiente paralelo, o que poderá trazer ainda maiores benefícios no que diz respeito ao tempo computacional para a obtenção de soluções de alta qualidade em sistemas de grande porte.

7.2 Principais Contribuições

Dentre as contribuições do trabalho, podem-se destacar:

- Apresentação de uma modelagem flexível para o planejamento de sistemas de medição, permitindo ao planejador melhor explorar as relações entre custo e benefício das soluções do problema, considerando requisitos de observabilidade, confiabilidade e robustez

- Integração em um único modelo de requisitos de redundância e aspectos práticos de interesse, tais como: requisitos de observabilidade, ausência de medidas críticas, ausência de conjuntos críticos, ausência de UTRs críticas e consideração de diferentes cenários topológicos.

- Introdução do conceito de conjunto crítico de UTRs e sua utilização na modelagem proposta, de forma a se obter planos de medição ainda mais robustos.

- Modelagem da priorização de investimentos em áreas da rede, em função da importância de sua supervisão, permitindo ao planejador levar em consideração o conhecimento qualitativo sobre o sistema de potência de forma a melhor explorar o custo-benefício das soluções.

- Proposição de uma heurística construtiva baseada em características inerentes a planos de medição ótimos para diferentes requisitos de desempenho e capaz de fornecer soluções de alta qualidade.

- Proposição de metodologia baseada no emprego de metaheurísticas e da heurística construtiva proposta, de modo a obter planos de medição de alta qualidade e considerando os diferentes requisitos que podem ser estabelecidos.

- Apresentação da decomposição do problema e um algoritmo para a sua solução, permitindo obter soluções de alta qualidade e em tempo computacionais mais atraentes, com potencial aplicação à solução paralela do planejamento de sistemas de medição para redes de grande porte.

Em parte, as contribuições mencionadas encontram-se nas publicações a seguir:

H. R. O. Rocha, J. C. S. de Souza, M. B. Do Coutto Filho, "*Localização ótima de medidores em redes elétricas de grande porte via colônia de formigas e heurística construtiva",* XLII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Bento Gonçalves, Brasil, artigo 70791, 2010.

H. R. O. Rocha, J. C. S. de Souza, M. B. Do Coutto Filho, *"Utilização da metaheurística colônia de formigas na construção de planos de medição robustos para a estimação de estado",* Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Automática, artigo 65594, 2010.

H. R. O. Rocha, J. E. V. Tafur, J. C. S. de Souza, M. B. Do Coutto Filho, *"Metodologia baseada em colônia de formigas para alocação de pontos de medição em redes elétricas",* XL Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, João Pessoa, Brasil, artigo 43082, 2008.

J. E. V. Tafur, H. R. O. Rocha, L. S. Ochi, E. B. M. Meza, J. C. S. de Souza, M. B. Do Coutto Filho, *"Heurística GRASP aplicada ao planejamento de sistemas de medição*

para a supervisão de redes elétricas". I Simpósio Brasileiro de Inteligência Computacional, Florianópolis, Brasil, em CD-ROM, 2007.

J. E. V. Tafur, H. R. O. Rocha, L. S. Ochi, E. B. M. Meza, J. C. S. de Souza, M. B. Do Coutto Filho, *"Heuristic GRASP for planning metering systems for electrical power network monitoring*", VI International Conference on Operational Research for Development, Fortaleza, Brasil, pp. 356-367, Aug./2007.

7.3 Propostas para Trabalhos Futuros

Na continuidade desta pesquisa vislumbra-se:

- Realização de simulações de forma a explorar diversas outras possibilidades de realização do planejamento que o modelo proposto permite.

- Implementação do algoritmo ACO-D em um ambiente paralelo.

- Investigar formas de melhorar ainda mais a heurística construtiva proposta ou propor novas heurísticas construtivas.

- Investigar o emprego de outras metaheurísticas em conjunto com a heurística construtiva proposta.

- Testar a metodologia proposta para a expansão de sistemas de medição existentes e, neste caso, considerar a possibilidade de alocação de medidas advindas de unidades de medição fasorial.

[Aam83] S. Aam, L. Holten, O. Gjerd, "*Design of the measurement system for state estimation in the Norwegian high-voltage transmission network"*, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. 102 (12), pp. 3769-3777, Dez./1983.

[Abur99] A. Abur, F. H. Magnago, "*Optimal meter placement for maintaining observability during single branch outages"*, IEEE Trans. on Power Systems, vol. 14(4), pp. 1273-1278, Nov./1999.

[Alsa98] O. Alsaç, N. Vempati, B. Stott, A. Monticelli, "*Generalized state estimation"*, IEEE Trans. on Power Systems, vol. 13(3), pp. 1069-1075, Ago./1998.

[Anto00] A. B. Antonio, "*Alocação de medidores para estimação de estado em sistemas de potência através de metaurísticas"*, 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"*, Proc. IEEE Porto Power Tech Conference, Porto, Portugal, paper 146, Set./2001.

[Aria75] F. Ariatti, L. Marzio, P. Ricci, "*Designing state estimation in view of reliability"*, Proc. Power Systems Computational Conference, Cambridge, UK, paper 2, Set./1975.

[Ayre86] M. Ayres, P. H. Haley, "*Bad data groups in power system state estimation*", IEEE Trans. Power Systems, vol.1 PWRS-I, Aug./1986.

[Bara95] M. E. Baran, J. Zhu, H. Zhu, K. E. Garren, "*A meter placement method for state estimation"*, IEEE Trans. Power Systems, vol. 10(3), pp. 1704-1710, Ago./1995.

[Barn87] S. T. Barnard, "*Stereo matching by hierarchical annealing, microcanonical annealing"*, Proc. 10th International Joint conference on Artificial Intelligence, Milan, Italy, pp. 832-835, Abr./1987.

[Beas93] D. Beasley, D. R. Bull, R. R. Martin, "*An overview of genetic algorithms: Part 2", Research Topics*, University Computing, vol. 15(4), pp. 170-181, 1993.

[Bose87] A. Bose, K. A. Clements, "*Real-time modeling of power networks"*, Proceedings of the IEEE, vol. 75(12), pp. 1607-1622, Dez./1987.

[Brue05] *.D. J. Brueni, L. S. Heath, "The PMU placement problem,"* SIAM J. Discrete Math., vol. 19(3), pp. 744–761, Dez./2005.

[Çeli92] M. K. Çelik, A. Abur, "*A robust WLAV state estimator using transformations"*, IEEE Trans. Power System, vol. 7(1), pp. 106-113, Fev./1992.

[Çeli95] M. K. Çelik, W. H. Edwin Liu, "*An incremental measurement placement algorithm for state estimation"*, IEEE Trans. Power Systems, vol. 10(3), pp. 1698-1703, Ago./1995.

[Chen06] J. Chen, A. Abur, "*Placement of PMUs to enable bad data detection in state estimation"*, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 21(4), pp. 1608-1615, Nov./2006.

[Chen08] J. Chen, A. Abur, "*Enhanced topology error processing via optimal measurement design"*, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 23(3), pp. 845-852, Ago./2006.

[Clem81] K. A. Clements, G. R. Krumpholz, P. Davis, "*Power system state estimation residual analysis: an algorithm using network topology"*, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. 100(4), pp. 1779-1787, 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. on Power Apparatus and Systems, vol. 101(4), pp. 997-1004, Abr./1982.

[Clem83] K. A. Clements, G. R. Krumpholz, P. W. Davis, "*Power system state estimation with measurement deficiency: an observability measurement placement algorithm"*, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. 102(7), pp. 2012-2020, Jul./1983.

[Clem90] K. A. Clements, "*Observability methods and optimal meter placement"*, Electrical Power & Systems, vol. 12(2), pp. 88-93, Abr./1990.

[Cose00] J. Coser, J. G. Rolim, A. J. A. Simões Costa, "*Metering scheme optimization with emphasis on ensuring bad-data processing capability"*, Congresso Brasileiro de Automática, Florianópolis, SC, pp. 1-6, Nov./2000.

[Cose06] J. Coser, J. G. Rolim, A. J. A. Simões Costa, "*Projeto de planejamento de medição para a estimação de estados via algoritmos genéticos"*, IEEE Trans. on Power System, vol. 21(4), pp. 1903-1911, Nov./2006.

[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(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"*, Proc. 13th Power Systems Computation Conference, Trodhein, Norway, pp. 441-447 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 Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, Curitiba, Brasil, vol.1, pp. 1-7, 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"*, Proc. IEEE Porto Power Tech Conference, Porto, Portugal, paper 149, 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"*, XVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Campinas, Brasil, artigo GOP011, Out./2001.

[Cout05] M. B. Do Coutto Filho, E. B. M. Meza, J. C. S. Souza, M. Th. Schilling, C. Capdeville, "*Application of genetic algorithms for planning metering systems in state estimation"*, Proc. Power Systems Computational Conference, Liege, BL, paper 6, Aug./2005.

[Cout07] M. B. Do Coutto Filho, J. C. S. Souza, M. Th. Schilling, "*Handling critical data and observability"*, Electric Power Components and Systems, vol. 35(5), pp. 553-573, Mai./2007.

[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(4), pp. 1267-1285, Nov./1975.

[Dori96] M. Dorigo, V.Maniezzo, A.Colorni, "*The ant system: optimization by a colony of cooperating agents"*, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B, vol. 26(1), pp.1-13, 1996.

[Dori00] M. Dorigo, T.Stützle, "*The ant colony optimization metaheuristic: algorithms, applications and advances"*, Technical Report IRIDIA-2000-32, 2000.

[Edel75] H. Edelmann, "*A universal assessment for the superior quality of distribution of measuring points for the state estimation of high-voltage networks"*, Proc. Power Systems Computational Conference, Cambridge, UK, paper 2.3/7, Set./1975.

[Emam08] R. Emami, A. Abur, F. Galvan, "*Optimal placement of phasor measurements for enhanced state estimation: a case study"*, Proc. Of 16th Power Systems Computation Conference, Glasgow, Scotland, Jul./2008.

[Emam10] R. Emami, A. Abur, "*Robust measurement design by placing synchronized phasor measurements on network branches"*, IEEE Trans. on Power Systems, vol. 25(1), pp. 38-43, Fev./2010.

[Feo95] T. A. Feo, M.G.C. Resende,"*Greedy randomized adaptive search procedures*", J. of Global Optimization, vol. 6, pp.109–133, 1995.

[Fetz75] E. E. Fetzer, P. M. Anderson, "*Observability in state estimation of power systems"*, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. 94(6), pp. 1981-1988, Nov./1975.

[Glov86] F. Glover, "*Future paths in integer programming and links to artificial intelligence"*, Computers and Operations Research, vol. 13(5), pp. 533-549, 1986.

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

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

[Holl75] J. H. Holland, "*Adaptation in natural and artificial systems"*, Ann Arbor:University of Michigan Press, 1975.

[Kirk83] S.Kirkpatrick, C.D.Gelatt, Jr., M.P.Vecchi, "Optimization by simulated annealing", Science, vol. 220(4598), May/1983.

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

[Korr84] G. N. Korres, G. C. Contaxis, "*A tool for the evaluation a selection of state estimation measurement schenes"*. IEEE Transactions in Power System, vol. 9(2), pp. 1110 - 1116, Mai./1984.

[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(3), Ago./2000.

[Mato00] 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"*, IEEE Trans. Power Systems, vol. 6(2), pp. 511-523, Mai./1991.

[Mira96] V. Miranda, D. Srinivasan, L. M. Proença, "*Evolutionary computation in power systems"*, Proc. Power Systems Computational Conference, 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"*, Proc. IEEE 2000 Summer Meeting, Seattle, USA, 2000.

[Mont85a] A. Monticelli, F. F. Wu, "*Network observability: theory"*, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. 102(12), pp. 3769-3777, Dez./1983.

[Mont85b] A. Monticelli, F. F. Wu, "*Network observability: identification of observable islands and measurement placement"*, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. 102(12), pp. 3769-3777, Dez./1983.

[Mont99] A. Monticelli, "*State Estimation in Electric Power Systems: A Generalized Approach",* Kluwer Academic Press, 1999.

[Mori99] H. Mori, O. Matsuzaki, "*A tabu search based approach to meter placement in static state estimation"*, Proc. International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, Rio de Janeiro, Brasil, 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. on Power Systems, vol. 3(3), pp. 830-836, Ago./1988.

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

[Ricc99a] O. F. Riccieri, "*Planejamento de sistemas de medição utilizando algoritmos genéticos"*, Dissertação de Mestrado, COPPE-UFRJ , Ago./1999.

[Ricc99b] O. F. Riccieri, D. M. Falcão, "*A meter placement for state estimation using genetic algorithms"*, Proc. Intelligent System Application to Power Systems, Rio de Janeiro, Brasil, 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. on Power Systems, vol. 9(1), pp. 381-387, Fev./1994.

[Schw70] F.C.Schweppe, J. Wilder, "*Power system static state estimation"*, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. 89(1), 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. on Power Apparatus and Systems, vol. 5(3), 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., vol. 1, 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. Power Systems, vol.20(4), 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"*, IEE Proc. Trans. Distrib., vol. 114, pp. 445-455, Set./ 1997.

[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. Power Systems, vol. 5, pp. 941-949, Ago./1990.

[Vigl07] M. P. Vigliassi, E. M. Moreira, A. C. B. Delbem, E. do V. Simões, J. B. A. London Jr., N. G. Bretas, "*Metodologia para projeto de sistemas de medição para efeito de estimação de estado via algoritmos evolutivos*", Anais do V Seminário Nacional de Controle e Automação, artigo *TT067,* 2007.

[Vigl08] M. P. Vigliassi, S. A. R. Piereti, J. B. A. London Jr, A. C. B. Delbem, N. G. Bretas, "*Projeto de Sistemas de Medição Confiáveis para Efeito de Estimação de Estado via Algoritmos Evolutivos e Matriz H∆t"*. Anais do XVII Congresso Brasileiro de Automática, artigo 41022, 2008.

[Vigl09] M. P. Vigliassi, J. B. A. London Jr., "*Projeto de sistemas de medição confiáveis para efeito de estimação de estado via algoritmos evolutivos e matriz H∆t",* Dissertação de Mestrado, USP-SC*,* 2009.

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

[Xu05] B. Xu, A. Abur, "*Optimal Placement of Phasor Measurement Units for State Estimation",PSERC*- Power Systems Engineering Research Center, vol. 1, pp 5-58, Oct/2005.

APÊNDICE A

IDENTIFICAÇÃO DE MEDIDAS E CONJUNTOS CRÍTICOS

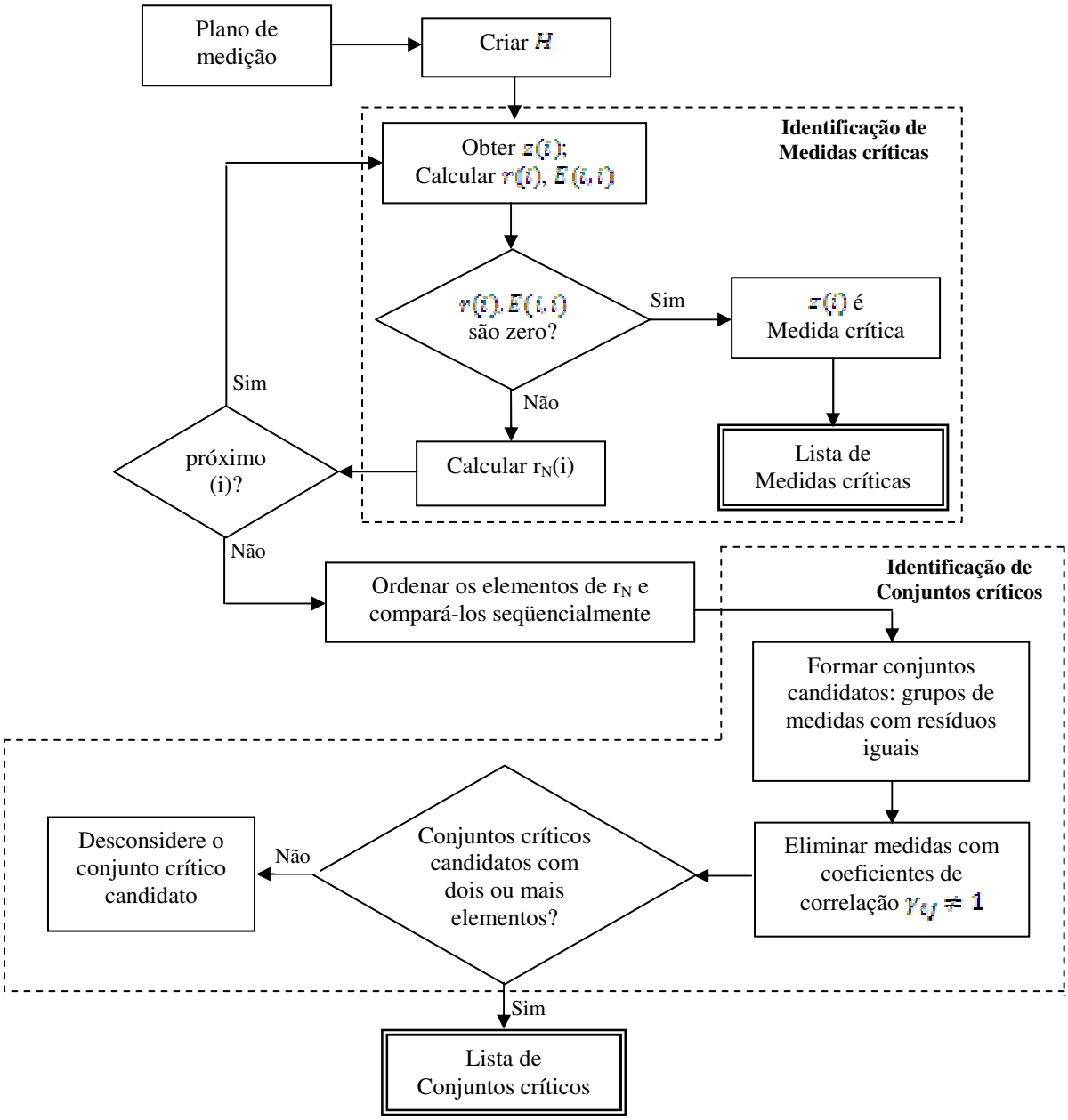

Figura A.1 - Fluxograma simplificado para identificação de medidas críticas e conjuntos críticos.

Livros Grátis

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

Milhares de Livros para Download:

Baixar livros de Administração
Baixar livros de Agronomia
Baixar livros de Arquitetura
Baixar livros de Artes
Baixar livros de Astronomia
Baixar livros de Biologia Geral
Baixar livros de Ciência da Computação
Baixar livros de Ciência da Informação
Baixar livros de Ciência Política
Baixar livros de Ciências da Saúde
Baixar livros de Comunicação
Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE
Baixar livros de Defesa civil
Baixar livros de Direito
Baixar livros de Direitos humanos
Baixar livros de Economia
Baixar livros de Economia Doméstica
Baixar livros de Educação
Baixar livros de Educação - Trânsito
Baixar livros de Educação Física
Baixar livros de Engenharia Aeroespacial
Baixar livros de Farmácia
Baixar livros de Filosofia
Baixar livros de Física
Baixar livros de Geociências
Baixar livros de Geografia
Baixar livros de História
Baixar livros de Línguas

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