HELDER ROBERTO DE OLIVEIRA ROCHA

ALOCAÇÃO DE PONTOS DE MEDIÇÃO PARA A SUPERVISÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

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

Orientadores: Prof. Julio Cesar Stacchini de Souza Prof. Milton Brown Do Coutto Filho

> Niterói 2005

R672 Rocha, Helder Roberto de Oliveira

Alocação de Pontos de Medição para Supervisão de Redes de Distribuição de Energia Elétrica/ Helder Roberto de Oliveira Rocha. – Niterói,. RJ : UFF/IC, 2005.

108 f.

Orientadores: Julio César Stacchini de Souza e Milton Brown Do Couto Filho. Dissertação (Mestrado em Computação) - Universidade Federal Fluminense,

2005.

1. Estimação de Estado (Energia elétrica). 2. Energia Elétrica – Redes de Distribuição. 3. Planejamento de Sistema de Medição. 4. Computação – Algoritmos Genéticos. I. Título.

T 621.3191

HELDER ROBERTO DE OLIVEIRA ROCHA

ALOCAÇÃO DE PONTOS DE MEDIÇÃO PARA A SUPERVISÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

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

Aprovada em 11 de Março de 2005

BANCA EXAMINADORA

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

Im Ugn m

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

rea

Prof. Marcus Theodor Schilling, D. Se. UFF - Universidade Federal Fluminense

Prof. José Luiz Rezende Pereira, Ph. D.

UFJF – Universidade Federal de Juiz de Fora

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

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por sua constante presença em minha vida, dando-me coragem para enfrentar todos os obstáculos.

Aos meus orientadores, Prof. Julio César Stacchini de Souza e Prof. Milton Brown Do Coutto Filho pelo acompanhamento e orientação técnica, marcando sempre com valores éticos a sua participação.

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

À CAPES, pelo apoio financeiro que possibilitou a realização deste trabalho.

À AES Eletropaulo pelo interesse demonstrado pelo tema desta Dissertação, objeto de parte do projeto de P&D intitulado "Desenvolvimento de Funções Avançadas para Gerenciamento de Sistemas de Distribuição".

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

Cada vez mais os consumidores de energia elétrica têm exigido um serviço de melhor qualidade e maior confiabilidade. Isto tem tornado a operação de sistemas de distribuição ainda mais complexa, levando à implementação de funções avançadas para a automação de tais sistemas.

Essas funções necessitam uma base de dados de tempo real, precisa e confiável, a partir da qual seja possível supervisionar uma determinada área de interesse para a operação. Esta base de dados é construída através de uma função avançada conhecida por Estimação de Estado, responsável pelo processamento de um conjunto redundante de medidas, de modo a se obter uma estimativa do estado operativo do sistema, para uma determinada configuração da rede elétrica.

Por razões econômicas, o número de telemedidas integradas ao sistema de aquisição de dados em redes de distribuição, em geral, não é suficientemente redundante para a execução da função Estimação de Estado. Entretanto, através da combinação de um plano de medição mínimo e da utilização de pseudomedidas adequadamente escolhidas, pode-se disponibilizar um conjunto de dados de entrada que permita a realização do processo de estimação com confiabilidade adequada.

A presente Dissertação apresenta uma metodologia para tratar o problema da alocação de pontos de medição para a supervisão de sistemas de distribuição através da função Estimação de Estado. A metodologia proposta se caracteriza pela obtenção de uma distribuição de pontos de medição (considerando tipo, localização, número de medidores) que: conduza a estimativas confiáveis do estado operativo do sistema; permita a supervisão de toda a rede de interesse; apresente o menor custo possível. A técnica de otimização escolhida para tratar o problema foi a dos Algoritmos Genéticos por sua flexibilidade e simplicidade de implementação. Resultados numéricos de estudos de simulação referentes à aplicação da metodologia proposta a diversos sistemas-teste são apresentados e discutidos.

More and more consumers of electric energy have demanded a service of better quality and greater reliability. Thus the operation of distribution systems has become even more complex, leading to the implementation of advanced functions for the automation of such systems.

These functions require a real-time, accurate, reliable database, from which it is possible to supervise a given area of interest for the operation. This database is built through an advanced function known as State Estimation, responsible for processing a redundant set of measurements, so as to obtain an estimate of the system operating state, for a given network configuration.

For economic reasons, the number of telemetered measurements integrated to the data acquisition system in distribution networks generally is not redundant enough for the execution of the State Estimation function. However, through the combination of a minimum plan of measurements and the use of pseudomeasurements adequately chosen, it is possible to make available an input data set, which allows the accomplishment of the estimation process with adequate reliability.

This Dissertation presents a methodology to deal with the meter placement problem for distribution system monitoring through the State Estimation function. The proposed methodology refers to the definition of measurement points (considering type, location and number of meters) which: leads to reliable estimates of the system operating state; allows the monitoring of the network as a whole; presents a minimum cost. The optimization technique used to treat the problem was the Genetic Algorithms due to its flexibility and simplicity of implementation. Numerical results of simulation studies with the proposed methodology applied to typical test systems are presented and discussed.

1 INTRODUÇÃO	
1.1 Considerações Gerais	1
1.2 Desenvolvimento Histórico	3
1.3 Objetivo do Trabalho	8
1.4 Estrutura da Dissertação	9
2 ESTIMAÇÃO DE ESTADO	10
2.1 Introdução	10
2.2 Etapas da Estimação de Estado	11
2.3 Estimação de Estado Não Linear	13
2.4 Estimação de Estado Linear	15
2.5 Análise de Observabilidade da Rede	17
2.6 Filtragem do Estado	20
2.7 Detecção de Erros	20
2.8 Análise de Resíduos	21
2.9 Conclusões	23
3 ALGORITMOS GENÉTICOS	24
3.1 Introdução	24
3.2 Conceitos Básicos sobre Algoritmos Genéticos	25
3.3 Funcionamento dos Algoritmos Genéticos	27
3.4 Processamento de um Algoritmo Genético	29
3.5 Módulo de Avaliação	29
3.6 Módulo de Estruturação	30
3.6.1 Técnica Universal ou por Roleta	30
3.6.2 Técnica por Torneio	31
3.6.3 Módulo de Reprodução	32
3.6.4 Técnica de Deleção	34
3.6.5 Elitismo	34
3.7 Parâmetros Genéticos	35

3.7.1 Tamanho da População	35
3.7.2 Taxa de Cruzamento	35
3.7.3 Taxa de Mutação	36
3.8 As Diferenças entre os AGs e os Métodos Tradicionais	36
3.9 Conclusões	37
4 ALOCAÇÃO DE PONTOS DE MEDIÇÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO	38
4.1 Introdução	38
4.2 Níveis de Redundância de um Sistema de Medição	39
4.2.1 Observabilidade da Rede	40
4.2.2 Medidas Críticas	41
4.3 Alocação de Pontos de Medição	42
4.4 Atendimento aos Requisitos de Desempenho	43
4.4.1 Requisito de Observabilidade	44
4.4.2 Ausência de Medidas Críticas	44
4.5 Atendimento às Diferentes Condições Topológicas	45
4.5.1 Requisito de Observabilidade	46
4.5.2 Ausência de Medidas Críticas	46
4.5.3 Função Aptidão	46
4.6 Codificação do Plano de Medição	49
4.7 Consideração de Pontos Estratégicos para Telecomando	49
4.8 Descrição da Metodologia	50
4.9 Alocação de Pseudomedidas	51
4.10 Conclusões	54
5 SIMULAÇÕES E TESTES	55
5.1 Alocação de Pontos de Medição	55
5.1.1 Simulações com o Sistema IEEE-14 Barras	56
5.1.2 Simulações com o Sistema A	70
5.1.3 Simulações com o Sistema B	73
5.1.4 Simulações com o Sistema C	79

5.2 Utilização de Pmeds	88
5.2.1 Testes com o sistema A	88
5.2.2 Testes com o sistema B	89
5.2.3 Testes com o sistema C	91
5.3 Comentários sobre os Resultados	95
6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	98
6.1 Conclusões	98
6.2 Contribuições do Trabalho	100
6.3 Propostas para Trabalhos Futuros	100
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102
REFERÊNCIAS COMPLEMENTARES (NÃO CITADAS)	107

LISTA DE FIGURAS

Figura	2.1 -	Etapas básicas do processo de EE	13
Figura	3.1 -	Processamento de um Algoritmo Genético	28
Figura	3.2 -	Representação gráfica da roleta	31
Figura	3.3 -	Exemplo de mutação	33
Figura	3.4 -	Exemplo de operador de cruzamento de um ponto	34
Figura	5.1 -	Configuração da rede do sistema IEEE-14	57
Figura	5.2 -	Requisito de observabilidade, sistema IEEE-14	58
Figura	5.3 -	Requisito de ausência de medidas críticas, sistema IEEE-14	59
Figura	5.4 -	Requisito de observabilidade para várias configurações da rede, sistema	
		IEEE-14	61
Figura	5.5 -	Requisito de ausência de medidas críticas para várias configurações da	
		rede, sistema IEEE-14	62
Figura	5.6 -	Flexibilização dos requisitos de desempenho: ausência de medidas	
		críticas para a rede básica e observabilidade para outras (20)	
		configurações, sistema IEEE-14	64
Figura	5.7 -	Flexibilização dos requisitos de desempenho: ausência de medidas críticas	
		para a rede básica e observabilidade para outras (10) configurações,	
		sistema IEEE-14	65
Figura	5.8 -	Requisito de observabilidade (rede básica), sistema IEEE-14	66
Figura	5.9 -	Ausência de medidas críticas (rede básica), sistema IEEE-14	67
Figura	5.10	- Ausência de medidas críticas (várias configurações de interesse),	
		sistema IEEE-14	68
Figura	5.11	- Flexibilização dos requisitos de desempenho (vários configurações de	
		rede de interesse apenas observáveis), sistema IEEE-14	69
Figura	5.12	- Sistema Teste A – configuração básica	70
Figura	5.13	- Requisito de observabilidade, Sistema A	71
Figura	5.14	- Requisito de ausência de medidas críticas, Sistema A	72
Figura	5.15	- Sistema Teste B – configuração básica	73

Figura 5.16 - Requisito de observabilidade, Sistema B	74
Figura 5.17 - Requisito de ausência de medidas críticas, Sistema B	75
Figura 5.18 - Requisito de observabilidade (várias configurações de rede), Sistema B	77
Figura 5.19 - Requisito de ausência de medidas críticas (várias configurações),	
Sistema B	78
Figura 5.20 - Sistema teste C – configuração básica	79
Figura 5.21 - Requisito de observabilidade – rede básica, Sistema C	80
Figura 5.22 - Requisito de ausência de medidas críticas – rede básica, Sistema C	82
Figura 5.23 - Requisito de observabilidade (diferentes configurações), Sistema C	84
Figura 5.24 - Requisito de ausência de medidas críticas (diferentes configurações),	
Sistema C	85
Figura 5.25 - Requisito de observabilidade (UTRs pré-definidas), Sistema C	87
Figura 5.26 - Sistema A com Pmeds, ausência de Medidas Críticas	88
Figura 5.27 - Sistema B com Pmeds, ausência de Medidas Críticas no cenário base	90
Figura 5.28 - Sistema B com Pmeds, ausência de Medidas Críticas, vários cenários	91
Figura 5.29 - Sistema C com Pmeds, ausência de Medidas Críticas, cenário base	92
Figura 5.30 - Sistema C com Pmeds, ausência de Medidas Críticas, vários cenários	94

LISTA DE TABELAS

	0.1
Tabela 3.1 - Exemplo para ilustrar a seleção por roleta	31
Tabela 5.1 - Resultados com o requisito de observabilidade, sistema IEEE-14	58
Tabela 5.2 - Resultados para o requisito de ausência de medidas críticas, sistem	ma
IEEE-14	59
Tabela 5.3 - Resultados obtidos considerando, para várias configurações	
da rede, o requisito de observabilidade, sistema IEEE-14	60
Tabela 5.4 - Resultados obtidos considerando, para várias configurações da re	de, o
requisito de ausência de medidas críticas, sistema IEEE-14	62
Tabela 5.5 - Resultados com flexibilização de requisitos: ausência de medidas	s críticas
para a rede básica e observabilidade para outras (20) configuraçõe	es,
sistema IEEE-14	63
Tabela 5.6 - Resultados com flexibilização de requisitos: ausência de medidas	s críticas
para a rede básica e observabilidade para outras (10) configuraçõ	bes,
sistema IEEE-14	65
Tabela 5.7 - Resultados para o requisito de observabilidade, sistema IEEE-14	66
Tabela 5.8 - Resultado para o requisito de ausência de medidas críticas, sistem	na
IEEE-14	67
Tabela 5.9- Requisito de ausência de medidas críticas em várias configurações	da rede,
sistema IEEE-14	68
Tabela 5.10- Flexibilização de requisitos – vários cenários topológicos apenas	
observáveis, sistema IEEE-14	69
Tabela 5.11- Resultados para o requisito de observabilidade, Sistema A	71
Tabela 5.12- Resultado para o requisito de ausência de medidas críticas, Sister	na A 72
Tabela 5.13- Resultados para o requisito de observabilidade, Sistema B	74
Tabela 5.14- Resultados para o requisito de ausência de medidas críticas, Siste	ema B 75
Tabela 5.15- Resultados considerando o requisito de observabilidade para	
várias configurações da rede, Sistema B	76

Tabela 5.16-	Resultado considerando o requisito de ausência de medidas críticas para	
	várias configurações da rede, Sistema B	77
Tabela 5.17-	Resultados para o requisito de observabilidade, Sistema C	80
Tabela 5.18-	Resultados atendido o requisito de ausência de medidas críticas,	
	Sistema C	81
Tabela 5.19-	Resultados considerando o requisito de observabilidade para diferentes	
	configurações, Sistema C	83
Tabela 5.20-	Resultados considerando a ausência de medidas críticas, para diferentes	
	configurações, Sistema C	84
Tabela 5.21-	Resultados para o requisito de observabilidade (3 UTRs pré-definidas),	
	Sistema C	86
Tabela 5.22-	Custo obtido com Pmeds e ausência de medidas críticas, Sistema A	89
Tabela 5.23-	Custo obtido com Pmeds e ausência de medidas críticas, cenário base,	
	Sistema B	90
Tabela 5.24-	Custo obtido com Pmeds e ausência de medidas críticas, vários cenários,	
	Sistema B	91
Tabela 5.25-	Custo obtido com Pmeds e ausência de medidas críticas, cenário base,	
	Sistema C	93
Tabela 5.26-	Custo obtido com Pmeds e ausência de medidas críticas, cenário base,	
	Sistema C	94
Tabela 5.27-	Custo comparativo – Sistema A	96
Tabela 5.28-	Custo comparativo – Sistema B, cenário base	96
Tabela 5.29-	Custo comparativo – Sistema B, vários cenários	96
Tabela 5.30-	Custo comparativo – Sistema C, cenário base	97
Tabela 5.31-	Custo comparativo – Sistema C, vários cenários	97

nb	número de barras
m	número de medidas
n	número de variáveis de estado
Z	vetor das medidas
X	vetor de estado
^ X	vetor de estado filtrado
^ Z	vetor de medidas filtradas
h	vetor das funções não lineares que relaciona x e z
8	vetor de erros ou incertezas nas medidas
R	matriz de covariância de ϵ
E{.}	operador valor esperado
Н	matriz jacobiana
G	matriz ganho
r	vetor dos resíduos
r _N	resíduo normalizado
E	matriz de covariância dos resíduos
U	matriz identidade
\mathbf{C}_{med}	custo dos medidores a instalar
C _{UTR}	custo das remotas a instalar
C _{obs}	penalidade imposta a planos de medição não observáveis
N _{Cmed}	número de medidas críticas presentes em um plano de medição
C _{Cmed}	penalidade associada à presença de medidas críticas.
Nmed _{conj}	número total de medidas pertencentes a conjuntos críticos
C_{Cconj}	penalidade associada à presença de conjuntos críticos
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
EE	Estimação de Estado
EED	Estimação de Estado em Distribuição

COS	Centro(s) de Operação de sistemas
EGs	Erros Grosseiros
MQP	Mínimos Quadrados Ponderados
UTR	Unidade Terminal Remota
Pmed	Pseudomedida
AGs	Algoritmos Genéticos
SGD	Sistema de Gerenciamento da Distribuição

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

Nos últimos anos, o setor elétrico vem enfrentando desafios relacionados principalmente à busca pela prestação de um serviço de melhor qualidade. Em sistemas de distribuição, tais desafios parecem ser maiores, necessitando-se para transpô-los investimentos em automação e telemedição, bem como em centros de operação. Tudo isto requer o desenvolvimento de novas metodologias que levem em conta características específicas das redes de distribuição.

O crescente interesse pela automação de sistemas de distribuição – alcançada através da supervisão e controle de diversos dispositivos envolvidos na operação de subestações e ramais de distribuição – deve-se ao sucesso de projetos-piloto que indicaram sua viabilidade e potenciais benefícios. Agora na fase de implementação, a seleção, priorização e integração de certas funções automáticas ganharam importância ainda maior [Brow91], como, por exemplo: localização e isolamento de defeitos; restauração e reconfiguração do sistema através do chaveamento de ramais de distribuição; controle de tensão; gerenciamento de carga (medição remota, tarifação em tempo-real, etc.).

Entretanto, sabe-se que o sucesso na implementação destas funções depende da qualidade da supervisão do sistema a ser controlado. Logo, a supervisão do sistema deve ser a primeira função a ser automatizada, sendo a obtenção do estado de operação da rede de distribuição tarefa essencial, ponto de partida para posterior análise, tomada de decisões e implementação de ações de controle.

O aumento da complexidade dos sistemas de distribuição, aliada à necessidade de implementar funções de automação igualmente complexas, faz com que a tomada de decisões a

partir apenas de um conjunto de grandezas medidas diretamente (*cruas*, sem processamento) e de dados históricos de carga não seja compatível com a nova concepção dos centros de operação da distribuição. As funções a serem implementadas devem utilizar uma base de dados construída em tempo-real, de forma precisa e confiável, a partir da qual seja possível supervisionar uma determinada área de interesse para a operação. A disponibilização desta base de dados é tarefa de uma função avançada conhecida por Estimação de Estado. Tal função responde pelo processamento de um conjunto redundante de medidas, de modo a se obter em tempo-real uma estimativa confiável do estado de operação do sistema, para uma determinada configuração da rede elétrica. A configuração atual da rede sob supervisão se torna conhecida pela execução de um programa configurador que processa informações relativas às conexões físicas dos elementos que compõem a rede e aos estados (aberto/fechado) destes (telessinalizações). Conhecida a configuração da rede, passa-se à obtenção do estado operativo do sistema pelo estimador de estado. Portanto, o processo supervisão-controle-automação de sistemas de distribuição requer a implementação da função Estimação de Estado (EE) [Baran94].

O problema do planejamento de sistemas de medição para fins de supervisão em tempo-real é bastante complexo. Isto decorre não apenas da dimensão do problema (de natureza combinatória, em razão do elevado número de possíveis configurações do sistema de medição), como também da necessidade de se estabelecer um compromisso entre o desempenho do Estimador de Estado (avaliado principalmente em função da confiabilidade das estimativas obtidas) 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 centro de operação para processamento.

Por razões econômicas, o número de grandezas monitoradas e integradas ao sistema SCADA pode ser pequeno em sistemas de distribuição. Entretanto, através da combinação de um plano de medição mínimo e da utilização de pseudomedidas adequadamente escolhidas, pode-se disponibilizar para o Estimador de Estado um conjunto de informações que permita a supervisão em tempo-real (obtenção do estado de operação mais provável, para uma determinada

configuração da rede) do sistema de distribuição com a confiabilidade necessária à execução das funções de automação desejadas.

Portanto, deve-se construir uma metodologia para a automação de sistemas de distribuição que trate da definição de pontos de medição e geração de pseudomedidas complementares para a supervisão em tempo-real. Esta metodologia deve levar em conta requisitos como o custo do sistema de medição e a observabilidade da rede, devendo ser capaz de propor um conjunto mínimo de medidas, indicando seu tipo e localização, necessárias para atender tais requisitos.

A seguir, passa-se a descrever um resumo do desenvolvimento histórico da pesquisa em Estimação de Estado em redes de distribuição, para então se apontar perspectivas de solução deste problema tão desafiador quanto complexo.

1.2 Desenvolvimento Histórico

Os centros de operação atuais retratam 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 sistemas de gerenciamento de redes de distribuição através de programas aplicativos. 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 dispositivos de chaveamento.

Nos últimos anos, a forma de atuação dos centros de operação da distribuição tem sofrido várias transformações, disso resultando a necessidade do emprego de novas tecnologias que atendam adequadamente aos requisitos de supervisão, automação e controle [EPRI84, SR86, He00, Ozay99, Toms00]. A complexidade das operações realizadas aumentou significativamente, entre outros motivos, devido a [Mira95]:

- entrada em operação de produtores independentes, conectados diretamente à rede de distribuição;
- necessidade de um melhor gerenciamento da demanda por parte das companhias de energia elétrica;
- inovações na tecnologia de proteção;
- necessidade de atender às expectativas do ambiente competitivo fomentado no setor elétrico.

Em termos gerais, os centros de operação da distribuição deverão estar capacitados para [Gjen99, Toms00]:

- tratar grandes quantidades de dados, de diversos tipos;
- integrar as funções dos atuais sistemas SCADA;
- realizar cálculos básicos de análise de redes (previsão de carga, fluxo de potência e curtocircuito);
- otimizar estratégias de operação, e.g. controle de tensão e perdas;
- disponibilizar funções de planejamento;
- integrar funções que permitam assistir o operador, se possível de forma automática, na realização de ações de chaveamento e frente à ocorrência de defeitos;
- gerenciar a demanda;
- realizar funções avançadas como a Estimação de Estado.

Assim, os centros de controle da distribuição passaram a requerer a utilização de funções antes exclusivas de sistemas de nível de tensão mais elevados como, por exemplo, a supervisão em tempo-real. Tal supervisão basea-se fundamentalmente na função Estimação de Estado que apesar de bem definida e possível de ser implementada em sistemas de transmissão [Cout90, Cout99], encontra alguns desafios para seu desenvolvimento em sistemas de distribuição. Dentre estes, destacam-se [Li96, Pere99]:

- insuficiência de medidas de potência. Podem ser encontradas algumas medidas de corrente, porém com informação apenas de magnitude;
- redes a supervisionar de dimensões bastante elevadas;

- redes com freqüentes alterações de configuração;
- inviabilidade econômica de se realizar o planejamento de um sistema de medição adequadamente redundante.
- conectados ao sistema de distribuição encontram-se atualmente um número cada vez maior de pequenas unidades geradoras, muitas delas pertencentes a produtores independentes privados.

Em [Lu95, Meli96], são apresentados algoritmos de Estimação de Estado aplicados a redes de distribuição. Estes algoritmos se baseiam na análise trifásica do problema e todas as medidas disponíveis são convertidas em intensidade de corrente. O tratamento de medidas de potência, além de medidas de tensão e injeções de corrente é proposto em [Baran94], sendo ressaltada ainda a importância da utilização das medidas coletadas em tempo-real para melhorar a qualidade de previsões utilizadas como pseudomedidas. Em [Li96,Mira95], a utilização do Método dos Mínimos Quadrados Ponderados, solidamente estabelecido para a Estimação de Estado em sistemas de transmissão, é proposta para sistemas de distribuição.

A existência de poucas telemedidas em sistemas de distribuição pode ser compensada pela integração de declarações lingüísticas fornecidas por peritos, tratadas pela teoria de conjuntos nebulosos [Kauf88, El-H98]. Em [Mira95, Pere99] foi apresentado um algoritmo de Estimação de Estado que permite obter descrições imprecisas das variáveis de estado, de fluxos de potência e de intensidades de corrente, especificando descrições imprecisas de diversas grandezas de entrada tais como potências ativas, reativas e magnitudes de tensão. Outros métodos baseiam-se no aumento da redundância através da obtenção de modelos estatísticos que descrevem o comportamento das cargas e outras grandezas de interesse, a partir do comportamento histórico destas variáveis [Ghos97, Royt93].

As perspectivas para o desenvolvimento de pesquisa em Estimação de Estado em sistemas de distribuição apontam principalmente para três direções, a seguir descritas.

• Modelagem

A função Estimação de Estado pode ser considerada hoje como um aplicativo fundamental e razoavelmente bem desenvolvido para a supervisão de sistemas de transmissão [Jamn96]. Várias técnicas têm sido usadas para a obtenção da solução do problema de estimação, como se pode encontrar no levantamento apresentado nas referências [Wu90, Cout90, Bose87]. O mesmo espera-se que venha acontecer em sistemas de distribuição, a partir do reconhecimento do potencial que a função Estimação de Estado apresenta para a supervisão de tais sistemas. Consideradas as características específicas de sistemas de distribuição, algoritmos de Estimação de Estado apropriados devem ser investigados para permitir uma adequada supervisão em temporeal da distribuição e atender os requisitos para a implementação de funções de automação que se fizerem necessárias.

Os métodos até então propostos para a Estimação de Estado de sistemas de distribuição baseiam-se no processamento de informações compostas por um conjunto de medidas (nem sempre facilmente disponíveis em sistemas de distribuição) e de um conjunto de pseudomedidas obtidas por diferentes técnicas. Essas pseudomedidas são muitas vezes dependentes de modelos obtidos a partir de históricos da operação do sistema, podendo não ser adequadas para representar as condições de operação que se apresentam em tempo-real. O futuro da pesquisa na área de Estimação de Estado para sistemas de distribuição aponta para o desenvolvimento de métodos que sejam eficientes e confiáveis, capazes de processar com sucesso as informações disponibilizadas neste ambiente. Portanto, a obtenção destas informações deve ser alvo de investigação cuidadosa.

Técnicas para a Alocação de Carga

A baixa quantidade de medidores presente nos sistemas de distribuição acarreta a busca por informações adicionais, usualmente de natureza qualitativa, que permitam o processamento adequado da função estimação de estado. Dentre as linhas de pesquisa de maior produção pode-se destacar a alocação de valores para as cargas em nós do sistema onde não existam medidores instalados. As técnicas apontadas como as mais promissoras empregam análise estatística ou lógica nebulosa [Mira96], extraindo informação de dados históricos da operação do sistema e/ou conhecimento qualitativo dos operadores [Kuo93, Ghos97, Mira00a]. Novos modelos, utilizando

estas ou outras técnicas, deverão ainda ser investigados visando a obtenção de representações cada vez mais apuradas, que possam ser consideradas com ponderação adequada frente às medidas coletadas pelo sistema SCADA, durante o processo de estimação de estado. Neste sentido, técnicas de previsão que possam utilizar informações das medidas coletadas em temporeal são apontadas como ferramentas interessantes para melhorar a qualidade do conjunto de informações adicionais [Baran94] e, conseqüentemente, do processo de Estimação.

Planejamento de Sistemas de Medição

Nos últimos anos, ficou evidente a destacada e reconhecida importância que as funções de automação possuirão em um centro de operação da distribuição. Porém, pouca importância tem sido dada ao desenvolvimento de métodos que permitam obter em tempo-real as informações necessárias para a implementação de tais funções [Baran96]. O objetivo principal de um método de planejamento do sistema de medição [Clem90] é determinar o *número*, *localização* e *tipo* de medidores a ser instalados para se realizar, a partir da função Estimação de Estado, a supervisão em tempo-real do sistema. A correta supervisão do sistema confere confiabilidade à implementação das demais funções de automação.

Aspectos financeiros limitam o *número* de medidores que podem ser instalados em sistemas de distribuição. Assim, em geral, a medição existente é insuficiente em quantidade e inadequada *em tipo* e *localização* para que seja realizado o processamento eficiente da função Estimação de Estado. Disso resultou o interesse pela obtenção de pseudomedidas, para suprir deficiências em telemedição. Dessa maneira, constata-se a necessidade de se investigar métodos para o planejamento de sistemas de medição que observem uma relação de compromisso entre custo e a qualidade da informação disponível para se proceder à supervisão em tempo-real da distribuição. O sistema básico de medição deve ser projetado de modo a considerar a possibilidade de uso de pseudomedidas para, quando necessárias, compor o conjunto de informações a ser processado. As áreas de interesse para a supervisão também podem ser levadas em consideração durante a investigação dos métodos para planejamento da medição. Isto permite reduzir a complexidade do problema em análise e otimizar a alocação dos recursos disponíveis.

Os aspectos mencionados impõem desafios para a eficiente implementação da função Estimação de Estado para sistemas de distribuição e, conseqüentemente, para a plena utilização das funcionalidades que devem estar presentes em um Sistema de Gerenciamento da Distribuição (SGD). Novas estratégias devem ser concebidas para lidar com as dificuldades inerentes ao processo de supervisão da rede de distribuição. Dentre tais estratégias destaca-se o planejamento de sistemas de medição com a utilização de pseudomedidas para fornecer um nível de redundância adequado á execução da Estimação de Estado.

1.3 Objetivo do Trabalho

A presente Dissertação apresenta uma metodologia para tratar o problema da alocação de pontos de medição para a supervisão de sistemas de distribuição através da função Estimação de Estado. A metodologia proposta se caracteriza pela obtenção de uma distribuição de pontos de medição (considerando tipo, localização e número de medidores) que: conduza a estimativas confiáveis do estado operativo do sistema; permita a supervisão de toda a rede de interesse; apresente o menor custo possível. A técnica de otimização escolhida para tratar o problema foi a dos Algoritmos Genéticos por sua flexibilidade e simplicidade de implementação. Resultados numéricos de estudo de simulação referentes á aplicação da metodologia proposta a diversos sistemas-teste são apresentados e discutidos.

1.4 Estrutura da Dissertação

Este trabalho consta de 6 Capítulos:

O Capítulo 2 apresenta uma revisão de aspectos básicos do problema de Estimação de Estado em Centro de Operações de Sistemas.

O Capítulo 3 aborda as principais características dos Algoritmos Genéticos, técnica utilizada como ferramenta principal na formulação do problema de Alocação de Pontos de Medição para Sistemas de Distribuição.

O Capítulo 4 apresenta aspectos particulares ao problema da Alocação de Pontos de Medição para Sistemas de Distribuição por intermédio de uma função objetivo que incorpora requisitos de custo e redundância.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados de simulações realizadas com a metodologia proposta.

O Capítulo 6 apresenta as principais conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

ESTIMAÇÃO DE ESTADO

2.1 Introdução

A Estimação de Estado em sistemas de potência foi introduzida por Schweppe [Schw70], sendo hoje uma ferramenta encontrada em qualquer Sistema de Gerenciamento de Energia (SGE).

A Estimação de Estado 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, que permita o conhecimento das condições de operação do sistema elétrica.

A implementação da função EE fornece ao operador condições de:

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

A EE atua como um filtro para suavizar erros estatisticamente pequenos, corriqueiros, inerentes à medição, bem como, e principalmente, suprimir erros grosseiros (EGs) eventuais, causados por funcionamento inadequado do sistema de aquisição de dados. Ainda, como parte do processo de estimação, determina-se a configuração atual da rede elétrica e sua observabilidade. Para cumprir tal objetivo, o processo de EE requer fundamentalmente medidas redundantes

(fluxos e injeções de potência, magnitudes de tensão) e indicações corretas de *status* de chaves/disjuntores da rede.

2.2 Etapas da Estimação de Estado

Basicamente, são quatro as etapas da EE em sistema de potência: Pré-filtragem, Observabilidade, Filtragem e Análise de Resíduos.

Etapa 1:Pré-filtragem

Realiza-se a verificação de limites e aceitabilidade dos valores das grandezas medidas em relação aos estados dos equipamentos de chaveamento, de maneira a eliminar medidas com erros muito grosseiros e corrigir eventuais falhas na configuração da rede.

Etapa 2: Observabilidade

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

Etapa 3: Filtragem

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

Etapa 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.

Duas bases de dados são usualmente processadas pelo Estimador de Estado.

Base de dados estática:

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

Base de dados dinâmica:

- Magnitude de tensão e corrente;
- Injeção de potência ativa e indutiva;
- Fluxo de potência ativa e reativa;
- Estados das 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 sequência de etapas do processo de EE descritas anteriormente.



Figura 2.1 – Etapas básicas do processo de EE

2.3 Estimação de Estado Não Linear

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

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

onde:

z – vetor de medidas, de dimensão (m x 1); m = número de medidas;

h (.) – vetor de funções não-lineares, de dimensão (m x 1), que relacionam o estado verdadeiro com medidas não corrompidas;

x – vetor de estado, de dimensão (nx1), representando módulos e ângulos das tensões nodais;

n = 2nb - 1 (uma barra do sistema é considerada como referência angular e, portanto, seu ângulo não faz parte do processo de estimação); nb = número de barras da rede;

 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 [$\varepsilon \cdot \varepsilon^{T}$] = diag. (σ_{i}^{2}), sendo E [.] o operador valor esperado e σ_{i}^{2} , a variância da i-ésima medida.

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

$$J(x) = \sum_{i=1}^{m} \varepsilon_{i}^{2} \cdot \alpha_{i} = \sum_{i=1}^{m} (z_{i} - h_{i}(x))^{2} \alpha_{i}$$
(2.2)

Sendo:

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

Em notação matricial:

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

O problema consiste em obter uma estimativa para o estado \hat{x} que minimize a função objetivo, isto é:

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

Uma vez estabelecida a função-ojetivo, para minimizá-la a seguinte condição deve ser atendida:

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

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

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

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

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

onde:

i = contador de iterações; $K = G^{-1} H^{T} R^{-1}$ $G = [H^{T} R^{-1} H] matriz Ganho, avaliada em x = x^{i};$ $H = \partial h/\partial x, matriz Jacobiano.$

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

2.4 Estimação de Estado Linear

O Estimador de Estado linear é utilizado para resolver problemas de natureza qualitativa ou estrutural, no sentido que depende essencialmente da configuração do sistema de medição (número, tipo e distribuição topológica de medidores). Assim, tal classe de estimadores será aqui introduzida.

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, de dimensão (m x 1);

x – vetor de estado verdadeiro, de dimensão (n x1);

 ϵ - vetor de erros associados às medidas z;

H – matriz Jacobiana de dimensão (m x n), obtida através de linearização das equações de fluxo de potência.

A função objetivo, segundo o Método dos Mínimos Quadrados Ponderados tem a seguinte forma:

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

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

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

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

sendo:

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

A utilização de Estimadores Lineares é mais simples e apresenta um baixo custo computacional e pode ser atraente para a análise de observabilidade e identificação de medidas e conjuntos críticos, problemas que podem ser enfocados sob 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 [Mont85a,b].O sucesso do processo de EE depende da disponibilidade de um conjunto de medidas em quantidade suficiente e bem distribuídas pela rede.

Se n variáveis devem ser observadas, então deverão existir pelo menos n equações linearmente independentes relacionando tais variáveis. A análise da observabilidade consiste portanto 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 (ilhas observáveis) é possível estimar o estado;
- escolher um conjunto mínimo de pseudomedidas que permita estimar o estado de toda a rede.

Quando a rede não for observável como um todo, mas apenas em parte, essas partes são denominadas ilhas observáveis. É importante diferenciar o conceito de ilha observável do conceito de ilha física de um sistema. Uma ilha física é uma parte conectada de uma rede, que opera de forma independente em relação às demais ilhas do sistema. Uma ilha observável é uma ilha do sistema para a qual os fluxos de potência-corrente em todos os seus ramos podem ser calculados, a partir das medidas disponíveis. Logo, o sistema é dito observável se os fluxos de potência-corrente podem ser calculados em todos os ramos. É importante ressaltar que uma ilha física pode conter uma ou mais ilhas observáveis, além de um ou mais ramos e nós não observáveis. A utilização de pseudomedidas [Cout99] [Mira00] pode melhorar a observabilidade de uma ilha física ou até mesmo restaurar a observabilidade do sistema. Tais pseudomedidas são informações adicionais que podem ser obtidas através de dados típicos/históricos, previsão de

carga, etc. Estas informações podem ser utilizadas como medidas fictícias em regiões da rede que apresentam deficiência de medição. Vale ressaltar que a redundância também é importante para a etapa de detecção e identificação de erros grosseiros nos dados recebidos.

A observabilidade de uma rede depende unicamente do conjunto de medidas disponíveis para a EE, de sua localização geográfica e da topologia da rede, independentemente das condições de operação. Durante a supervisão em tempo real, este conjunto de medidas pode ainda sofrer alterações devido a problemas tais como: falhas no sistema de telecomunicações, perdas de unidades terminais remotas; perdas de telemedidas; descarte de medidas com erros grosseiros e mudanças na topologia da rede.

Existem duas abordagens para a realização da análise da observabilidade [Mont99]. A primeira utiliza uma análise topológica, enquanto que outra 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.

Aqui, serão comentados apenas algoritmos numéricos, por serem mais simples e utilizarem rotinas de calculo já construídas para o problema de EE.

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

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

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

Fluxo P_{ik}: H(l,i) = b_{ik} Injeção P_i: H(l,i) = $\sum_{k} b_{ik}$, i≠k H(l,k) = -b_{ik}

Sendo k = índice das barras ligadas à barra i.

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

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

Além da verificação binária (sim ou não), diferentes graus de observabilidade, associados ao nível de criticalidade das medidas processadas podem ser estabelecidos. A identificação de medidas e conjuntos críticos permite que se avalie 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 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, na qual a eliminação de qualquer medida a ele pertencente torna as demais críticas [Cout01].

2.6 Filtragem do Estado

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

$$H^{T}R^{-1}[z - h(\hat{x})] = 0$$
(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 em (2.14) e (2.15) são idênticas a (2.6) e (2.12), tem sido aqui repetidas para facilitar a leitura deste documento.

Aplicando o operador valor esperado a (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

A qualidade dos resultados obtidos pela EE depende da qualidade da base de dados utilizada para processamento. A presença de medidas contendo erros grosseiros 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 erros grosseiros em certas situações. Alguns desses procedimentos são:

- verificação do estado de chaves/disjuntores do circuito onde a medida de fluxo é tomada;
- comparação dos valores das medidas com limites de escala;
- comparação entre valores de fluxo nos dois extremos de um circuito;
Os procedimentos acima consistem de testes preliminares de consistência muito simples e capazes de descartar medidas cujos valores apresentam erros absurdos. Porém, em certos casos pode não ser possível identificar medidas com erro estatisticamente elevados utilizando tais procedimentos. Nesses casos, a detecção e identificação de medidas portadoras de erros grosseiros devem ser realizadas durante o processo de EE [Souz96].

No método dos mínimos quadrados ponderados a detecção da presença de uma ou mais medidas com erro grosseiro é realizada através de um teste que utiliza a função objetivo J(x).Na ausência de medidas com erros grosseiros, J(x) terá distribuição Chi-quadrado. Para realizar o teste em J(x) é calculado um parâmetro λ (nível de detecção) desta distribuição, sendo que:

- se $J(x) \le \lambda$, então não existem medidas com erros grosseiros;
- se $J(x) > \lambda$, então existem medidas com erros grosseiros;

O valor de λ é calculado definindo-se uma probabilidade de se tomar a decisão errada, isto é, considerar que não haja medidas com erros grosseiros, quando estes existem. Na prática, a distribuição Chi-quadrado é aproximada pela distribuição Normal.

2.8 Análise de Resíduos

Após a estimação das medidas realiza-se a avaliação da consistência dos resultados obtidos, através da análise dos resíduos, cujo objetivo é a verificação da presença de erros estaticamente elevados (erros grosseiros). A presença de erros grosseiros está relacionada a avarias ou funcionamento inadequado dos equipamentos de medição. O vetor dos resíduos da estimação \mathbf{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:

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

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

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

$$r_{N}(i) = \frac{|r(i)|}{\sigma_{F}(i)} \le \gamma$$
(2.20)

$$\boldsymbol{\sigma}_{E}(i) = \sqrt{E(i,i)} \tag{2.21}$$

onde $\mathbf{\sigma}_{E}(i)$ 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 erros grosseiros.

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

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

2.9 Conclusões

Neste capítulo foram descritas as principais etapas envolvidas no processo de Estimação de Estado. Conforme foi discutido, a redundância dos dados a serem processados é um requisito fundamental para o sucesso de qualquer projeto e implementação da função EE em COS. Em situações de baixa redundância, a capacidade de processar eficientemente erros grosseiros ou até mesmo estimar o estado do sistema pode ser comprometida. Em geral, tais situações estão associadas à presença de medidas e conjuntos críticos ou perda de observabilidade do sistema.

CAPÍTULO 3

ALGORITMOS GENÉTICOS

3.1 Introdução

Charles Darwin introduziu a idéia da "Teoria da Evolução", onde afirma que as espécies naturais vão evoluindo para adaptar-se ao meio em que vivem. Aqueles indivíduos que melhor se adaptarem terão maior probabilidade de sobrevivência até a idade adulta e procriar, fazendo assim com que suas características genéticas passem de geração em geração.

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

Antes do desenvolvimento dos AGs, diversos cientistas da computação utilizavam-se formalmente de outros sistemas evolucionários para resolver problemas de otimização em engenharia [Mitch96]. Posteriormente, a inovação em submeter, seqüencialmente, um conjunto de indivíduos a um vetor de operações ditas genéticas [Gold89], distinguiu os AG dos algoritmos evolucionários até então existentes.

Algumas vantagens a eles comumente associadas são: i) possibilitam busca global em funções multimodais; ii) permitem o tratamento simultâneo de variáveis reais e inteiras; iii) dispensam a avaliação de derivadas, sendo aplicáveis a funções não diferenciáveis ou não convexas. Por outro lado, em decorrência de sua natureza probabilística, não há garantia da obtenção da solução ótima, já tendo sido relatadas simulações nas quais um ótimo local, não global, foi obtido [Gold89].

Segundo [Mitch96], o sucesso ou insucesso dos AG depende da sua capacidade em equilibrar dois objetivos aparentemente antagônicos: i) exploração de várias regiões do domínio; ii) perpetuação das informações contidas na população vigente.

Estudos valiosos de cunho tanto experimental quanto teórico têm sido desenvolvidos no sentido de melhorar o entendimento dos operadores genéticos. Por bastante tempo, o Teorema Fundamental dos Algoritmos Genéticos [Hol75] constituiu a base teórica para análise dos AGs, entretanto este teorema tem limitações que são pouco perceptíveis à primeira vista. De fato, alheios a algumas sutilezas presentes no Teorema Fundamental dos Algoritmos Genéticos, usuários dos AGs valeram-se, indevidamente, deste teorema para justificar alguns de seus resultados.

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

Outra linha de pesquisa bastante explorada consiste na investigação experimental dos operadores genéticos, cujos primeiros relatos datam da proposição dos algoritmos.

3.2 Conceitos Básicos sobre Algoritmos Genéticos

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

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

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

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

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

$$Max f(x)$$

 $s/a g_i(x) = 0, \quad i = 1, 2, ..., m$
 $h_j(x) \le 0, \quad j = 1, 2, ..., r$
 $x \in S$

Onde:

f(x) - função objetivo

 $g_i(x)$ - restrição de igualdade

h_i(x) - restrição de desigualdade

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

S - espaço de busca n-dimensional

Na representação de um problema busca-se codificar as informações de maneira análoga aos cromossomos biológicos. A maior parte das representações são genotípicas, utilizando vetores de tamanho finito e um alfabeto finito. Na representação através de vetores binários, cada elemento de um vetor denota a presença (1) ou ausência (0) de uma determinada característica (genótipo). Estes elementos também podem ser combinados formando as características reais do individuo (fenótipo). Na representação em vetores binários, as operações padrão podem ser utilizadas, facilitando o seu emprego em diferentes classes de problemas.

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

3.3 Funcionamento dos Algoritmos Genéticos

O princípio básico do funcionamento dos Algoritmos Genéticos é que um critério de seleção vai fazer com que, depois de muitas gerações, o conjunto inicial de indivíduos gere indivíduos mais aptos. A maioria dos métodos de seleção são projetados para escolher preferencialmente indivíduos com maiores notas de aptidão, embora não exclusivamente, a fim de manter a diversidade da população.

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





Figura 3.2 Processamento de um Algoritmo Genético

Este processo consiste dos seguintes passos:

1. É gerada uma população inicial aleatoriamente.

2. Avaliação dos indivíduos da população de acordo com a função aptidão (ou fitness).

3. Verifica-se se já algum critério de parada já é satisfeito (normalmente um número máximo de gerações).

4. Executam-se as operações de seleção, cruzamento e mutação para gerar uma nova população.

5. A nova população voltará a ser avaliada conforme o passo 2.

3.4 Processamento de um Algoritmo Genético

Como vimos anteriormente, um Algoritmo Genético possuí várias tarefas que precisam ser feitas para solucionar problemas e agora você vai entender qual a função de cada um.

3.5 Módulo de Avaliação

O módulo de avaliação é onde se encontra a ligação entre o algoritmo e o problema sendo resolvido. Neste módulo a função de avaliação (*fitness*) é responsável por determinar o grau de aptidão dos indivíduos, o qual é determinado através do cálculo da função objetivo do problema de otimização que foi formulado.

3.6 Módulo de Estruturação

Responsável pelas seguintes tarefas:

a. Representação

Dados representados através de codificação em um alfabeto finito (ex: binário), facilitando o processo de seleção e reprodução dos indivíduos.

b. Inicialização

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

c. Seleção dos pais

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

$$\boldsymbol{P}_{sel}(\boldsymbol{S}_{si}) = \frac{\boldsymbol{a}(\boldsymbol{S}_{i})}{\sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{a}(\boldsymbol{S}_{i})}$$
(3.1)

3.6.1 Técnica Universal ou por Roleta

Inicialmente proposto por Goldberg [Gold89]. É um método bastante simples que consiste em criar uma roleta na qual cada cromossomo possui um segmento proporcional à sua aptidão. Suponhamos uma população de 6 cromossomos cuja aptidão é dada por uma função qualquer (neste caso é simplesmente a conversão de binário para decimal) conforme mostrado na Tabela 3.1.

Cromossomo nº	String	Aptidão	% do total
1	0101101	45	13,2
2	1011001	89	26,2
3	1111101	125	36,7
4	0010101	21	6,1
5	0110100	52	15,2
6	0001001	9	2,6
	Total	341	100,0

Tabela 3.1 - Exemplo para ilustrar a seleção por roleta

Com os valores percentuais constantes na quarta coluna da tabela, pode-se elaborar a roleta constante da Figura 3.3. Esta roleta irá ser girada 6 vezes para efetuar a seleção da população auxiliar (amostra) levando em conta que, os indivíduos com maior área na roleta tem, conseqüentemente, maiores chances de serem selecionados mais vezes que os indivíduos menos aptos.



Figura 3.3 Representação gráfica da roleta

3.6.2 Técnica por Torneio

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

É comum se adotar também estratégias de seleção que levem em conta o elitismo, onde se busca garantir que o melhor (ou melhores) indivíduos de uma geração estarão presentes na geração seguinte. Neste caso, tais indivíduos são sempre selecionados e simplesmente copiados para a próxima geração.

3.6.3 Módulo de Reprodução

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

Mutação

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

$$\boldsymbol{P}_{mut}^{t} = \boldsymbol{P}_{mut}^{t-1} \times \exp^{-\boldsymbol{C}_{mut} \times ger}$$
(3.2)

Onde:

 P_{mut}^{t} é a probabilidade de mutação na geração t;

 C_{mu} é uma constante que define a taxa de decréscimo da probabilidade de mutação;

ger é o numero da geração

A mutação na representação binária é realizada pela troca de um por zero e vice-versa, conforme pode ser notado na Figura 3.3.



Figura 3.4 Exemplo de mutação

Cruzamento em um ponto

O operador de cruzamento em um ponto corresponde a uma divisão do material genético dos pais em um ponto aleatório para misturá-los e gerar o novo cromossomo que pertencerá ao filho. A seleção natural responde pelo ajuste dos cromossomos e a seleção dos pais, enquanto que a mutação e o cruzamento respondem pela diversidade genética dos filhos.

Uma observação importante a respeito do cruzamento é que se podem gerar filhos completamente diferentes dos pais e mesmo assim contendo diversas características em comum. Outra questão é que o cruzamento não modifica um bit na posição em que os pais têm o mesmo valor, considerada uma característica cada vez mais importante com o passar das gerações.

Um exemplo deste operador pode ser visto na seguinte figura:



Figura 3.5 Exemplo de operador de cruzamento de um ponto

São utilizados também algumas variações desta técnica onde pode haver troca de material genético entre os indivíduos em vários pontos, comumente chamado de Cruzamento em Vários Pontos e um outro que não utiliza pontos de cruzamento, mas determina, através de um parâmetro global, qual a probabilidade de cada variável ser trocada entre os pais, chamado Cruzamento Uniforme.

3.6.4 Técnica de Deleção

Está implícita na rotina de cruzamento e mutação. Quando o vetor de população recebe os filhos resultantes da reprodução dos pais escolhidos, a população anterior é automaticamente destruída.

3.6.5 Elitismo

A técnica mais utilizada para melhorar a convergência dos AGs é a reprodução elitista, que tem como objetivo prevenir que os melhores indivíduos não desapareçam da população pela manipulação dos operadores genéticos, assim esta técnica força ao AG reter um certo número de "melhores" indivíduos para ser colocados na próxima geração. Uma outra técnica muito utilizada é a reprodução por gerações, em que a nova geração substitui inteiramente o lugar da primeira.

3.7 Parâmetros Genéticos

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

3.7.1 Tamanho da População

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

3.7.2 Taxa de Cruzamento

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

3.7.3 Taxa de Mutação

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

3.8 As Diferenças entre os AGs e os Métodos Tradicionais

A seguinte lista é uma breve descrição das diferenças essenciais entre AGs e outras técnicas de otimização.

- Os algoritmos genéticos utilizam uma forma codificada dos valores de uma função, em vez dos valores reais. Esse tipo de codificação apresenta inúmeras vantagens no decorrer do processo de otimização, tornando as operações genéticas mais fáceis de serem executadas;
- 2. Os algoritmos genéticos usam um conjunto, ou população, de pontos para conduzir uma busca e não somente um ponto isolado do espaço de busca. Isto dá aos AGs a capacidade de pesquisar em espaços ruidosos com vários pontos ótimos locais. Os AGs observam diferentes áreas do espaço do problema de uma só vez e usam todas estes informações para se guiarem, permitindo uma melhor busca pelo ótimo global.
- 3. Os algoritmos genéticos usam somente informações geradas por si mesmos para se guiarem pelo espaço de busca. Muitas outras técnicas necessitam de uma grande variedade de informações para se guiarem. O método *hill-climbing* requer derivadas, por exemplo. A única informação utilizada pelos AGs é uma medida de adaptabilidade de cada ponto no espaço (as vezes conhecida como valor da função objetivo). Uma vez conhecido este valor sobre um ponto, os AGs podem usá-lo para continuar a busca pelo valor ótimo.

- 4. Os algoritmos genéticos possuem natureza probabilística, não determinística. Isto é resultado direto das técnicas randômicas usadas pelos AGs.
- Os algoritmos genéticos são inerentemente paralelos. Este é um dos mais importantes e poderosos aspectos dos AGs. Desta maneira tratam um grande número de pontos (strings) simultaneamente.

3.9 Conclusões

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

CAPÍTULO 4

ALOCAÇÃO DE PONTOS DE MEDIÇÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

4.1 Introdução

A Estimação de Estado (EE) torna-se um valioso aplicativo computacional apenas se processar dados redundantes. 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 (usualmente, magnitudes e ângulos das tensões das barras da rede). A redundância de medidas é avaliada levando-se em conta a quantidade, tipo e posicionamento na rede de pontos de medição, visando atender requisitos, tais como:

- *Observabilidade* de forma a permitir que o sistema seja supervisionado como um todo;
- Confiabilidade para tornar possível a detecção, identificação e supressão de erros grosseiros;
- *Qualidade* de modo a garantir certo nível de precisão para as grandezas estimadas;
- Robustez para assegurar que os requisitos anteriores (observabilidade, confiabilidade e qualidade) ainda sejam atendidos, caso haja indisponibilidade de medidas, atribuída a situações tais como: reconfiguração da rede, funcionamento inadequado do sistema de aquisição de dados, manutenção, etc.

A tarefa de avaliação de sistemas de medição é 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, como também ao caráter antagônico existente entre requisitos de redundância e custo de investimentos.

A localização de pontos de medição em redes de distribuição pode ser entendida como um problema de otimização, já que consiste em se obter uma solução que minimize os custos de investimento em aquisição de dados/instalação de unidades terminais remotas (UTRs) e permita a supervisão da rede. É possível estabelecer, através da metodologia a ser apresentada, uma relação

de compromisso entre os recursos disponíveis para investimento e a qualidade da supervisão da rede.

As características inerentes aos sistemas de distribuição, notadamente a dimensão da rede e escassez de recursos para a alocação de número suficiente de UTRs e medidores faz com que se faça uso de um número significativo de pseudomedidas. A proposição de uma estratégia que permite tratar adequadamente a introdução de Pmeds para fins de supervisão é parte do presente trabalho.

4.2 Níveis de Redundância de um Sistema de Medição

Durante a operação, níveis de redundância inferiores à redundância de projeto são atingidos, refletindo a perda de medidas causada por: desligamentos, falha dos canais de comunicação ou eliminação de erros grosseiros. Até certo nível de redução da redundância, um bom plano de medição preserva os requisitos de observabilidade, confiabilidade e qualidade anteriormente mencionados. Entretanto, devido à tendência atual de redução de investimento, níveis de deterioração da redundância têm sido mais freqüentemente alcançados. Tais níveis, descritos a seguir, correspondem a violações dos requisitos de projeto da redundância, acarretando problemas de natureza cumulativa, principalmente para estimadores estáticos de estado.

<u>1º Nível de deterioração</u>

Este nível é caracterizado pela perda de qualidade do estado/medidas estimadas. Os requisitos de observabilidade e confiabilidade são preservados.

<u>2º Nível de deterioração</u>

A presença de conjuntos críticos apenas (nenhuma medida crítica) indica ingresso no 2° nível de deterioração da redundância. 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.

<u>3º Nível de deterioração</u>

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 a ausência da mesma 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.

4.2.1 Observabilidade da Rede

Diz-se que um sistema elétrico é observável quando - para uma determinada configuração da rede elétrica e um conjunto de medidas disponíveis - consegue-se determinar o fluxo de potência em todos os circuitos da rede.

A observabilidade topológica de uma rede elétrica depende do elenco de medidas disponíveis para a estimação de estado, considerando tipo, número e distribuição na rede dos pontos de medição [Sarm94].

Além da verificação binária (sim ou não) já mencionada no Capítulo 2, diferentes graus de observabilidade, associados ao nível de criticalidade das medidas processadas podem ser estabelecidos. A identificação de medidas e conjuntos críticos permite que se avalie 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 disponível para processamento tornar o sistema não observável.

Estes aspectos são importantes para o planejamento de sistemas de medição, conforme será detalhado adiante.

4.2.2 Medidas Críticas

Medidas críticas em um plano de medição podem ser identificadas através de certas propriedades numéricas dos resíduos da estimação. Seja r o vetor de resíduos, definido como a diferença entre o valor medido e o correspondente valor estimado:

$$r=z-\hat{z} \tag{4.1}$$

$$r=z-h(\hat{x}) \tag{4.2}$$

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:

$$E = R - H (H^{T} R^{-1} H)^{-1} I H^{T}$$
(4.3)

Uma medida crítica não tem redundância e, portanto, apresenta resíduo e respectivo desvio nulos. Numericamente, identifica-se uma *medida i* como *crítica* por:

$$r(i) = z(i) - \hat{z}(i) = 0 \tag{4.4}$$

$$\sigma_E(i) = \sqrt{E(i,i)} = 0 \tag{4.5}$$

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

4.3 Alocação de Pontos de Medição

O problema apresenta-se como o de minimização de investimentos, atendendo a restrições que permitirão o bom desempenho da Estimação de Estado. O problema de otimização alvo deste trabalho pode então ser formulado como:

$$\begin{array}{l}
\text{Min} \left(C_{med} + C_{UTR}\right) \\
\text{s/a requisitos de desempenho}
\end{array}$$
(4.6)

onde:

 C_{med} – custo dos medidores a instalar C_{UTR} – custo das remotas a instalar

Na composição de custos é levada em consideração a alocação de medidores em pontos onde já exista ou não uma UTR. Isto tem diferentes implicações na agregação de custos durante o processo de busca pela solução ótima, como será comentado adiante.

O problema pode então ser formulado como:

$$Min (C_{med} + C_{UTR})$$
s/a requisito de observabilidade
s/a requisito de ausência de medidas críticas
$$(4.7)$$

O problema apresentado em (4.7) é tratado de forma que o atendimento aos requisitos pode ser feito apenas parcialmente. A flexibilização do atendimento aos requisitos permite uma melhor exploração da relação de compromisso entre o custo de investimentos e a qualidade do plano de medição (do ponto de vista da supervisão da rede).

A supervisão da rede sob diferentes condições de topologia também é abordada. Ao contrário dos sistemas de transmissão, esta consideração é particularmente importante para os sistemas de distribuição, onde alterações topológicas ocorrem com maior freqüência.

A consideração dos requisitos de desempenho e da supervisão para diferentes configurações topológicas tem impacto direto sobre o nível de redundância do plano de medição e conseqüentemente sobre seu custo, permitindo assim a realização de análises do tipo custo *versus* benefício para os sistemas em análise.

O problema de localização de pontos de medição em redes de distribuição, formulado em (4.7), é de natureza combinatória, sendo adequado para a solução através de algoritmos de busca global, como por exemplo os algoritmos genéticos.

4.4 Atendimento aos Requisitos de Desempenho

Conforme foi discutido anteriormente, os AGs necessitam apenas do valor da funçãoobjetivo para guiar o processo de busca pela solução ótima. Logo, tal função deve refletir adequadamente o compromisso entre custo e restrições a serem atendidas. Na formulação proposta neste trabalho, os requisitos considerados são: observabilidade e ausência de medidas críticas. O requisito ausência de conjuntos críticos foi deixado de lado para se projetar inicialmente planos de medição com custos mais compatíveis com os esperados para redes de distribuição. Em cada caso, a função de aptidão (objetivo) pode ser construída conforme descrito a seguir.

4.4.1 Requisito de Observabilidade

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

$$Min \left(C_{med} + C_{UTR} + k * C_{obs}\right) \tag{4.8}$$

onde C_{obs} é uma penalidade imposta a planos de medição não observáveis, para os quais se faz k = 1; para cenários observáveis faz-se k= 0.

4.4.2 Ausência de Medidas Críticas

A incorporação deste requisito é feita da seguinte forma:

$$Min \left(C_{med} + C_{UTR} + N_{Cmed} * C_{Cmed}\right) \tag{4.9}$$

onde N_{Cmed} representa o número de medidas críticas presentes em um plano de medição proposto; C_{Cmed} representa uma penalidade associada à presença de medidas críticas.

A vantagem da utilização de N_{Cmed} na formulação apresentada é que isto permite avaliar adequadamente as aptidões de cromossomos que representam cenários onde medidas críticas

estão presentes em maior ou menor quantidade. Note que o requisito de ausência de medidas críticas só pode ser verificado para sistemas observáveis.

A penalidade C_{Cmed} tem a função de forçar o atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas. Um valor muito elevado para esta penalidade implica em um valor também muito elevado para a função custo a ser minimizada em (4.9). Neste caso, a minimização da função custo se dará com a eliminação das medidas críticas e, conseqüentemente, com maior redundância e maior custo do plano de medição, com mais UTRs e medidores. Por outro lado, um baixo valor para a penalidade C_{Cmed} pode não garantir a obtenção de um plano de medição sem medidas críticas, porém com menor custo de investimento em UTRs e medidores. No limite, com $C_{Cmed} = 0$, existe apenas a preocupação com a observabilidade da rede. Neste caso a solução ótima obtida indicará a quantidade mínima de UTRs e medidores (com as respectivas localizações) que garanta a observabilidade, porém com todas as medidas sendo críticas (imprescindíveis).

Pode-se depreender da discussão sobre a penalidade C_{Cmed} que esta é responsável pela flexibilização no atendimento aos requisitos de desempenho. A atribuição de diferentes valores para C_{Cmed} leva a diferentes relações de compromisso entre o custo do plano de medição (quantidade de UTRs e medidores) e o atendimento aos requisitos de desempenho. Isto é particularmente importante quando existem restrições de investimento, devendo-se projetar o plano de medição mais adequado com os recursos disponíveis.

4.5 Atendimento às Diferentes Condições Topológicas

Nos sistemas de distribuição, alterações topológicas na rede ocorrem freqüentemente. Portanto, é interessante que o atendimento aos requisitos de desempenho ocorra não apenas para uma única configuração da rede, mas para um conjunto de configurações de interesse. O atendimento aos requisitos de redundância para diferentes configurações da rede leva o problema a ser formulado como descrito a seguir.

4.5.1 Requisito de Observabilidade

O problema (4.8) passa a ser formulado como:

$$Min \left[C_{med} + C_{UTR} + \sum_{i=1}^{NC} (k_i * C_{obs}(i)) \right]$$
(4.10)

onde *NC* é o número total de configurações de interesse, considerando-se $k_i = 1$ se a i-ésima configuração for não observável e $k_i = 0$ caso contrário.

4.5.2 Ausência de Medidas Críticas

O problema (4.9) passa a ser formulado como:

$$Min \left[C_{med} + C_{UTR} + \sum_{i=1}^{NC} (N_{Cmed}(i) * C_{Cmed}(i)) \right]$$
(4.11)

onde N_{Cmed} (i) representa o número de medidas críticas presentes no plano de medição proposto quando se opera na i-ésima configuração topológica e C_{Cmed} (i) representa a penalidade associada à presença de medidas críticas em tal cenário.

4.5.3 Função Aptidão

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

$$Min \ FA = \left[\ C_{med} + C_{UTR} + \sum_{i=1}^{NC} \ \left[(k_i * C_{obs}(i)) + (N_{Cmed}(i) * C_{Cmed}(i)) \right]$$
(4.12)

A Função de Aptidão apresentada em (4.12) é geral e permite atender qualquer requisito de desempenho (observabilidade, ausência de medidas críticas), ressaltando que se considera

neste trabalho o atendimento a tais requisitos de forma cumulativa, ou seja, para um dado cenário o atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas pressupõe o atendimento ao requisito de observabilidade. Pode-se forçar cada cenário de interesse a atender um requisito específico.

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

As penalidades C_{obs} (i) e C_{Cmed} (i) podem ser utilizadas para flexibilizar o atendimento aos requisitos de desempenho nos diferentes cenários topológicos de interesse. Dessa maneira, é possível reduzir os custos de investimento, atendendo apenas parcialmente os requisitos de desempenho. A metodologia proposta permite que isto seja feito de forma controlada, utilizando a experiência e conhecimento sobre o sistema e também de acordo com políticas gerenciais. As seguintes observações podem ser feitas sobre o controle das relações custos de investimento *versus* qualidade da supervisão através do ajuste das penalidades C_{obs} (i) e C_{Cmed} (i):

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

A observação 1 refere-se à flexibilização do atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas em alguns cenários, significando que em tais cenários algumas medidas críticas podem estar presentes. Isto é automaticamente levado em consideração pela metodologia proposta, através da alocação ótima de UTRs e medidores na rede, visando atender o requisito de medidas

críticas nos cenários onde este não foi flexibilizado e permitindo a ocorrência de medidas críticas nos demais, sempre a um custo mínimo. O mesmo ocorre na flexibilização do requisito de observabilidade (observação 2), sendo que neste caso, tem-se uma redução ainda maior da quantidade de UTRs e medidores necessários. Porém, deve-se ter em mente que se abre mão de supervisionar toda a rede em alguns cenários.

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

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

4.6 Codificação do Plano de Medição

A solução de um problema de otimização via algoritmos genéticos requer a geração de sucessivas populações de indivíduos, onde cada nova população é melhor que as anteriores. Cada indivíduo da população (cromossomo) representa uma solução proposta para o problema sendo resolvido. No problema de alocação ótima de UTRs e medidores, cada cromossomo em uma população representa um plano de medição, ou seja, um conjunto de medidores e UTRs proposto como solução para o problema. Logo, cada plano de medição proposto (cromossomo) é representado através de um vetor onde cada posição está associada a um tipo de medidor e respectiva localização na rede. A dimensão de tal vetor corresponde portanto ao número máximo de medidores que podem vir a ser instalados, sendo dependente da rede em análise. Os elementos do vetor contém valores binários, assumindo valor igual a 1 quando o medidor correspondente faz parte do plano de medição proposto é obtido somando-se os custos individuais de cada medidor presente no cromossomo e os custos das UTRs necessárias para a instalação de tais medidores.

4.7 Consideração de Pontos Estratégicos para Telecomando

A automação de sistemas de distribuição envolve atividades de supervisão, análise e controle da operação. A supervisão em tempo-real é peça fundamental para a análise, tomadas de decisão e execução de ações de controle durante a operação de um sistema de distribuição. A metodologia formulada neste trabalho permite a determinação ótima da quantidade de UTRs e suas respectivas localizações na rede, até mesmo considerando o envio de telecomandos visando a realização de chaveamentos remotos e outras manobras de operação.

Isto é feito considerando que no plano de medição representado por um cromossomo (Seção 4.6), o custo da instalação de um ponto de medição onde uma UTR já deve estar presente para fins de controle, corresponde somente ao custo dos medidores. Dessa maneira, a

metodologia tende a indicar na solução ótima a instalação de medidores em tais UTRs, uma vez que elas já estarão presentes na rede.

4.8 Descrição da Metodologia

Com base nas considerações e aspectos discutidos sobre a alocação de pontos de medição para a supervisão de redes de distribuição, é proposta uma metodologia para a solução deste problema, consistindo dos seguintes passos:

- (i) Definir inicialmente:
 - \rightarrow configurações topológicas da rede de distribuição de interesse para o estudo;
 - → custos para aquisição/instalação de UTRs e medidores;
 - \rightarrow pontos do sistema onde já existem UTRs instaladas;
 - → pontos do sistema onde se deseja instalar UTRs para a realização de telecomandos;
 - \rightarrow pontos do sistema onde se deseja alocar pseudomedidas; e
 - → critério de desempenho desejado (Sugestão: atendimento completo aos requisitos de observabilidade e ausência de medidas críticas para todos os cenários de interesse).
- (ii) Codificação da estrutura do cromossomo, com base nos pontos do sistema onde é possível instalar UTRs e medidores:
- (iii) Execução do processo de busca pela solução ótima via algoritmos genéticos, consistindo dos seguintes passos básicos:
 - 1. definição dos parâmetros de controle do AG e penalidades associadas aos requisitos de desempenho ($C_{obs} e C_{Cmed}$).
 - 2. geração da população inicial (conjunto de soluções propostas cromossomos).

- *3. avaliação da população (análise de desempenho).*
- 4. se o número máximo de gerações pré-estabelecido foi atingido, escolhe-se o melhor cromossomo da população atual como a solução ótima do problema e encerra-se o algoritmo (ir para (iv)). Caso contrário, o algoritmo continua no passo 5.
- 5. geração de uma nova população através de operações genéticas sobre a população anterior. Retornar para o passo 3.
- (iv)Verificar se o custo do plano de medição representado pela solução ótima é aceitável para a empresa. Caso seja aceitável, o problema é encerrado. Caso contrário, continuar no passo (v).
- (v) Reformulação das condições de contorno do problema visando obter uma solução ótima de menor custo. Utilizar as seguintes estratégias:
 - \rightarrow redefinição dos cenários topológicos de interesse;
 - → flexibilização do atendimento aos requisitos de desempenho (conforme descrito na Seção 4.5.3);
 - \rightarrow utilização de um maior número de pseudomedidas.
- (vi)Voltar para o passo (iii).

4.9 Alocação de Pseudomedidas

Em algumas situações medidas virtuais, denominadas pseudomedidas, podem ser utilizadas em vez de se instalar fisicamente UTRs e medidores em certos pontos do sistema. As pseudomedidas, juntamente com o plano de medição base, compõem o conjunto de informações a serem processadas para a supervisão da rede. Portanto, para um determinado nível de redundância, a consideração de que pseudomedidas podem ser utilizadas permite que menos UTRs e medidores sejam necessários e, conseqüentemente, menores custos sejam atingidos. Diversas técnicas são propostas na literatura e podem ser adotadas para a geração de pseudomedidas [Cout99, Mira00]. Em geral, tais pseudomedidas podem ser alocadas em barras de passagem no sistema, onde se tem injeção nula de potência/corrente ou em pontos onde se dispõe de históricos de carregamento que permitam utilizar técnicas de alocação de medidas virtuais de cargas/fluxos. A decisão por utilizar pseudomedidas depende, portanto, da disponibilidade dos dados históricos sobre a operação da rede de distribuição, de forma a permitir a alocação de carga em tempo-real.

Do ponto de vista da metodologia para alocação de pontos de medição, a consideração prévia de que, em alguns pontos do sistema, informações serão colhidas na forma de pseudomedidas, é facilmente tratada. Isto é feito durante a definição e codificação do vetor que contém cada solução proposta codificada (cromossomo), discutido na Seção 4.6. Dentre as posições deste vetor, não existirão aquelas relacionadas às medidas que serão tratadas como pseudomedidas. É importante ressaltar, no entanto, que as pseudomedidas são consideradas como integrantes do conjunto de informações disponíveis durante o processo de análise de desempenho, ou seja, quando cada solução proposta é avaliada. Pode-se ainda interpretar a solução ótima obtida como uma indicação de pontos onde medidas ou pseudomedidas devam ser alocadas, sendo tal decisão baseada em aspectos técnico-financeiros.

Conforme mencionado anteriormente neste documento, o número de telemedidas em sistemas de distribuição tende a ser muito reduzido, o que dificulta o processo de estimação de estado. Isto se deve basicamente às restrições financeiras para investimento em UTRs e medidores em tais sistemas. Os planos de medição obtidos segundo a metodologia de alocação ótima proposta neste trabalho, ainda que apresentando custo reduzido, pode ser inviável devido a limitações de investimento. Porém, levando-se em conta que a metodologia proposta fornece a localização ótima das medidas necessárias para um dado desempenho desejado da função Estimação de Estado, tal informação pode servir de base para a adaptação do plano de medição, através da utilização de pseudomedidas, visando reduzir o custo de investimento.

A seguir é apresentado um procedimento para a redução do custo do plano de medição proposto, através da introdução de pseudomedidas de modo a que se mantenha a meta estabelecida para o desempenho da função EE. A partir do plano de medição ótimo obtido segundo a metodologia apresentada na Seção 4.8 e que deve ser adequado às restrições financeiras existentes, os seguintes passos devem ser adotados:

- (i) Substituir UTRs que contenham apenas uma medida de injeção por uma Pmed de injeção no mesmo ponto de medição, até que a restrição financeira estabelecida seja atendida. Caso isto não seja possível, continuar no passo (ii).
- (ii) Substituir UTRs que contenham apenas uma medida de fluxo por uma Pmed de injeção no mesmo ponto de medição, até que a restrição financeira estabelecida seja atendida. Caso isto não seja possível, continuar no passo (iii).
- (iii) Remover tantas UTRs quantas forem necessárias para atender à restrição financeira imposta, priorizando a remoção daquelas que contenham o menor número de medidas.
- (iv) Executar novamente o algoritmo apresentado na Seção 4.8, considerando como préexistente o plano de medição obtido após as etapas (i), (ii) e (iii), onde o cromossomo deve representar apenas pontos de medição onde será possível instalar medidas (Pmeds de injeção).

A solução ótima do problema resolvido no passo (iv) indicará o conjunto mínimo de Pmeds a serem alocadas de modo a compensar a remoção de UTRs realizada.

Quando o número de UTRs que podem ser removidas nos passos (i), (ii) e (iii) for maior que o necessário para atingir a redução de custo desejada, alguns aspectos de interesse prático podem ser levados em consideração, dentre os quais podem-se citar:

• manter as UTRs de interesse para fins de telecomando;

- preservar as UTRs localizadas em áreas cuja supervisão é de maior interesse para a operação;
- eliminar UTRs em áreas da rede onde se disponha de informações suficientes para a geração de Pmeds de qualidade.

4.10 Conclusões

A localização de pontos de medição para a supervisão em tempo real de sistemas de distribuição foi tratada como um problema de otimização, onde certos requisitos importantes para a boa supervisão da rede são atendidos a um mínimo custo. Os requisitos considerados foram a observabilidade da rede e a ausência de condições críticas de observabilidade, representada pela ausência de medidas críticas. O processo de busca pela solução ótima é realizado utilizando-se um algoritmo genético. A metodologia usada é flexível e apresenta como principais características:

- liberdade para a definição dos elementos que compõem o custo de projeto, podendo incluir os referentes a UTRs, medidores, instalação, sistema de aquisição de dados e outros.
- utilização de parâmetros (penalidades) que permitem controlar o processo de busca visando obter uma solução que não viole um limite pré-estabelecido para investimentos em supervisão e ao mesmo tempo seja ótima. O ajuste das penalidades pode ser feito de forma a modelar conhecimento qualitativo sobre o sistema ou decisões gerenciais e possibilita a flexibilização controlada das restrições do problema, de modo a adequar os custos de projeto.
- possibilidade de levar em consideração de forma simples outras informações qualitativas, tais como a necessidade de UTRs para telecomando e utilização de pseudomedidas.
- não necessita de um estimador de estado para a avaliação das soluções propostas.

CAPÍTULO 5

SIMULAÇÕES E TESTES

Este capítulo apresenta resultados de simulações utilizando a metodologia para a alocação ótima de pontos de medição em redes de distribuição de energia elétrica.

Inicialmente serão apresentadas as simulações para a alocação ótima de UTRs e medidores para diferentes redes, considerando diversos requisitos e aspectos mencionados no Capítulo 4. Simulações considerando a redução de custo através da utilização de pseudomedidas também são apresentadas, sendo adotada a estratégia de alocação de pseudomedidas descrita na Seção 4.8.

5.1 Alocação de Pontos de Medição

A metodologia para a localização de UTRs em redes de distribuição foi testada utilizando o sistema IEEE 14 barras (referência para estudos de pesquisa em Estimação de Estado) e mais três sistemas com estrutura radial típica. Nos testes descritos a seguir, foram consideradas estratégias próprias à consecução de objetivos distintos estabelecidos para o planejamento de sistemas de medição, buscando-se sempre uma relação de compromisso entre recursos disponíveis para investimento e confiabilidade da supervisão da rede.

No processo de busca utilizando Algoritmos Genéticos (AGs), a inicialização dos cromossomos foi sempre aleatória e os parâmetros de controle considerados foram: probabilidade de cruzamento; probabilidade de mutação; tamanho da população; número máximo de gerações; operações de seleção; operações de cruzamento; elitismo. Os fatores de penalidade adotados para forçar o atendimento aos requisitos de redundância foram:

• Observabilidade: $C_{obs} = 10^6$;

• Ausência de medidas críticas: $C_{Cmed} = 10^4$.

A escolha de tais valores foi feita visando atender cada requisito do problema de forma individual e cumulativa.

Nas simulações realizadas, em alguns casos partiu-se de um plano de medição vazio, sem UTRs instaladas, e em outros considerou-se UTRs pré-existentes. Além disso, foram considerados casos onde havia a previsão de instalação de UTRs em pontos específicos da rede para fins de telecomando e de supervisão.

Em relação à avaliação de custos relativos [Capd02], os seguintes valores expressos em unidades monetárias foram adotados: \$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.

5.1.1 Simulações com o Sistema IEEE-14 Barras

A configuração da rede do sistema IEEE-14 barras e 20 ramos está ilustrada na Figura 5.1. Cada cromossomo é representado através de um vetor de 54 posições, onde cada posição corresponde a uma localização na rede elétrica onde pode ser instalado um tipo de medidor. Portanto, 40 posições do vetor representam possíveis medidas de fluxo de potência (uma por extremidade de cada um dos 20 ramos) e as 14 posições restantes possíveis medidas de injeção de potência em cada barra da rede. A instalação de medidas de magnitude de tensão e corrente pode ser definida após a alocação de UTRs, sem comprometer a solução ótima obtida.

Nas diversas simulações realizadas, tanto com o sistema IEEE-14 como com os demais sistemas apresentados adiante, diferentes escolhas de requisitos de redundância, métodos de seleção, tipos de cruzamento e tamanhos da população foram testados, conforme descreve-se a seguir:
- Probabilidade de cruzamento: 0,5 a 0,9
- Probabilidade de mutação: 0,02 a 0,10
- Tamanho da população: 50 e 100 cromossomos
- Número máximo de gerações: 200, 500 e 1000
- Métodos de seleção: torneio e roleta
- Tipos de cruzamento: uniforme e 1 ponto
- Elitismo: sempre considerado



Figura 5.1 - Configuração da rede do sistema IEEE-14

Teste 1: atendimento ao requisito de observabilidade

Neste teste, considerou-se que o sistema de medição deveria ser projetado de modo a atender o requisito de observabilidade para a configuração básica da rede. Os resultados referentes à solução ótima obtida estão apresentados na Tabela 5.1 e ilustrados na Figura 5.2.

N° de UTRs	N°de Medidores	Custo (\$)
4	13	458,50

Tabela 5.1 – Resultados com o requisito de

observabilidade, sistema IEEE-14

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



Figura 5.2 – Requisito de observabilidade, sistema IEEE-14

Teste 2: Atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas

Este teste visa obter um sistema de medição que garanta o atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas para a configuração básica da rede. Neste caso, o módulo de análise de desempenho avaliará se em cada plano de medição proposto é possível não apenas observar a rede como um todo, mas também evitar a presença de medidas críticas. Os resultados referentes à solução ótima obtida para este caso estão na Tabela 5.2 e ilustrados na Figura 5.3.

Tabela 5.2 – Resultados para o requisito deausência de medidas críticas, sistema IEEE-14

N°de UTRs	N°de Medidores	Custo (\$)
6	14	663,00



Figura 5.3 – Requisito de ausência de medidas críticas, sistema IEEE-14

A solução ótima apresentada indica um plano de medição onde não existem medidas críticas na rede ilustrada na Figura 5.3. Para este cenário, pode-se ainda observar a rede mesmo com a perda de medidas. Como o atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas está sendo verificado apenas para a configuração básica da rede, não se pode garantir que esta continue a ser observada no caso de algum circuito (ramo) sair de operação.

Teste 3: Atendimento ao requisito de observabilidade (mais de um cenário topológico de interesse)

Na simulação realizada neste teste, busca-se um plano de medição que garanta a observabilidade da rede básica, assim como de um conjunto de cenários topológicos de interesse (aqueles obtidos com a saída de operação de um ramo da rede por vez). Os resultados referentes à solução ótima obtida são apresentados na Tabela 5.3 e ilustrados na Figura 5.4.

Tabela 5.3 – Resultados obtidos considerando, para várias configurações da rede, o requisito de observabilidade, sistema IEEE-14

N° de UTRs	N° de Medidores	Custo (\$)
8	14	863,00

O custo associado à solução ótima supera aquele obtido no Teste 1, visto que para o presente caso necessita-se de redundância mais elevada para garantir a observabilidade da rede não apenas para sua configuração básica, mas também para o conjunto de outras configurações definidas como de interesse para a operação (e.g., "critério n-1").



Figura 5.4–Requisito de observabilidade para várias configurações da rede, sistema IEEE-14

Teste 4: Atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas (para um conjunto de cenários topológicos de interesse)

Neste teste, o requisito de ausência de medidas críticas (conseqüentemente o de observabilidade) deve ser atendido para todas as configurações da rede definidas como de interesse. O módulo de análise de desempenho avalia para todos os cenários topológicos, com cada plano de medição proposto, se é possível observar a rede como um todo, evitando também a presença de medidas críticas. Os resultados referentes à solução ótima obtida são apresentados na Tabela 5.4 e na Figura 5.5.

N° de UTRs	N° de Medidores	Custo (\$)
8	18	881,00

Tabela 5.4 – Resultados obtidos considerando, para várias configurações da rede, o requisito de ausência de medidas críticas, sistema IEEE-14

O custo associado à solução ótima é superior ao obtido no Teste 2, visto que agora necessita-se de uma maior redundância para garantir que não existirão medidas críticas em nenhum cenário topológico de interesse. O custo obtido ainda é superior também ao obtido no Teste 3, onde apenas a observabilidade da rede era requerida. O benefício deste investimento adicional é que, em qualquer cenário topológico de interesse, pode-se continuar a observar a rede mesmo na ocorrência da perda de medidas.



Figura 5.5 – Requisito de ausência de medidas críticas para várias configurações da rede, sistema IEEE-14

Teste 5: Flexibilização dos requisitos de desempenho

Neste teste, o problema de planejamento do sistema de medição é formulado, flexibilizando-se o atendimento aos requisitos de desempenho, de tal forma que o requisito de observabilidade é atendido em todos os cenários topológicos, mas o atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas só é exigido para a configuração básica da rede. Os resultados referentes à solução ótima obtida são apresentados na Tabela 5.5 e Figura 5.6.

Tabela 5.5 – Resultados com flexibilização de requisitos: ausência de medidas críticas para a redebásica e observabilidade para outras (20) configurações , sistema IEEE-14

N° de UTRs	N° de Medidores	Custo (\$)
8	14	863,00

Os resultados obtidos mostram uma pequena redução no custo do plano de medição proposto, já que não é mais exigida redundância adicional para garantir a ausência de medidas críticas nos outros cenários de interesse. É possível garantir apenas que, caso qualquer ramo da rede saia de operação, esta ainda pode ser observada.

Comparando-se os resultados dos Testes 3 e 5, nota-se que, para o mesmo custo total, planos distintos de medição foram encontrados, sendo aquele ilustrado na Figura 5.6 mais atraente, já que não há medidas criticas na rede básica.



Figura 5.6 – Flexibilização dos requisitos de desempenho: ausência de medidas críticas para a rede básica e observabilidade para outras (20) configurações, sistema IEEE-14

Teste 6: 10 configurações da rede de interesse

Neste teste, analisa-se o impacto sobre o custo do sistema de medição causado pela redução de 20 para 10 do número de configurações de rede adicionais de interesse (além da rede básica). Os cenários de interesse são todos aqueles derivados da saída de operação de um dos seguintes ramos: {(1-2),(3-4),(4-5),(4-9),(5-6),(6-13),(7-9),(9-14),(10-11),(12-13)}. Os resultados apresentados a seguir na Tabela 5.6 e Figura 5.7 referem-se à solução ótima obtida quando se considerou o atendimento ao requisito de medidas críticas no cenário base e ao requisito de observabilidade nos demais. Tal situação é semelhante a apresentada no Teste 5, quando 20 cenários topológicos foram considerados.

Tabela 5.6 – Resultados com flexibilização de requisitos: ausência de medidas críticas paraa rede básica e observabilidade para outras (10) configurações, sistema IEEE-14.

N° de UTRs	N° de Medidores	Custo (\$)
6	14	663,00
12	13	14
	1 10	9
_		
	5	4
2		3
Legenda: - Medidor de fluxo de p	potência	

Figura 5.7 – Flexibilização dos requisitos de desempenho: ausência de medidas críticas para a rede básica e observabilidade para outras (10) configurações, sistema IEEE-14

Os resultados obtidos mostram que, com a redução do número de cenários de interesse para supervisão, foi possível obter um plano de medição com 2 UTRs a menos que o plano de medição obtido no Teste 5. Isto permitiu reduzir significativamente o custo total do plano de medição proposto.

Novamente, encontrou-se um plano de medição mais atrente do que aquele obtido no Teste 2, para um mesmo custo total.

Teste 7: Análise considerando 4 UTRs já definidas para instalação

Aqui, considera-se que se decidiu instalar para fins de telecomando, UTRs em 4 pontos específicos da rede. Os Testes 1, 2, 4 e 5 foram repetidos para esta condição. Os resultados obtidos são apresentados nas Tabelas 5.7 a 5.10 e ilustrados nas Figuras 5.8 a 5.11. Admite-se que tais UTRs estejam localizadas nas barras 7, 8, 10 e 11.

Requisito de observabilidade (repetição do Teste 1)

Tabela 5.7 - Resultados para o requisito de observabilidade, sistema IEEE-14

N° de UTRs	N° de Medidores	Custo (\$)
6	13	758,50



Figura 5.8 - Requisito de observabilidade (rede básica), sistema IEEE-14

Requisito de ausência de medidas críticas (repetição do Teste 2)

Tabela 5.8 – Resultado para o requisito de ausência de medidas críticas, sistema IEEE-14

N° de UTRs	N° de Medidores	Custo (\$)
6	14	763,00



Figura 5.9 – Ausência de medidas críticas (rede básica), sistema IEEE-14

Requisito de ausência de medidas críticas (repetição do Teste 4)

Tabela 5.9 – Requisito de ausência de medidas críticas em várias configurações da rede, sistema IEEE-14

N° de UTRs	N° de Medidores	Custo (\$)
9	18	1081,00



Figura 5.10 – Ausência de medidas críticas (várias configurações de interesse), sistema IEEE-14

Flexibilização dos requisitos de desempenho (repetição do Teste 5)

Tabela 5.10 – Flexibilização de requisitos –

vários cenários topológicos apenas observáveis, sistema IEEE-14

N° de UTRs	N° de Medidores	Custo (\$)
8	14	963,00



Figura 5.11 – Flexibilização dos requisitos de desempenho (vários configurações de rede de interesse apenas observáveis), sistema IEEE-14

Os resultados apresentados nas Tabelas 5.7 a 5.10 mostram que os custos obtidos em cada caso são superiores aos obtidos quando não se considerou a priori que UTRs deveriam ser instaladas em pontos específicos do sistema (Tabelas 5.1, 5.2, 5.4 e 5.5). Isto se deve ao fato de que pré-definir a instalação de UTRs representa tornar ainda mais restrito o problema a ser

resolvido. As novas restrições impedem que as soluções ótimas atingidas nos Testes 1, 2, 4 e 5 sejam repetidas. Assim, a metodologia proposta busca obter uma solução ótima, levando em conta as novas restrições. Isto está ilustrado nas Figuras 5.8 a 5.11, onde é possível observar que existe uma tendência de se alocar medidores nas UTRs pré-definidas. Além disso, os novos custos obtidos são menores do que os que seriam obtidos considerando-se as soluções ótimas dos Testes 1, 2, 4 e 5, acrescidas das UTRs pré-definidas.

5.1.2 Simulações com o Sistema A

O sistema teste A [Garc01], ilustrado na Figura 5.12, contém 37 nós e 36 ramos. Cada cromossomo é representado por um vetor de 109 posições (37 injeções e 72 fluxos), correspondentes às diversas localizações na rede elétrica onde se podem instalar medidores.



Figura 5.12 – Sistema Teste A – configuração básica

Teste 1: Atendimento ao requisito de observabilidade

Neste teste, considerou-se que o sistema de medição deveria ser projetado de modo a atender o requisito de observabilidade para a rede da Figura 5.12. Os resultados referentes à solução ótima obtida estão apresentados na Tabela 5.11 e ilustrados na Figura 5.13.

N° de UTRs	N° de Medidores	Custo (\$)
13	37	1466,50

ĺ î l Л Legenda: - Medidor de Fluxo 📔 - Medidor de injeção

Tabela 5.11 – Resultados para o requisito de observabilidade, Sistema A

Figura 5.13 – Requisito de observabilidade, Sistema A

A solução apresentada mostra que foi possível obter um sistema de medição que permite a supervisão da rede como um todo, i.e. a rede é completamente observável. Pode-se ainda mencionar que a solução encontrada é ótima, pois busca concentrar medidores em poucos pontos da rede, minimizando assim o número de UTRs necessárias e, conseqüentemente, o custo associado.

Teste 2: Atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas

Com este teste objetiva-se encontrar um sistema de medição que garanta o atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas, o que permite aumentar a confiabilidade do processo de supervisão da rede pelo Estimador de Estado. Neste caso, o módulo de análise de desempenho a cada plano proposto avalia se é possível observar a rede como um todo, assim como se não há medidas críticas. Os resultados referentes à solução ótima obtida para este caso estão apresentados na Tabela 5.12 e ilustrados na Figura 5.14.

Tabela 5.12 - Resultado para o requisito de ausência de medidas críticas, Sistema A

N° de UTRs	N° de Medidores	Custo (\$)
13	38	1471,00

A solução ótima apresentada indica um plano de medição onde não existem medidas críticas, ou seja, pode-se ainda observar a rede mesmo no caso da perda de medidas.



Figura 5.14 – Requisito de ausência de medidas críticas, Sistema A

5.1.3 Simulações com o Sistema B

O sistema teste B, ilustrado na Figura 5.15, contém 37 nós e 38 ramos. Cada cromossomo é representado através de um vetor de 113 posições, onde 76 posições do vetor representam possíveis medidas de fluxo de potência e 37 posições representam possíveis medidas de injeção de potência.



Figura 5.15 – Sistema Teste B – configuração básica

Teste 1: Atendimento ao requisito de observabilidade

Neste teste considerou-se que o sistema de medição deveria ser projetado de modo a atender o requisito de observabilidade para a configuração da rede representada pela Figura 5.15. Os resultados referentes à solução ótima obtida estão apresentados na Tabela 5.13 e ilustrados na Figura 5.16.

N°de UTRs	N°de Medidores	Custo (\$)
20	37	2166,50

Tabela 5.13 – Resultados para o requisito de observabilidade, Sistema B

A solução obtida mostra um sistema de medição que permitirá a supervisão da rede, atendendo ao requisito de observabilidade para a rede básica. Desta forma, não se pode garantir que a rede continue a ser supervisionada completamente caso ocorra alguma alteração de configuração.



Figura 5.16 – Requisito de observabilidade, Sistema B

Teste 2: Atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas

O objetivo deste teste é obter um sistema de medição que garanta o atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas para a rede básica. Neste caso, o módulo de análise de desempenho irá avaliar para cada plano de medição proposto se é possível observar a rede plenamente, como também se medidas críticas estão presentes. Os resultados referentes à solução ótima obtida para este caso estão apresentados na Tabela 5.14 e ilustrados na Figura 5.17.

N° de UTRs	N° de Medidores	Custo (\$)
20	49	2220,50

Tabela 5.14 - Resultados para o requisito de ausência de medidas críticas, Sistema B

A solução ótima apresentada indica um plano de medição onde não existem medidas críticas para a configuração básica da rede ilustrada na Figura 5.15. Para este cenário, pode-se ainda observar a rede mesmo com perda de medidas. Como o atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas está sendo forçado apenas para a rede básica, não se pode garantir que a rede continue a ser supervisionada com a mesma confiabilidade no caso de alguma alteração de topologia.



Figura 5.17 – Requisito de ausência de medidas críticas, Sistema B

Teste 3: Atendimento ao requisito de observabilidade (para várias configurações de rede)

Neste teste considerou-se que o sistema de medição deveria ser projetado de modo a atender o requisito de observabilidade da rede para mais de um cenário topológico. As configurações de rede de interesse no sistema B são representadas pelas seguintes situações:

- 1) chaves 312, 825 abertas e chaves 34, 1112, 1125 fechadas.
- 2) chaves 34, 312 abertas e chaves 825, 1112, 1125 fechadas.
- 3) 312, 1125 abertas e chaves 34, 825, 1112 fechadas.
- 4) chaves 825, 1112 abertas e chaves 34, 312, 1125 fechadas.

A situação descrita nesta simulação requer um plano de medição que garanta a observabilidade do sistema não apenas quando este opera com a rede básica, mas também para um conjunto de configurações de interesse. Neste caso, o módulo de análise de desempenho deve avaliar para todos os cenários topológicos de interesse se, com cada plano de medição proposto, é possível observar a rede como um todo. Os resultados referentes à solução ótima obtida são apresentados na Tabela 5.15 e ilustrados na Figura 5.18. É importante ressaltar que o plano de medição apresentado na Figura 5.18 atende ao requisito de observabilidade não apenas para aquele ilustrado, mas para todos obtidos a partir dos chaveamentos acima listados.

Tabela 5.15 – Resultados considerando o requisito de observabilidade para várias configurações da rede, Sistema B

N° de UTRs	\mathbf{N}^{o} de Medidores	Custo (\$)
23	39	2475,50

O custo associado à solução ótima é superior ao obtido no Teste 1, visto que agora maior redundância é requerida para garantir que a rede será observável não apenas para um único cenário topológico, mas para um conjunto de cenários topológicos de interesse. Porém, devido a capacidade de busca pela solução ótima, tal incremento de redundância pode ser considerado pequeno.



Figura 5.18 – Requisito de observabilidade (várias configurações de rede), Sistema B

Teste 4: Atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas para várias configurações de rede

Neste teste, o requisito ausência de medidas críticas, e conseqüentemente o de observabilidade, deve ser atendido para todos os cenários topológicos de interesse. Neste caso, o módulo de análise de desempenho avalia para todos os cenários topológicos de interesse se, com cada plano de medição proposto, é possível não apenas observar a rede como um todo, mas também se medidas críticas estão presentes. Os resultados referentes à solução ótima obtida são apresentados na Tabela 5.16 e na Figura 5.19.

Tabela 5.16 – Resultado considerando o requisito de ausência de medidas críticas para várias configurações da rede, Sistema B

N° de UTRs	\mathbf{N}^{o} de Medidores	Custo (\$)
23	53	2538,50

O custo associado à solução ótima é superior ao obtido no Teste 2, visto que agora maior redundância é requerida para garantir que não existirão medidas críticas em nenhum cenário topológico de interesse. O custo obtido ainda é superior também ao obtido no Teste 3, onde apenas a observabilidade da rede era requerida. O benefício deste investimento adicional é que se pode continuar a observar a rede mesmo na ocorrência de perda de medidas, considerando os cenários topológicos de interesse.



Figura 5.19 - Requisito de ausência de medidas críticas (várias configurações), Sistema B

5.1.4 Simulações com o Sistema C

O sistema teste C, ilustrado na Figura 5.20, contém 55 nós e 62 ramos. Cada cromossomo é representado através de um vetor de 179 posições, onde 124 posições do vetor representam possíveis medidas de fluxo de potência e 55 posições representam possíveis medidas de injeção de potência.

Diversas simulações foram realizadas com o sistema C, onde se considerou que UTRs estivessem previamente instaladas nas barras 1 e 36.



Figura 5.20 – Sistema teste C – configuração básica

Teste 1: Atendimento ao requisito de observabilidade

Neste teste considerou-se que o sistema de medição deveria ser projetado de modo a atender o requisito de observabilidade da rede, ou seja, permitir a supervisão em tempo-real, através da Estimação de Estado, do perfil de tensão ao longo de todo o alimentador, assim como dos fluxos de potência e de corrente e perdas elétricas em cada trecho do mesmo. Os resultados referentes à solução ótima obtida estão apresentados na Tabela 5.17 e ilustrados na Figura 5.21.



Tabela 5.17 – Resultados para o requisito de observabilidade, Sistema C

Figura 5.21 – Requisito de observabilidade – rede básica, Sistema C

A solução apresentada mostra que foi possível obter uma configuração de medidores que permitirá a supervisão da rede como um todo, atendendo assim ao requisito de observabilidade. Além disso, verifica-se que esta configuração é ótima quanto à quantidade de medidas, já que um conjunto mínimo de medidores foi alocado. Assim como ocorreu com os outros sistemas estudados na seções anteriores, pode-se notar que a metodologia empregada tende a concentrar medidores em poucos pontos da rede, minimizando assim o número de UTRs necessárias (28 UTRs, dentre 55 possíveis) e, consequentemente, o custo associado.

Teste 2: Atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas

Neste teste, deseja-se obter um plano de medição que garanta o atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas, tornando possível a supervisão em tempo-real de toda a rede, através da Estimação de Estado, mesmo na ocorrência de perda de medidores. Tais situações podem ocorrer devido a avarias/ manutenção de medidores, falhas nos canais de comunicação, perda de UTRs, etc. Os resultados referentes à solução ótima obtida para este caso estão apresentados na Tabela 5.18 e ilustrados na Figura 5.22.

Tabela 5.18 – Resul	tados atendio	do o requisito de	•
ausência de me	didas críticas	s, Sistema C	

N° de UTRs	N° de Medidores	Custo (\$)
28	75	3137,50



Figura 5.22 – Requisito de ausência de medidas críticas – rede básica, Sistema C

Teste 3: Consideração de chaveamentos na rede

Neste teste considerou-se que o plano de medição deveria permitir a supervisão da rede (observabilidade) não apenas para a rede básica, mas também quando da ocorrência de chaveamentos. Para ilustrar esta situação, as seguintes possibilidades de chaveamento na rede foram consideradas:

- a) abertura da chave 1-4 e fechamento da chave 2-3;
- b) abertura da chave 15-16 e fechamento da chave 11-13;
- c) abertura da chave 7-11 e fechamento da chave 11-13.

Para a situação descrita neste teste, foram obtidos dois planos de medição: um deles atende apenas o requisito de observabilidade da rede, mesmo na ocorrência dos chaveamentos acima descritos, enquanto o outro atende não apenas o requisito de observabilidade, mas também o requisito de ausência de medidas críticas. Os resultados obtidos são apresentados nas Tabelas 5.19 e 5.20 e ilustrados nas Figuras 5.23 e 5.24, respectivamente.

Tabela 5.19 – Resultados considerando o requisito de observabilidade para diferentes configurações, Sistema C

N° de UTRs	N° de Medidores	Custo (\$)
29	55	3147,50

A solução ótima apresentada indica um plano de medição onde se garante a observabilidade da rede mesmo no caso de ocorrência dos chaveamentos descritos. Comparando os resultados da Tabela 5.19 e Figura 5.23 com os obtidos no Teste 1 (Tabela 5.17 e Figura 5.21) pode-se observar que o plano de medição foi redefinido para o atendimento a outras configurações da rede, porém apenas uma UTR e um medidor a mais foram necessários. É possível notar que existe uma tendência de se alocar UTRs em pelo menos um dos nós terminais dos circuitos que podem ser chaveados. Isto pode ser explicado pelo fato de que a medição em tais pontos é importante para mais de uma configuração da rede, podendo permitir o atendimento ao requisito de observabilidade local para mais de um cenário de interesse, sem que seja necessária a alocação de outra UTR próxima a esta para que tal objetivo seja atingido. Observa-se também que não foi proposta a instalação de medidores de fluxo nas seções manobráveis, o que se explica pelo fato de que estas medidas não são úteis para o processo de supervisão quando tais seções estiverem desenergizadas.



Figura 5.23 – Requisito de observabilidade (diferentes configurações), Sistema C

Tabela 5.20 – Resultados considerando a ausência de medidas críticas, para diferentes configurações, Sistema C

N° de UTRs	N° de Medidores	Custo (\$)
29	77	3246,50



Figura 5.24-Requisito de ausência de medidas críticas (diferentes configurações), Sistema C

Comparando-se os resultados obtidos neste caso (Tabela 5.20) com os obtidos no Teste 2 (Tabela 5.18), nota-se que o plano de medição obtido neste teste é redefinido para garantir a ausência de medidas críticas em todas as configurações de interesse. Porém, é interessante notar que não ocorreu aumento do número de UTRs e medidores (e consequentemente do custo associado), mas apenas uma redistribuição topológica dos mesmos. Assim como ocorreu para o atendimento ao requisito de observabilidade, observa-se que a metodologia proposta busca sempre alocar UTRs nos nós terminais dos circuitos que podem ser chaveados, porém não instalando medidores de fluxo para tais circuitos, mas apenas medidores de injeção de potência nos nós.

Teste 4: Análise considerando UTRs já definidas para instalação

Neste teste, considera-se que já existem UTRs em 3 pontos específicos da rede. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.21 e na Figura 5.25, quando se buscou atender o requisito de observabilidade. Assumiu-se que as 3 UTRs estivessem instaladas nas barras 40, 45, e 56.

N° de UTRs	N° de Medidores	Custo (\$)
30	54	3243,00

Tabela 5.21 – Resultados para o requisito de observabilidade (3 UTRs pré-definidas), Sistema C

Comparando-se estes resultados com os obtidos no Teste 1, sem UTRs pré-definidas, observa-se que ocorreu um aumento no número de UTRs e no custo total do plano de medição, sendo esta solução subótima do ponto de vista da supervisão.



Figura 5.25 – Requisito de observabilidade (UTRs pré-definidas), Sistema C

5.2 Utilização de Pmeds

De modo a avaliar o impacto da presença de pseudomedidas, testes são realizados para situações nas quais os planos de medição obtidos na Seção 5.1 são adaptados segundo o procedimento descrito na Seção 4.9, para a obtenção de novos planos de medição de menor custo, onde pseudomedidas estão presentes. Simulações com os sistemas A, B e C são apresentadas a seguir.

5.2.1 Testes com o sistema A

Considerando o atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas e que existe a necessidade de reduzir o custo com o equivalente à remoção de três UTRs, o plano de medição representado na Figura 5.14 deve ser adaptado segundo o procedimento estabelecido na Seção 4.9. Neste caso, de acordo com o passo (iii), foram removidas as UTRs da barras 2, 20 e 29. A Figura 5.26 ilustra o plano ótimo obtido com a introdução de Pmeds.



Figura 5.26 – Sistema A com Pmeds, ausência de Medidas Críticas

A Tabela 5.22 apresenta o custo associado ao plano de medição da Figura 5.26.

N° de UTRs	N° de Medidores	Custo (\$)
10	29	1130,50

Tabela 5.22 - Custo obtido com Pmeds e ausência de medidas críticas, Sistema A

5.2.2 Testes com o sistema B

Os resultados da alocação de pseudomedidas para o sistema B, considerando a ausência de medidas críticas, são apresentados a seguir para situações onde se considera um ou mais cenários topológicos de interesse. O cenário topológico base, assim como os demais cenários de interesse são aqueles definidos na Seção 5.1.3.

Teste 1: Atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas (cenário base)

Considerando o atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas e que existe a necessidade de reduzir o custo com o equivalente à remoção de quatro UTRs, o plano de medição representado na Figura 5.17 deve ser adaptado segundo o procedimento estabelecido na Seção 4.9. Neste caso, de acordo com o passo (i), a UTR da barra 31 foi removida. Da mesma forma, de acordo com o passo (iii), as UTRs das barras 9, 12 e 27 foram removidas. A Figura 5.27 ilustra o plano ótimo obtido com a introdução de Pmeds.



Figura 5.27 – Sistema B com Pmeds, ausência de Medidas Críticas no cenário base

A Tabela 5.23 apresenta o custo associado ao plano de medição da Figura 5.27.

Tabela 5.23 – Custo obtido com Pmeds e ausência de medidas críticas,

cenário base, Sistema B

N° de UTRs	N° de Medidores	Custo (\$)
16	37	1766,50

Teste 2: Atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas (vários cenários)

Considerando o atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas para vários cenários topológicos e a necessidade de reduzir o custo com o equivalente à remoção de quatro UTRs, o plano de medição representado na Figura 5.19 deve ser adaptado segundo o procedimento estabelecido na Seção 4.9. Neste caso, de acordo com o passo (ii), a UTR da barra 18 foi removida. Da mesma forma, de acordo com o passo (iii), as UTRs das barras 9, 12 e 28 foram removidas. A Figura 5.28 ilustra o plano ótimo obtido com a introdução de Pmeds.



Figura 5.28 – Sistema B com Pmeds, ausência de Medidas Críticas, vários cenários

A Tabela 5.24 apresenta o custo associado ao plano de medição da Figura 5.28.

Tabela 5.24 – Custo obtido com Pmeds e ausência de medidas críticas,

vários cenários, Sistema B

N° de UTRs	N° de Medidores	Custo (\$)
19	46	2107,00

5.2.3 Testes com o sistema C

Os resultados da alocação de pseudomedidas para o sistema C, considerando a ausência de medidas críticas, são apresentados a seguir para situações onde se considera um ou mais cenários topológicos de interesse. O cenário topológico base, assim como os demais cenários de interesse são aqueles definidos na Seção 5.1.4.

Teste 1: Atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas (cenário base)

Considerando o atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas e que existe a necessidade de reduzir o custo com o equivalente à remoção de seis UTRs, o plano de medição representado na Figura 5.22 deve ser adaptado segundo o procedimento estabelecido na Seção 4.9. Neste caso, de acordo com o passo (iii), as UTRs das barras 12, 20, 28, 32, 43 e 54 foram removidas. A Figura 5.29 ilustra o plano ótimo obtido com a introdução de Pmeds.



Figura 5.29 – Sistema C com Pmeds, ausência de Medidas Críticas, cenário base
A Tabela 5.25 apresenta o custo associado ao plano de medição da Figura 5.29.

Tabela 5.25 – Custo obtido com Pmeds e ausência de medidas críticas, cenário base, Sistema C

N° de UTRs	N° de Medidores	Custo (\$)	
22	63	2483,50	

Teste 2: Atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas (vários cenários)

Considerando o atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas para vários cenários topológicos e a necessidade de reduzir o custo com o equivalente à remoção de quatro UTRs, o plano de medição representado na Figura 5.24 deve ser adaptado segundo o procedimento estabelecido na Seção 4.9. Neste caso, de acordo com o passo (i), a UTR da barra 13 foi removida. Da mesma forma, de acordo com o passo (iii), as UTRs das barras 3, 5, 35, 43 e 54 foram removidas. A Figura 5.30 ilustra o plano ótimo obtido com a introdução de Pmeds.



Figura 5.30 – Sistema C com Pmeds, ausência de Medidas Críticas, vários cenários

A Tabela 5.26 apresenta o custo associado ao plano de medição da Figura 5.30.

Tabela 5.26 – Custo obtido com Pmeds e ausência de medidas críticas,

cenário base, Sistema C

N° de UTRs	N° de Medidores	Custo (\$)	
23	66	2597,00	

5.3 Comentários sobre os Resultados

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

- Como esperado, constata-se inicialmente que, de forma geral, quanto mais restrições forem consideradas para a obtenção de um plano ótimo de medição, maior tende a ser a redundância necessária, portanto mais caro torna-se tal plano.
- Confirmou-se também que a redundância se qualifica não apenas em termos numéricos, mas também pelo tipo e localização dos medidores na rede. Por exemplo, comparando-se os resultados dos Testes 3 e 5 (sistema IEEE-14, Seção 5.1.1) e também aqueles obtidos nos Testes 2 e 3 (sistema C, Seção 5.1.4), verifica-se que foi possível atender dois objetivos distintos com a mesma redundância numérica. Entretanto, os planos de medição correspondentes diferem em tipo e posicionamento de medidores na rede.
- Ainda sobre a comparação entre os testes acima mencionados, note que aqueles resultados que atendem mais restrições com o mesmo custo (número de UTRs), representam um plano de medição melhor.
- Verificou-se que a definição dos cenários topológicos de interesse para a supervisão pode ter grande influência na determinação do plano ótimo de medição. Restringido o número de configurações de interesse, pode-se obter um plano de medição de custo significativamente menor.
- Os testes nos quais definiu-se previamente o posicionamento de algumas UTRs por motivação distinta da supervisão (e.g., telecomando), pode tornar a solução obtida subótima do ponto de vista dos requisitos que definem o desempenho da função Estimação de Estado.

- Os tempos computacionais observados nas simulações variam de 27 segundos para requisito de observabilidade, sistema IEEE-14 a 213,40 minutos para requisito de ausência de medidas criticas, diferentes configurações, sistema C.
- A utilização de Pmeds permite adequar o sistema de medição planejado, visando reduzir seu custo e continuar atendendo o requisito desejado. As Tabelas 5.27 a 5.31 ilustram as reduções de custo obtidas nas simulações realizadas com a introdução das Pmeds, quando o requisito de ausência de Cmeds foi atendido.

Plano	N° de UTRs	N° de Medidores	Custo (\$)
Sem Pmeds	13	38	1471,00
Com Pmeds	10	29	1130,50

Tabela 5.27 – Custo comparativo – Sistema A

Tabela 5.28 – Custo comparativo – Sistema B, cenário base

Plano	N° de UTRs	N° de Medidores	Custo (\$)
Sem Pmeds	20	49	2220,50
Com Pmeds	16	37	1766,50

Tabela 5.29 – Custo comparativo – Sistema B, vários cenários

Plano	N° de UTRs	N° de Medidores	Custo (\$)
Sem Pmeds	23	53	2538,50
Com Pmeds	19	46	2107,00

Plano	N° de UTRs	N° de Medidores	Custo (\$)
Sem Pmeds	28	75	3137,50
Com Pmeds	22	63	2483,50

Tabela 5.30 – Custo comparativo – Sistema C, cenário base

Tabela 5.31 – Custo comparativo – Sistema C, vários cenários

Plano	N° de UTRs	N° de Medidores	Custo (\$)
Sem Pmeds	29	77	3246,50
Com Pmeds	23	66	2597,00

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1 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 dele 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 Estado, por sua vez, depende da existência de um plano de medição adequado.

Este Trabalho apresentou uma metodologia para alocação de pontos de medição em redes de distribuição de energia elétrica. A técnica de algoritmos genéticos foi utilizada como ferramenta de otimização, visando buscar a melhor relação de compromisso entre o custo do sistema de medição e o atendimento a requisitos de desempenho para a função Estimação de Estado.

A metodologia apresentada permite ao projetista escolher as restrições a serem atendidas em cada cenário topológico de interesse para a operação. A formulação adotada torna simples também relaxar algumas restrições do problema de forma a reduzir os de investimento no sistema de medição sempre que o projetista julgar necessário. A composição de custos para o sistema de medição e aspectos tais como: utilização de pseudomedidas, existência previa de UTRs, etc são facilmente levados em consideração na formulação adotada para o problema aqui tratado.

Dentro as conclusões do trabalho, pode-se destacar:

• A metodologia proposta mostrou-se bastante flexível quanto à formulação do problema de otimização (objetivo e restrições) e eficaz na busca da solução ótima.

- A definição de cenários de interesse para a supervisão e os requisitos de redundância a serem atendidos para cada um deles é muito importante, podendo ser crítica quando se dispõem de recursos financeiros limitados para investimento em UTRs e equipamentos de medição. Nestas situações, uma escolha criteriosa dos cenários considerados relevantes para a supervisão é fundamental. Pode-se, por exemplo, abrir mão de forçar o atendimento ao requisito de ausência de medidas críticas ou mesmo de observabilidade, em cenários topológicos de ocorrência improvável, pouco freqüentes ou menos importantes, ganhando-se com isso uma redução no investimento necessário para a supervisão de cenários realmente relevantes.
- A escolha do requisito a ser atendido em cada cenário topológico deve depender da importância associada à supervisão da rede em tais cenários. O relaxamento dos requisitos a serem atendidos geralmente leva a menores custos do plano de medição, através da necessidade de uma menor quantidade de UTRs e medidores. É importante ressaltar também que a obtenção de uma solução ótima que atenda aos requisitos especificados não implica que outros requisitos (de maior exigência) não sejam atendidos. A solução ótima apenas garante que os requisitos exigidos serão atendidos. Outros requisitos, não exigidos durante o processo de busca, podem também ser atendidos pela solução ótima, embora isso não seja garantido.
- A utilização da metodologia proposta indica pontos onde devem ser coletadas informações que permitam a supervisão da rede com um nível de confiabilidade pré-definido. Porém, utiliza-se estes resultados para investir na aquisição de remotas e medidores ou na alocação de pseudomedidas. Tais pseudomedidas (Pmeds) são geradas a partir de históricos de carregamento no sistema, em pontos específicos da rede, utilizando previsão/alocação de carga. A utilização de Pmeds dispensa investimento em UTRs e medidores, porém requer investimento em bases de dados, quando não existente, e ferramentas computacionais para a composição da informação necessária, devendo ser complementar ao conjunto de informações obtidas em tempo-real das UTRs e dos medidores instalados na rede. De qualquer forma, a metodologia indica onde é importante alocar uma medida ou Pmed.

6.2 Contribuições do Trabalho

Dentre as contribuições do trabalho, pode-se destacar :

- Proposição de uma metodologia que leva em consideração aspectos relevantes para a supervisão da rede de distribuição, tais como: diferentes condições de topologia, necessidade de pseudomedidas, existência de UTRS pré-defenidas para fins de automação, etc.
- A metodologia proposta permite representar o conhecimento e a experiência de especialistas na rede de distribuição em análise, de forma a explorar diferentes relações de custo-beneficio para a solução;
- A avaliação de desempenho de cada solução proposta não passa pela execução de um Estimador de Estado. Desta forma, sua aplicação e facilitada, já que não requer o conhecimento e utilização dos parâmetros da rede, é também conveniente para a alocação de pontos de medição em sistemas ainda não instrumentados.

6.3 Propostas para Trabalhos Futuros

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

- Realização de mais testes visando a exploração de outras formas de controlar o custo-benéficio da solução através do ajuste das penalidades;
- Investigação de técnicas para geração de pseudomedidas e alocação de carga;
- Desenvolvimento de métodos para estimação de estado em redes de distribuição que permitem a detecção e correção de pseudomedidas errôneas; e

- Aplicação de outras técnicas de computação evolutiva para fins de comparação.
- Avaliação do desempenho da metodologia proposta em sistemas de distribuição reais.

[Ayre86] M. Ayres, P. H. Haley," Bad Data Groups in Power System State Estimation", IEEE Trans. on PS, vol. PWRS-1, pp. 1-9, Aug./1986

[Baran94] M. E. Baran, A. W. Kelley, "State Estimation For Real-time Monitoring of Distribution Systems". IEEE trans onPS, Vol 9, No3, Aug 1994.

[Baran96] M. E. Baran, A. W. Kelley, J. Zhu, "Meter Placement for Real- Time Monitoring of Distribution Feeders". IEEE trans. on Power Syst., Vol 11, No. 1, Feb 1996, pp. 332-337.

[Bose87] A. Bose, K. A. Clements, "Real-Time Modeling of Power Network", proc. IEEE, vol. 75, no. 12, pp 1607-1622, Dec./1987.

[Brow91] D.L. Brown, *Prospects of distribution automation at Pacific Gas and Electric Company*, IEEE Trans. on Power Delivery, pp. 1946-1953, Oct./1991.

[**Capd02**] C. Charles, "Utilização de Algoritmos Genéticos para a Localização Ótima de Pontos de Medição em Redes Elétricas", Dissertação de Mestrado, CAA/UFF, Abril/2002.

[Clem81] K. A. Clements, G. R. Krumpholz, P. Davis, "Power System State Estimation Residual Analysis: an Algorithm Using Network Topology, IEEE Trans. PAS, vol. PAS-100 Apr./1981.

[Clem83] K. A. Clements, G. R. Krumpholz, P. W. Davis, "Power System State Sstimation with Measurement Deficiency: an Observability Measurement Placement Algorithm, IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-102, pp. 2012-2020, July/1983.

[Clem90] K. A. Clements, "Observability Methods and Optimal Meter Placement", Eletrical Power & Sustems, vol. 12, no. 12, no. 2, pp. 88-93, Apr./1990.

[Cout90] M. B. Do Couto Filho, A. M. Leite da Silva, D. M. Falcão, "Bibliography on Power System State Estimation (1968 – 1989)", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 11, No. 1, February 1996, pp. 332-337.

[**Cout99**] M. B. Do Couto Filho, J. C. S. Souza, R. S. G. Matos, M. Th. Schilling, "Strategies for preserving data rendundancy in power system state estimation", 13th Power Systems Computation Conference Proc., Trodhein, Norway, Jul./1999.

[Cout01] M. B. Do Coutto Filho, J. C. S. Souza, F. M. F. Oliveira, M. Th. Schilling," Identifying Critical Measurements & Sets for Power System State Estimation", IEEE Porto Power Tech, sept./2001.

[El-H98] M.E. El-Hawary (Editor), "Fuzzy System Theory in Electrical Power Engineering", IEEE Press, 1998.

[EPRI84] EPRI, "Guidelines for Evaluating Distribution Automation", Nov. 1984, report no.: EL-3728.

[Garc01] Paulo Augusto N. Garcia, José Luiz R. Pereira, and Sandoval Carneiro, "Voltage Control Devices Models for Distribution Power Flow Analysis.", IEEE trans. Power Systems, vol.16, Nov. 2001.

[Ghosh97] A.K. Ghosh, D.L. Lubkeman, M.J. Downey, R.H. Jones, "Distribution Circuit State Estimation Using a Probabilistic Approach", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 1, pp. 45-51, February 1997.

[Gjeng99] T. Gjengedal, R. Flolo, P. Lund, "Distribution System Planning Including Distribution Automation and Demand Side Management in Deregulated Market Environments", paper BPT99-459-17, Proceedings of the IEEE Budapest PowerTech, Budapest, Hungary, August 1999.

[Gold89] D. E. Goldberg, "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning", Addison-wesley, 1989.

[Hand75] E. Handschin, C. Bongers, "Theorical and pratical considerations in the desing of state estimators for electric power systems", International Symp. On Computerized Operation of Power System (COPOS) Proceedings, Sao Carlos, Brasil, pp. 104-136, Aug./1975.

[He00] Ying He, Y. Deng, J. Lei, B. Zhang, "A Novel Architecture of Distribution Management Systems", IEEE 2000 Summer Meeting Proceedings, Seatle, USA, 2000.

[Hol75] J. H. Holland, "Adaptation in Natural and Artificial Systems", Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975.

[Jamn96] L. Jamniczky, *EMS network security applications of the future*, IEEE Computer Applications in Power, Apr./1996.

[Kauf88] A. Kaufmann, M.M. Gupta, "Fuzzy Mathematical Models in Engineering and Management Science", North Holland ed., 1988.

[Kuo93] H.C. Kuo, Y.Y. Hsu, "Distribution System Load Estimation and Service Restoration Using a Fuzzy Set Approach", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No. 4, pp. 1950-1957, October 1993.

[Li96] Li, Ke. "State Estimation forPower Distribution and Measurement Impacts". IEEE Trans. on OS, Vol11, No. 2, May 1996.

[Lu95] Lu, C.N; Teng, J. H.; Liu, W. H. E.," Distribution System State Estimation". IEEE trans. On PS, Vol 10, No 1, Feb 1995.

[Meli96] Melipoulos, A. P. S. ; Zhang, F [1996]. "Multiphase Power and State Estimation for Power Distribution Systems". IEEE Ttrans on PS, Vol. 11. No. 2, May 1996.

[**Mic96**] Z. Michalewicz, "Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs". New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996.

[Mira95] V. Miranda, J. Pereira, J. Tomé Saraiva, "Experiences in State Estimation Models for Distribution Systems Including Fuzzy Measures", IEEE Stockolm PowerTech, Stockolm, Sweden, June 1995.

[Mira96] V. Miranda, D. Srinivasan, L. M. Proença, "Evolutionary computation in power systems", PSCC Proceendings, Dresden, Germany, Aug./1996.

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

[**Mira00a**] V. Miranda, J. Pereira, J. Tomé Saraiva, "Load Allocation in DMS with a Fuzzy State estimator", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No. 2, pp. 529-534, May 2000.

[Mitch96] M. Mitchell, "An Introduction to Genetic Algorithms". Massachusetts: MIT Press, 1996.

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

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

[Mont99] A. Montecelli, "Power System State Estimation: a Generalized Approach", Kluwe Academic Press, 1999.

[Ozay99] N. Ozay, A.N. Guven, A. Buyuksemerei, M. Fettahlioglu, "Design and Implementation of a Feeder Automation System for Distribution Networks", paper BPT99-291-30, Proceedings of the IEEE Budapest PowerTech, Budapest, Hungary, August 1999.

[Pere99] J. Pereira, V. Miranda, J.T. Saraiva, "A Comprehensive State Estimation Approach for SEM/DMS Applications", paper BPT99-358-16, Proceedings of the IEEE Budapest PowerTech, Budapest, Hungary, August 1999.

[**Royt93**] I. Roytelman, S.M. Shahidehpour, "State Estimation for Electrical Power Distribution Systems in Quasi Real-Time Conditions", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 4, pp. 2009-2015, October 1993.

[Sarm94] N. D. R. Sarma, V. Veera Raju, K. S. Prakasa Rao, "Design of Telemetering Configuration for Energy Management Systems", IEEE Trans. On PS, vol. 9, pp. 381-387, Fev./1994.

[Schw70] F.C.Schweppe, J. Wilder, "Power System Static State Estimation", IEEE Trans. On PAS, vol. PAS-89, pp.120-135, Jan./1970.

[Simo90] A. Simões-Costa, T. S. Piazza, A. Mandel, "Qualitative Methods to Solve Qualitative Problems in Power System State Estimation, IEEE Trans. On Ps, vol. 5, pp. 941-949, Aug./1990.

[**SR86**] "Distribution Automation: A Practical Tool for Shaping a more Profitable Future", Special Report, Electrical World, Dec. 1986, pp. 43-50.

[Toms00] K. Tomsovic, R. Blakely, F. Soudi, "Sensor Placement for Enhanced Distribution Protection", Technical Report, Research under contract no. Z-10-2-410-94, PG&E/Washington StateUniversity, July 2000.

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

[Alsa98] O. Alsaç, N. Vempati, B. Stott, A. Montecelli, "Generalized State Estimation", IEEE Trans. On PS, vol 13, pp. 1069-1075, Aug./1998.

[Anto00] A. B. Antonio, "Alocação de Medidores para Estimação de Estados em Sistemas de potência através de Metaurísticas", Dissertação de Mestrado, CAA/UFF, Setembro/2000.

[Baran95] M. E. Baran, A. W. Kelley, "A Branch-Current-Based State Estimation Method for Distribution Systems". IEEE trans Power Syst., Vol 10, Feb 1995.

[Baran95,b] M. E. Baran, J. Zhu, H. Zhu, K. E. Garren, "A Meter Placement Method for State Estimation", IEEE Trans. on PS, vol. 10, no. 3 pp. 1704-1710, Aug./1995.

[Clem82] K. A. Clements, R. Krumpholz, P. W. Davis, State Estimation Measurement System Reliability Evaluation – an Efficient Elgorithm Based on Topological Observability Theory", IEEE Trans. PAS, vol. PAS-102, pp. 2012-2020, July/1983.

[**Cose00**] J. Coser, J. G. Rolim, A. J. A. Simõe Costa, "Projeto de planejamento de Medição para a Estimação de Estados via Algoritmos Genéticos", Congresso Brasileiro de Automática, Florianópolis, SC, Nov./2000.

[Cout01b] M. B. do Couto Filho, J. C. S. Souza, F. M. F. Oliveira, M. Th. Schilling, "Perda Iminente de Observabilidade na Estimação de Estado em Centros de Operação de Sistema", SNPTEE, Grupo IX, Out./2001.

[Mat00] R. S. Guedes de Matos, "Processamento de Erros Grosseiros na Estimação de Estado em Sistemas de Potência em Condições Críticas de Redundância", Dissertação de Mestrado, CAA/UFF, Jan./2000.

[Mek03] S. F. Mekhamer, S. A. Soliman, M. A. Moustafa, and M. E. El-Hawary, "Application of Fuzzy Logic for Reactive-Power Compensation of Radial Distribution Feeders.", IEEE trans. Power Systems, vol.18, Feb 2003.

[**Med02,a**] Medeiros Jr., M. F. Almeida, M. A. D. Gomes, A. M. M. B. Silveira, D. B. F; Mota, F. C. Oliveira, R. C. "XV Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica", SENDI 2002.

[**Med02,b**] Medeiros Jr., M. F.; Almeida, M. A. D. "Estimação de Estado em Redes de Distribuição De Media Tensão com Base no Algoritmo da Soma de Potencia"; Parte II: Modelo Não Linear. XIV- Congresso Brasileiro de Automática, Natal- RN, Set 2002.

[**Mira99**] V.Miranda, J. Perreira, E J. T. Saraiva, "A Comprehensive State Estimation Approach for SEM/DMS Applications". Paper BPT99-358-16 accepted for presention at the IEEE Power Tech '99 Conference, Budapest, Hungary, Aug 1999.

[**Ricc99a**] O. F. Riccieri, "Planejamento de Sistemas de Medição Utilizando Algoritmos genéticos", Dissertação de Mestrado, Ago./1999.

[Wang04] H. Wang, N. N. Schulz, "A Load Modeling Algorithm for Distribution System State Estimation.", IEEE trans. Power Systems, vol.19, Feb 2004.