

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

CIRO JOSÉ FRONCEK EDER

**MÉTODOS DE FUSÃO DE ESTIMATIVAS PARA
AGREGAÇÃO DE MÚLTIPLAS FONTES DE
INFORMAÇÃO À ESTIMAÇÃO DE ESTADOS EM
SISTEMAS DE POTÊNCIA**

Florianópolis

2014

CIRO JOSÉ FRONCEK EDER

**MÉTODOS DE FUSÃO DE ESTIMATIVAS PARA
AGREGAÇÃO DE MÚLTIPLAS FONTES DE
INFORMAÇÃO À ESTIMAÇÃO DE ESTADOS EM
SISTEMAS DE POTÊNCIA**

Esta Dissertação foi julgada aprovada para a obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Elétrica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Florianópolis, 18 de Fevereiro 2014.

Prof. Patrick Kuo Peng, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Antonio José Alves Simões Costa, Ph.D.
Universidade Federal de Santa Catarina
Orientador

Elizete Maria Lourenço
Dra.

Ildemar Cassana Decker
D.Sc.

Roberto de Souza Salgado
Ph.D.

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho de dissertação não seria possível sem a ajuda e contribuição de muitas pessoas com quem tive oportunidade e o privilégio de conviver nos últimos anos.

Inicialmente gostaria de agradecer aos meus pais, Odacioni e Berenice, à minha irmã Gabriela e meus avós Odacyr e Ligia, e José e Helena, por todo o apoio, confiança e carinho despendido a mim ao longo de toda a vida.

Também agradeço muito ao professor Antonio Simões Costa pela imensa contribuição na minha formação, não apenas no âmbito do mestrado como também na vida pessoal e profissional.

Agradeço a todos os colegas de Labspot que dividiram os momentos bons e ruins nos últimos anos, incentivando e animando nos momentos certos. Um agradecimento especial aos amigos André, Daniel, Carol, Leonardo, Edson, Franciele, João, Kauana, Humberto, Bruno e Guido.

Obrigado também aos colegas do Operador Nacional do Sistema Elétrico pelo apoio durante a conclusão deste trabalho.

RESUMO

MÉTODOS DE FUSÃO DE ESTIMATIVAS PARA AGREGAÇÃO DE MÚLTIPLAS FONTES DE INFORMAÇÃO À ESTIMAÇÃO DE ESTADOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

Ciro José Froncek Eder

Florianópolis

2013

Este trabalho apresenta uma metodologia para a incorporação de medidas provenientes de diferentes tipos de sensores à Estimação de Estados em Sistemas de Potência. A agregação de medidas de diferentes sensores se faz oportuna e importante devido à disponibilização de novas tecnologias de medição, como por exemplo os sistemas de medição fasorial sincronizada. Ela é feita mediante um módulo de fusão que processa estimativas produzidas por módulos de estimação individuais associados a cada classe de sensores. Não há restrições sobre o algoritmo utilizado em cada módulo de estimação individual, o que viabiliza o uso de estimadores correntemente empregados na indústria. As informações processadas são: *(i)* medidas oriundas dos sistemas SCADA, as mais utilizadas atualmente nos centros de operação; *(ii)* pseudomedidas, que são informações não provenientes dos sistemas de telemetria, advindas por exemplo de estudos prévios, etc., e *(iii)* medidas fasoriais sincronizadas, que representam uma nova classe de sensores, caracterizada por alta taxa de amostragem e nível superior de exatidão. A diferença de exatidão entre as diferentes classes de dados reflete-se nas respectivas matrizes de covariância, e é utilizada no módulo de fusão para ponderar as estimativas geradas pelos módulos de estimação.

Neste trabalho, o método de estimação de estados utilizado nos módulos de estimação baseia-se na formulação clássica do problema via mínimos quadrados ponderados (MQP), o qual é resolvido através do método da Equação Normal de Gauss com capacidade de processamento de informações *a priori*. Estas são utilizadas para contornar problemas de falta de observabilidade com respeito às medidas fasoriais sincronizadas, já que esta tecnologia ainda se encontra em fase de implantação nos sistemas de potência na maior parte dos países. Os programas computacionais foram desenvolvidos na plataforma Matlab®, tendo sido

utilizadas técnicas de esparsidade disponibilizadas pela plataforma. Três sistemas-teste do IEEE são utilizados para avaliação do desempenho da abordagem proposta. Os resultados indicam vantagens na arquitetura proposta de estimação, demonstrando que se trata de uma alternativa promissora para a incorporação de novas classes de medidas aos estimadores existentes nos centros de operação.

Palavras-chave: Estimação de Estados em Sistemas de Potência, Fusão de Dados e Estimativas, Mínimos Quadrados Ponderados, Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada, Modelagem em Tempo Real de Sistemas de Potência.

ABSTRACT

ESTIMATION FUSION METHODS FOR AGGREGATING MULTIPLE INFORMATION SOURCES IN POWER SYSTEM STATE ESTIMATION

Ciro José Froncek Eder

Florianópolis
2013

This dissertation presents a methodology for incorporating measurements provided by different types of sensors to Power System State Estimation. The aggregation of different measurements sources is timely and important with the advent of new monitoring technologies, such as synchronized phasor measurement systems. To combine the estimates provided by the distinct classes of sensors, the application of estimation fusion methods is proposed. There are no restrictions on the state estimation algorithm used by each individual estimator, so that any algorithm currently used in the power industry may be employed. The distinct classes of state estimation input data considered in this work are: (i) measures obtained from SCADA systems, which are the most used in operations centers nowadays; (ii) pseudo-measurements, which are pieces of information that are not originated from telemetry systems but arise from load forecast studies, previous state estimation studies, etc., and (iii) synchronized phasor measurements, which represent a new class of sensors, characterized by higher sampling rates and accuracy levels. The difference in accuracy of the different classes of data manifests itself on the respective covariance matrices, which are used in the fusion module to weigh the estimates generated by the individual estimation modules.

In this work, the state estimation method used in each estimation module is based upon the classical weighted squares (WLS), which is then solved by a variant of Normal equation method equipped with a priori information processing capability. A priori information is used to circumvent problems of unobservability with respect to synchronized phasor measurements that may occur due to the limited penetration of phasor measurements units in most existing power networks. All computer programs, and sparsity techniques provided by that platform have been used. To evaluate the performance of the proposed approach,

three IEEE test systems have been employed. The results illustrate the advantages of the proposed estimation architecture, demonstrating that it qualifies as a valid alternative approach to incorporate new classes of data into existing EMS state estimation application.

Keywords: Power System State Estimation, Data Fusion and Estimation, Weighted Least Squares Estimators, Synchronized Phasor Measurements, Real-Time Power System Modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Arquitetura de um Sistema SCADA típico.....	32
Figura 2.2	Onda Senoidal e fasor correspondente.....	37
Figura 2.3	Configuração Básica de um Sistema de Medição Fasorial.....	39
Figura 2.4	Estrutura típica de uma PMU.....	39
Figura 4.1	Algoritmo de resolução via Equação Normal.....	57
Figura 4.2	Estrutura do Estimador Centralizado.....	62
Figura 4.3	Estrutura do Estimador de estados em dois estágios...	63
Figura 5.1	Estimador Descentralizado.....	68
Figura 5.2	Fusão de Estimativas a Três Níveis.....	73
Figura 6.1	Sistema teste IEEE 14 barras e plano de medição observável.....	82
Figura 6.2	Erros de estimação de ângulos do estimador EEFS para o EEH - Sistema IEEE 14 barras, considerando-se observabilidade para cada classe de medida.....	83
Figura 6.3	Erros de estimação de magnitude de tensão do estimador EEFS para o EEH - Sistema IEEE 14 barras, considerando-se observabilidade para cada classe de medida.....	84
Figura 6.4	Sistema teste IEEE 14 barras e plano de medição não observável com medidas PMU.....	86
Figura 6.5	Erros de estimação de ângulo do estimador EEFS para o EEH - Sistema IEEE 14 barras, caso não observável com relação a medidas fasoriais.....	87
Figura 6.6	Erros de estimação de magnitude de tensão do estimador EEFS para o EEH - Sistema IEEE 14 barras, caso não observável com relação a medidas fasoriais.....	88
Figura 6.7	Erros de estimação de ângulos do estimador EEFS para o EEH - Sistema IEEE 57 barras, considerando-se observabilidade para cada classe de medida.....	91
Figura 6.8	Erros de estimação de magnitude de tensão do estimador EEFS para o EEH - Sistema IEEE 57 barras, considerando-se observabilidade para cada classe de medida.....	92

Figura 6.9	Erros de estimação de ângulos do estimador EEFS para o EEH - Sistema IEEE 57 barras, considerando-se a não-observabilidade em relação às medidas fasoriais...	94
Figura 6.10	Erros de estimação de magnitude de tensão do estimador EEFS para o EEH - Sistema IEEE 57 barras, considerando-se a não-observabilidade em relação às medidas fasoriais.....	94
Figura 6.11	Erros de estimação de ângulos do estimador EEFS para o EEH - Sistema IEEE 118 barras, considerando-se observabilidade para cada classe de medida.....	97
Figura 6.12	Erros de estimação de magnitude de tensão do estimador EEFS para o EEH - Sistema IEEE 118 barras, considerando-se observabilidade para cada classe de medida.....	97
Figura 6.13	Erros de estimação de ângulos do estimador EEFS para o EEH - Sistema IEEE 118 barras, considerando-se a não-observabilidade em relação às medidas fasoriais...	99
Figura 6.14	Erros de estimação de magnitude de tensão do estimador EEFS para o EEH - Sistema IEEE 57 barras, considerando-se a não-observabilidade em relação às medidas fasoriais.....	100
Figura A.1	Modelo π de uma linha de transmissão.....	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1	Classificação dos métodos de fusão.....	68
Tabela 6.1	Medidas utilizadas pelo estimador de estados.....	80
Tabela 6.2	Indicadores de desempenho Caso 1 sistema IEEE 14 barras.....	85
Tabela 6.3	Resultados Finais da Estimação para o Caso 1 - sistema IEEE 14 barras.....	85
Tabela 6.4	Indicadores de desempenho Caso 2 sistema IEEE 14 barras.....	88
Tabela 6.5	Resultados Finais da Estimação para o Caso 2 - sistema IEEE 14 barras.....	89
Tabela 6.6	Medidas utilizadas pelo plano de medição observável para o sistema IEEE 57 barras.....	90
Tabela 6.7	Indicadores de desempenho Caso 1 - sistema IEEE 57 barras.....	92
Tabela 6.8	Medidas utilizadas pelo plano de medição não observável com relação a medidas fasoriais para o sistema IEEE 57 barras.....	93
Tabela 6.9	Indicadores de desempenho Caso 2 sistema IEEE 57 barras.....	95
Tabela 6.10	Medidas utilizadas pelo plano de medição observável para o sistema IEEE 118 barras.....	96
Tabela 6.11	Indicadores de desempenho Caso 1 sistema IEEE 118 barras.....	98
Tabela 6.12	Medidas utilizadas pelo plano de medição não observável com relação às medidas fasoriais para o sistema IEEE 118 barras.....	98
Tabela 6.13	Indicadores de desempenho Caso 2 sistema IEEE 118 barras.....	100
Tabela 6.14	Tempo de processamento dos estimadores EEH x EEFS101	
Tabela B.1	Dados de Barra do Sistema IEEE 14 Barras.....	117
Tabela B.2	Dados de Linha do Sistema IEEE 14 Barras.....	117
Tabela C.2	Dados de Linha do Sistema IEEE 57 Barras.....	121
Tabela C.2	Dados de Linha do Sistema IEEE 57 Barras.....	122
Tabela C.1	Dados de Barra do Sistema IEEE 57 Barras.....	123

Tabela D.1	Dados de Barra do Sistema IEEE 118 Barras.....	127
Tabela D.1	Dados de Barra do Sistema IEEE 118 Barras.....	128
Tabela D.1	Dados de Barra do Sistema IEEE 118 Barras.....	129
Tabela D.2	Dados de Linha do Sistema IEEE 118 Barras.....	130
Tabela D.2	Dados de Linha do Sistema IEEE 118 Barras.....	131
Tabela D.2	Dados de Linha do Sistema IEEE 118 Barras.....	132
Tabela D.2	Dados de Linha do Sistema IEEE 118 Barras.....	133
Tabela E.1	Dados do Sistema IEEE 57.....	137
Tabela F.1	Dados do Sistema IEEE 118.....	141

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EESP	Estimação de Estados em Sistemas de Potência
MQP	Mínimos Quadrados Ponderados
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Aquisition</i>
UTR	Unidade Terminal Remota
UAC	Unidade de Aquisição de Dados
SC	Servidor de Comunicação
IHM	Interface Homem Máquina
SBD	Servidor de Banco de Dados
TP	Transformador de Potencial
TC	Transformador de Corrente
CLP	Controlador Lógico Programável
LAN	<i>Local Area Network</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
PMU	<i>Phasor Measurement Unit</i>
PDC	<i>Phasor Data Concentrator</i>
SEE	Sistema Energia Elétrica
EEFS	Estimador de Estados baseado no método de Fusão
EEH	Estimador de Estados Híbrido

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	25
1.1 Contextualização do Problema	25
1.2 Estimação de Estados em Sistemas de Potência	25
1.3 Métodos de Resolução para Estimação de Estados em Sistemas de Potência	26
1.4 Fontes de dados para EESP	26
1.5 Fusão de Dados e Estimativas	27
1.6 Contribuições Deste Trabalho	27
1.7 Organização da Dissertação	28
2 FONTES DE DADOS PARA ESTIMAÇÃO DE ESTADOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA	31
2.1 Introdução	31
2.2 Medidas do sistema SCADA	31
2.3 Pseudomedidas	34
2.4 Medidas Fasoriais Sincronizadas	36
2.4.1 Conceito de Fasores e Filtragem do Componente Fundamental de Sinais Elétricos	36
2.4.2 Sistemas de Medição Fasorial Sincronizado	38
2.4.3 Arquitetura do Sistema de Medição Fasorial Sincronizado ..	38
2.5 Conclusões	41
3 ESTIMAÇÃO DE ESTADOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA	43
3.1 Introdução	43
3.2 Medidas para EESP	44
3.3 Formulação Matemática	44
3.4 Formulação por Mínimos Quadrados Ponderados	47
3.4.1 Matriz Ganho - $\mathbf{G}(x^k)$	48
3.4.2 Observabilidade da rede	49
3.5 Conclusões	49
4 MÉTODOS DE RESOLUÇÃO PARA ESTIMAÇÃO DE ESTADOS	51
4.1 Introdução	51

4.2	Método da Equação Normal	51
4.2.1	Linearização do Modelo de Medição (Método de Newton) ..	52
4.2.2	Implementação e Aspectos Computacionais Método da Equação Normal	55
4.2.3	Inclusão de Informações <i>a Priori</i> ao Método da Equação Normal	56
4.3	Outros Métodos de Solução da EESP	58
4.3.1	Método da Matriz Aumentada	58
4.3.2	Método das Rotações Ortogonais de Givens	58
4.4	Arquiteturas de Estimação para Classes Distintas de Medidas ..	59
4.4.1	Estimadores de Estado apenas com medidas fasoriais	60
4.4.2	Estimadores de Estado Centralizados	61
4.4.3	Estimador de Estados de Múltiplos Estágios	63
4.5	Conclusões	64
5	FUSÃO DE DADOS E ESTIMATIVAS	65
5.1	Introdução	65
5.2	Teoria da Fusão de Dados	65
5.2.1	Estimação de Estados com Métodos de Fusão	67
5.2.2	Fusão de Estimativas Aplicadas para o Estimador de Estados Baseado em Medidas PMU, SCADA e Pseudomedidas ..	69
5.2.3	Formulação Matemática do Problema de Estimação Descentralizado	69
5.2.4	Otimidade do Estimador Descentralizado	73
5.2.5	Aspectos Computacionais	74
5.2.6	Observabilidade com respeito às medidas fasoriais	75
5.2.7	Conclusões	76
6	RESULTADOS E SIMULAÇÕES	79
6.1	Introdução	79
6.2	Procedimentos de Simulação	79
6.2.1	Classes de Medidas e Estimadores Utilizados	79
6.2.2	Critérios de Avaliação dos Resultados	81
6.3	Resultados para o Sistema-Teste IEEE 14 barras	82
6.3.1	<i>1º Caso – Rede Observável com Pseudomedidas, Medidas SCADA e Medidas Fasoriais</i>	<i>82</i>
6.3.2	<i>2º Caso – Rede Observável com Pseudomedidas e Medidas SCADA, e não Observável com Medidas Fasoriais</i>	<i>86</i>

6.4	Resultados para o Sistema-Teste IEEE 57	90
6.4.1	<i>1º Caso – IEEE 57 Barras: Rede Observável com Pseudomedidas, Medidas SCADA e Medidas Fasoriais</i>	90
6.4.2	<i>2º Caso – IEEE 57 Barras: Rede Observável com Pseudomedidas e Medidas SCADA, porém não-observável com Medidas Fasoriais</i>	93
6.5	Resultados para o Sistema-Teste IEEE 118 barras	95
6.5.1	<i>1º Caso – IEEE 118 Barras: Rede Observável com Pseudomedidas, Medidas SCADA e Medidas Fasoriais</i>	95
6.5.2	<i>2º Caso – IEEE 118 Barras Rede Observável com Pseudomedidas, Medidas SCADA e não observável com Medidas Fasoriais</i>	98
6.6	Conclusões	102
7	CONCLUSÕES	103
7.1	Considerações Finais	103
7.1.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	104
8	ANEXOS	107
	ANEXO A – EQUAÇÕES DA FORMULAÇÃO MATEMÁTICA	111
	ANEXO B – SISTEMA TESTE IEEE 14 BARRAS	117
	ANEXO C – SISTEMA TESTE IEEE 57 BARRAS	121
	ANEXO D – SISTEMA TESTE IEEE 118 BARRAS	127
	ANEXO E – DADOS DO SISTEMA IEEE 57 BARRAS ...	137
	ANEXO F – DADOS DO SISTEMA IEEE 118 BARRAS ..	142
	REFERÊNCIAS	143

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do Problema

Desde o final da década de 1960, a análise de segurança em tempo real consolidou-se como um instrumento fundamental para a operação segura e confiável de sistemas elétricos de potência. Um requisito essencial para a sua execução é o conhecimento do estado operativo atual do sistema. A simples medição de grandezas remotas nas subestações fornece informação incompleta e está sujeita a erros não detectáveis, de tal forma que faz-se necessária a construção de modelos matemáticos capazes de processar medidas redundantes e fornecer estimativas confiáveis para as variáveis fundamentais da rede elétrica. A partir desta necessidade foram desenvolvidos os primeiros aplicativos de estimação de estados.

Os estimadores de estados são algoritmos computacionais que, a partir de modelos matemáticos dos componentes do sistema elétrico de potência, aliado à disponibilidade de um conjunto redundante de medidas de campo adquiridas em tempo real, tem a capacidade de estimar os estados do sistema, inclusive nas barras onde não são realizadas medições. Os estados são o módulo e a fase das tensões complexas nas barras do sistema. A partir deles é possível realizar a análise de segurança dos sistemas de potência.

1.2 Estimação de Estados em Sistemas de Potência

A Estimação de Estados em Sistemas de Potência (EESP) é formada por um conjunto de aplicativos computacionais baseados em métodos matemáticos e estatísticos cujo objetivo é estimar os estados do sistema de potência a partir de informações telemidas redundantes e portadoras de erros de medição. Devido ao grande número de componentes do sistema, não é possível se obter telemidas de todas as grandezas elétricas. Mesmo se isto fosse viável, há sempre a possibilidade de ocorrência de problemas nas telecomunicações ou de erros grosseiros de medição, que poderiam afetar o processo de tomada de decisão e induzir o operador a erros. A Estimação de Estados, que é executada em tempo real, contorna estes problemas pois, ao processar medidas redundantes, oferece meios para a validação dos resultados, bem como para a detecção e identificação de erros grosseiros [1], [2] e

[3].

1.3 Métodos de Resolução para Estimação de Estados em Sistemas de Potência

Os principais métodos utilizados para a resolução do problema de estimação de estados são apresentados em detalhes no Capítulo 4 desta dissertação. Nesta introdução, entretanto, é feito um breve apanhado de suas propriedades, para fins de contextualização. O método clássico para a solução da EESP baseia-se na Equação Normal de Gauss, sendo esta abordagem a utilizada no desenvolvimento do programa computacional implementado nesta dissertação. Uma propriedade interessante do método da Equação Normal é a possibilidade de ser estendido para permitir a inclusão das informações *a priori*. As informações *a priori* são de extrema importância para este trabalho, pois garantem que se possa trabalhar com planos de medição não observáveis, passíveis de ocorrer principalmente quando se consideram medidas fasoriais de alta qualidade [4]. Outra abordagem para a resolução da estimação de estados é o método da Matriz Aumentada [5], que apresenta maior robustez numérica que o método da Equação Normal [6]. Finalmente, devem ser citados os métodos ortogonais, que dentre todos são os mais robustos do ponto de vista numérico [7]. Embora as duas últimas classes de métodos também possam ser estendidas para considerar informações *a priori* sobre as variáveis de estado, dá-se preferência nesta dissertação ao método da Equação Normal. Isto se justifica pelo fato de sua formulação matemática ser imediatamente compatível com as técnicas de fusão de estimativas, conforme descrito no Capítulo 4. Isto não quer dizer entretanto que outros métodos de solução de problemas de mínimos quadrados não possam ser adaptados às mencionadas técnicas de fusão. Entretanto, este não é o objetivo desta dissertação, e os desenvolvimentos para este fim serão objeto de trabalhos futuros.

1.4 Fontes de dados para EESP

As fontes de dados para Estimação de Estados em Sistemas de Potência consideradas neste trabalho são: (i) Medidas transmitidas pelo sistema SCADA, que se constituem na tradicional fonte de dados para EESP, caracterizadas por sua confiabilidade e baixo custo; (ii)

Medidas fasoriais sincronizadas, fruto de uma tecnologia atualmente em ascensão, e que fornece medidas de módulos de tensão e defasagem angular de alta qualidade, a altas taxas de amostragem, e (iii) pseudomedidas que, diferentemente das telemidas citadas anteriormente, não são oriundas de sistemas de telemetria, e sim de informações adicionais provenientes de estudos de previsão de carga, execuções anteriores do estimador de estados, etc. Pseudomedidas podem ser de grande utilidade, particularmente em regiões do sistema não completamente cobertas pelos sistemas de telemedição.

1.5 Fusão de Dados e Estimativas

Os métodos de fusão de dados e estimativas foram originalmente desenvolvidos para uso nas áreas militar e da medicina [8]. Consistem em métodos matemáticos com capacidade de incorporar diversos sensores, de diferentes categorias, com diferentes capacidades e, principalmente com diferentes precisões. O conceito de fusão [9] já foi anteriormente aplicado à estimação de estados em sistemas de potência, para realizar a fusão de estimativas obtidas a partir de medições SCADA e de medidas fasoriais sincronizadas [4]. Portanto, os desenvolvimentos em [4] referem-se à fusão dos resultados gerados por duas classes de sensores. Conforme será visto no Capítulo 5, o problema da fusão de estimativas para duas classes de sensores é um caso particular, cuja solução é consideravelmente simplificada [10]. Neste trabalho, propõe-se a extensão dos métodos de fusão de modo a se obter a combinação ótima de estimativas produzidas por um número N de classes de sensores, $N \geq 3$. Os métodos de fusão propostos são ilustrados considerando-se as três classes de sensores mencionadas na seção anterior, ou seja: as medidas SCADA, medidas fasoriais sincronizadas e pseudomedidas.

1.6 Contribuições Deste Trabalho

Este trabalho tem como objetivo propor uma nova arquitetura de estimação de estados para a agregação de medidas oriundas de múltiplas classes de sensores em adição às medidas convencionais provenientes do sistema SCADA. Isso se tornou importante devido à disponibilidade de medidas fasoriais sincronizadas, uma nova classe de sensores com alta taxa de amostragem para aquisição de dados e precisão superior à das medidas SCADA. A arquitetura de estimação proposta baseia-se em

métodos de fusão de estimativas, utilizados neste trabalho para agregar medidas advindas de três diferentes classes de sensores: medidas SCADA, medidas fasoriais sincronizadas e pseudomedidas. A metodologia proposta pode teoricamente ser estendida para um número indefinido de sensores, abrindo a possibilidade de sua futura aplicação para incorporar novas classes de medidas e informações à modelagem em tempo real de sistemas elétricos de potência.

1.7 Organização da Dissertação

A dissertação está organizada em sete capítulos, conforme descrito a seguir.

O Capítulo 2 trata dos diversos sistemas de medição utilizados pelo Estimador de Estados proposto nesta dissertação, ou seja, são descritas as características das medidas SCADA, medidas fasoriais e pseudomedidas. São discutidos os aspectos técnicos de cada sistema de medição, bem como a justificativa de uso para cada um dos mencionados tipos de informação.

No Capítulo 3 é feita uma descrição detalhada do problema de estimação de estados, sendo apresentadas as formulações matemáticas e estatística do problema, bem como a sua aplicação a sistemas de potência.

No Capítulo 4 são apresentados os principais métodos de resolução do problema de estimação de estados, a saber: o método da Equação Normal, o Método da Matriz Aumentada e o Método das Rotações Ortogonais.

No Capítulo 5 são apresentadas as técnicas de fusão de dados, utilizadas neste trabalho para combinar os diferentes conjuntos de medidas apresentados no capítulo anterior. A descrição teórica é precedida de uma revisão bibliográfica dos métodos de fusão de dados e fusão de estimativas.

No Capítulo 6 são apresentados e discutidos os resultados obtidos pela aplicação do método proposto de fusão de estimativas a partir das três classes distintas de sensores aos sistemas-teste de 14, 57 e 118 barras do IEEE. São apresentadas as métricas utilizadas para a avaliação dos resultados obtidos e discutidos os benefícios e dificuldades apresentada pelo método desenvolvido. Os estudos de caso considerados contemplam tanto situações de interesse teórico quanto situações que se aproximam da realidade da aplicação.

Por fim, o Capítulo 7 é dedicado às conclusões gerais, às contri-

buições desta dissertação e propostas para trabalhos futuros.

2 FONTES DE DADOS PARA ESTIMAÇÃO DE ESTADOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

2.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os equipamentos de medição (*sensores*) que podem fornecer medidas para a estimação de estados. É abordada a origem e o uso das medidas SCADA, pseudomedidas e medidas fasoriais sincronizadas. Essas medidas compõem os dados de entrada para a arquitetura de Estimação de Estados proposta neste trabalho.

Os Estimadores de Estado baseados em medidas SCADA são utilizados em sistemas elétricos de potência há bastante tempo e representam uma tecnologia já consolidada. No entanto, existem casos em que algumas regiões do sistema são não-observáveis, ou seja, não existe supervisão suficiente via SCADA, o que gera a necessidade da utilização de pseudomedidas provenientes de estudos pré-operacionais, ou de informações de bancos de dados. Apesar das pseudomedidas não serem obtidas diretamente a partir de sensores, elas também serão consideradas fontes de dados para os estimadores, e no módulo de fusão de dados serão tratadas da mesma forma que as outras fontes de dados.

Já as medidas fasoriais sincronizadas são uma tecnologia relativamente recente em termos de fontes de dados para a Estimação de Estados. Apresentam nível de precisão e taxas de amostragem superiores às do sistema SCADA, e estão se tornando economicamente competitivas, o que tem encorajado sua maior utilização nos sistemas elétricos de potência. Desta forma, surge a necessidade da incorporação destas medidas aos processos de Estimação de Estados já existentes, sendo este um fator motivador para a aplicação do método de fusão de dados e estimativas abordado neste trabalho.

2.2 Medidas do sistema SCADA

O sistema SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*), é utilizado para monitoração e controle de processos de porte e complexidade variada, apresentando robustez e flexibilidade. Há mais de cinquenta anos os sistemas SCADA vêm sendo utilizadas para a monitoração em tempo real de sistemas de potência, sendo os responsáveis por fazer a conexão entre as subestações e os centros de operação.

A arquitetura de um sistema SCADA típico é representada na Figura 2.1.

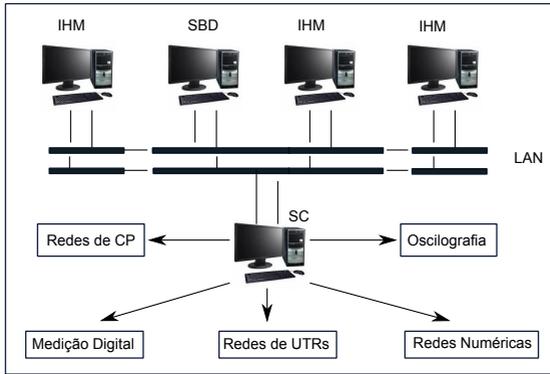


Figura 2.1 – Arquitetura de um Sistema SCADA típico.

Um sistema SCADA é constituído pelos seguintes equipamentos [11]:

- Unidades Terminais Remotas (UTRs): Essas unidades também podem ser chamadas de Unidades de Aquisição e Controle (UAC), e têm como objetivo coletar os dados de campo e transmití-los ao Servidor de Comunicação (SC);
- Servidor de Comunicação: é o equipamento destinado a fazer a coleta e tratamento dos dados de campo, e enviá-los para a Interface Homem-Máquina (IHM);
- Interface Homem-Máquina: São estações de trabalho disponíveis aos operadores do sistema, através das quais estes podem receber os dados nos formatos adequados para sua compreensão e efetuar o controle dos equipamentos de campo. Os operadores podem realizar as seguintes atividades a partir das IHM [11]:
 - supervisão do sistema elétrico das subestações;
 - execução do controle remoto de disjuntores e relés de bloqueio;
 - comando remoto dos taps de transformadores equipados com comutadores;

- controle remoto do nível de reativos e de tensão nos barramentos da subestação, dentre outros.
- Rede de comunicação: deve permitir a inclusão de vários consoles de operação, não havendo nenhuma restrição quanto à configuração das mesmas. A quantidade e a localização dos consoles é estabelecida pelas necessidades da aplicação e, dependendo do meio físico da rede, existe a possibilidade da instalação de consoles remotos a grandes distâncias, sem perda de desempenho.
- Servidor de Banco de Dados (SBD): São os equipamentos responsáveis pelo armazenamento e distribuição seletiva das informações.

Os sistemas de automação geralmente possuem uma ou mais conexões com o sistema exterior. Estas conexões são realizadas com os centros de operação, escritórios de manutenção e centros de engenharia. A maioria dos sistemas de automação se conecta por um sistema SCADA, que fornece informações necessárias para a operação em tempo real das subestações, as quais são controladas pelos centros de operações por meio de uma rede de comunicação.

Desta forma, a principal função do sistema SCADA é monitorar as atividades dos sistemas de energia elétrica, processando medidas e enviando os dados aos centros de operação. As fontes dos dados medidos são transformadores de potencial (TP) e transformadores de corrente (TC). As medidas constituem uma ponte que leva grandezas dos sistemas físicos para a tela dos monitores dos centros de operação.

As principais medidas monitoradas pelos sistemas SCADA são fluxos de potência ativa e reativa nos ramos, injeções de potência nas barras, tensões nas barras e correntes nos ramos. Entretanto, também é possível a monitoração de outras medidas conforme as necessidades de cada usuário, como por exemplo o nível de tanques de óleo, pressão, posição de taps e ventilação em transformadores.

Os valores de tensão e corrente medidos pelos TPs e TCs são injetados em dispositivos IEDs. Os IEDs contêm um ou mais processadores com capacidade de receber ou transmitir dados/controles de (ou para) um equipamento externo (medidores multifuncionais eletrônicos, relés digitais, CLPs - Controladores Lógico Programáveis). Estes dispositivos possuem recursos capazes de disponibilizar informações operacionais ou não operacionais de grande importância para os usuários da concessionária de energia.

Os sistemas SCADA modernos têm tanto software como hardware com arquiteturas distribuídas. Nestas o processamento de dados

é distribuído entre vários computadores e servidores que se comunicam por uma rede LAN (*Local Area Network*) dedicada. Outra característica importante destes sistemas é a sua arquitetura aberta, que permite interconectividade com outros sistemas.

Assim, o sistema SCADA está consolidado nos sistemas elétricos, sendo bastante utilizado e de grande confiabilidade. Porém suas medidas não são sincronizadas, fazendo com que não seja possível obter diretamente a medida da abertura angular entre as barras. Para tal, as empresas do setor elétrico utilizam a estimação de estados ou outras ferramentas matemáticas para calcular esta grandeza entre os nós críticos do sistema [12]. A equação (2.1) calcula de forma aproximada a diferença do ângulo de fase baseado na equação de transmissão de potência tradicional.

$$\delta = \text{sen}^{-1} \left(\frac{P \times X}{|V_1| \times |V_2|} \right), \quad (2.1)$$

onde: P é a transferência de potência ativa entre os nós 1 e 2;

X é a reatância entre os nós 1 e 2;

V_1 e V_2 são as tensões nos Nós 1 e 2.

A abertura angular entre os nós é um importante indicador do stress do sistema. Usando os resultados de estudos off-line e com a experiência operacional, os operadores tomam ações corretivas baseando-se na diferença angular entre os nós do sistema. Uma das limitações neste sentido é a lentidão da atualização das medições fornecidas pelo SCADA, que é da ordem de 2 a 10 segundos. Além disso, a precisão do cálculo depende da reatância do sistema, a qual por sua vez depende da topologia da rede, e assim essas informações também devem estar devidamente atualizadas. Estas dificuldades serão contornadas quando da inclusão das medidas fasoriais sincronizadas.

Portanto as medidas SCADA apresentam uma precisão na faixa de s , não são síncronas, e devido a isso é baixa a sua precisão para medidas dinâmicas de ângulo. Neste trabalho, serão consideradas como medidas de média qualidade, evidentemente superiores às pseudomedidas, porém de precisão inferior às medidas fasoriais sincronizadas.

2.3 Pseudomedidas

Diferentemente das medidas adquiridas pelo sistema SCADA em tempo real, as pseudomedidas são informações geradas a partir de informações de estudos, previsão de carga, dados de projeto, e até mesmo

do conhecimento dos operadores do sistema. Estas informações podem ser manipuladas e modeladas da mesma maneira que as medições em tempo real, de forma que possam ser utilizadas em conjunto com as telemedidas.

As pseudomedidas podem suprir a escassez de telemedidas em zonas de pouca cobertura com o sistema SCADA, resultando regiões não observáveis, o que impede a execução dos programas de estimação de estados para a totalidade da rede interligada.

Sendo assim, as pseudomedidas não são um conceito novo, mas existem desde as primeiras aplicações de estimação de estados em sistemas de potência, nas quais, por falta de um sistema observável, era necessária a inclusão desta informação adicional para garantir a observabilidade da rede como um todo [13].

Para ilustrar o conceito de pseudomedidas, considere uma barra de carga que não possui nenhuma medida adquirida em tempo real. Para esta barra, o agente de transmissão conhece, por meio do histórico de medições, a potência ativa conectada. Esta informação pode ser utilizada para gerar uma pseudomedida de injeção de potência na barra, sendo a ela atribuída uma variância que será função da confiança atribuída àquela informação. Normalmente, a ordem de grandeza desta variância é superior à das variâncias das telemedidas.

Desta forma, é possível incorporar ao modelo estático do sistema de potência diversas informações que não são provenientes de medições em tempo real. A referência [13] cita como exemplos de pseudomedidas as potência de cargas constantes nas barras do sistema, embora também possam ser utilizadas cargas variáveis durante o dia sendo a elas atribuídas variâncias que dependem de seu grau de precisão.

Na literatura são encontradas as seguintes utilizações de pseudomedidas:

- Informações de histórico de geração, utilizadas para gerar dados de injeção de potência;

- Potência gerada por geradores que tem a característica de seguir valores de carga;

- Fluxo de potência comercializada entre dois sistemas interconectados;

- Magnitudes de tensão em geradores e algumas barras controladas.

2.4 Medidas Fasoriais Sincronizadas

As Medidas Fasoriais Sincronizadas foram incorporadas recentemente ao setor elétrico, apresentando melhor precisão quando comparadas às demais medições utilizadas. No entanto, ainda estão em fase de implantação. Alguns projetos já desenvolvidos, como o Medfasee [14] da Universidade Federal de Santa Catarina, que utiliza medições na baixa tensão, demonstram a qualidade e precisão dessas medidas. O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) tem um projeto para implementação de medições fasoriais em subestações estratégicas de alta tensão, previsto para ser executado em 2015. Desta forma, torna-se interessante o desenvolvimento de algoritmos para utilizar estas medidas em conjunto com as já existentes, tema abordado neste trabalho.

2.4.1 Conceito de Fasores e Filtragem do Componente Fundamental de Sinais Elétricos

O conceito de Medidas Fasoriais Sincronizadas está diretamente ligado ao conceito de fasores, que é muito conhecido na área da Engenharia. Os fasores são utilizados para representar medidas complexas na forma de módulo e ângulo. O valor instantâneo de uma grandeza elétrica em um sistema de corrente alternada pode ser escrito conforme a Equação 2.2.

$$x(t) = X_M \cos(\omega \cdot t \times \phi) \quad (2.2)$$

onde X_M é a magnitude da medida, ω é a frequência em *rad/s* e ϕ é o ângulo de fase.

Sendo $x_{rms} = X_M / \sqrt{2}$ o valor eficaz (*rms*) deste sinal, a Equação (2.2) pode ser reescrita na forma fasorial como:

$$x(t) \iff \dot{x} = X_{rms}(\cos\phi + j\text{sen}\phi) = X_{rms}e^{j\phi} \quad (2.3)$$

Portanto, o sinal da Equação (2.3) pode ser representado graficamente por um vetor com um módulo e um ângulo de fase, chamado fasor, conforme a Figura (2.2). Porém, este tipo de representação só é válida se o sinal observado for uma senóide pura. Na prática, observa-se que os sinais elétricos muitas vezes estão contaminados por ruídos que o deturpam e, dessa forma é necessário filtrá-los, extraindo apenas a componente fundamental do sinal desejado. Esta filtragem pode ser feita utilizando a Transformada Discreta de Fourier (DFT, da sigla em

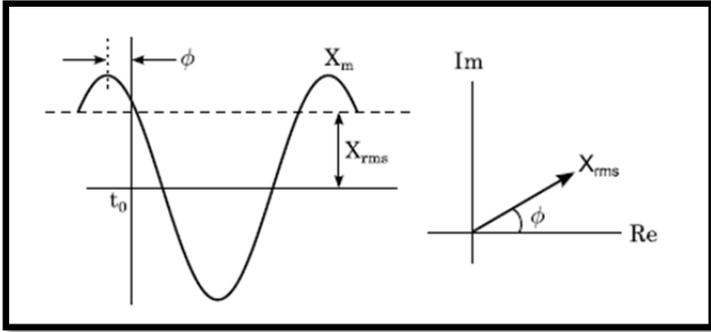


Figura 2.2 – Onda Senoidal e fasor correspondente.

inglês *Discrete Fourier Transform*) [15]. Esta transformação pode ser modelada matematicamente da seguinte forma [15] e [16].

$$x(t) = a_k \cos(2\pi k f_0 t) + b_k \sin(2\pi k f_0 t) = \left(\sqrt{a_k^2 + b_k^2} \right) \cos(2\pi k f_0 t + \phi) \quad (2.4)$$

onde

$$\phi = \arctan\left(\frac{-b_k}{a_k}\right)$$

A representação fasorial deste sinal é dada por:

$$\dot{X}_k = \frac{\sqrt{a_k^2 + b_k^2}}{\sqrt{2}} e^{j\phi} \quad (2.5)$$

que pode ser reescrito como:

$$\dot{X}_k = \frac{1}{\sqrt{2}}(a_k - jb_k) \quad (2.6)$$

Expandindo esta equação para um conjunto de N amostras do sinal $x(t)$, obtidas com um período de amostragem ΔT , e utilizando a relação entre as componentes da série de Fourier com a transformada Discreta de Fourier, a Equação 2.7 pode ser reescrita como [15].

$$\dot{X}_k = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{n=1}^N x(n\Delta T) e^{-\frac{j2\pi kn}{N}} \quad (2.7)$$

Esta equação define a representação fasorial da k -ésima harmônica do sinal $x(t)$ a partir de um conjunto de N amostras de amplitude $x(n\Delta T)$, $n = 1, \dots, N$, mesmo quando outras componentes harmônicas estiverem presentes [17]. Quando o sinal $x(t)$ não está na frequência fundamental, o fasor X_k apresentará um erro de magnitude e fase, com relação ao sinal original. Porém este erro possui características interessantes, e pode ser utilizado para determinar a correta magnitude do sinal $x(t)$ [17].

2.4.2 Sistemas de Medição Fasorial Sincronizado

Na prática, a sincronização de medidas fasoriais tornou-se possível com o surgimento do Sistema GPS (*Global Positioning System*). Desta forma, o Sistema de Medição Fasorial pode ser definido como um sistema de medição de grandezas elétricas, em instalações/ equipamentos distantes geograficamente, onde essas medidas são sincronizadas no tempo utilizando GPS, e disponibilizadas na forma de fasores [18]. A Figura 2.3 ilustra o Sistema de Medição Fasorial.

2.4.3 Arquitetura do Sistema de Medição Fasorial Sincronizado

Os Sistemas de Medição Fasorial são constituídos, na sua forma básica, por três elementos: Unidade de Medição Fasorial (*PMU, Phasor Measurement Unit*), Sistema de Sincronização e o Concentrador de Dados Fasoriais (*PDC, Phasor Data Concentrator*), conforme a Figura

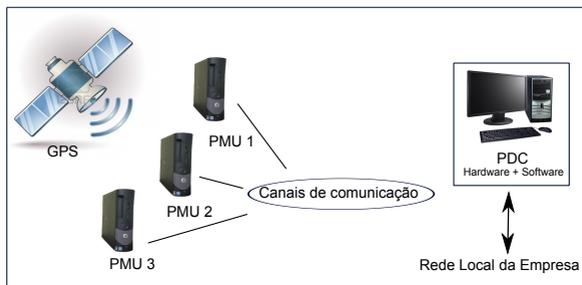


Figura 2.3 – Configuração Básica de um Sistema de Medição Fasorial.

2.3.

Unidade de Medição Fasorial

A Unidade de Medição Fasorial é um dispositivo de medição de tensões e correntes alternadas, com uma referência temporal comum, obtida através de sinais via satélite (GPS). As medidas de tensão e corrente são processadas pelas PMUs e convertidas em fasores, e então são enviadas ao concentrador de dados a taxas que variam de 10 a 60 sincrofases por segundo [19].

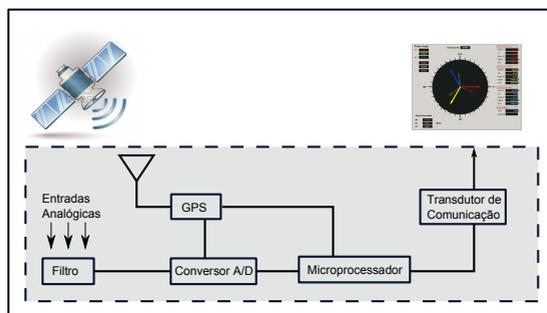


Figura 2.4 – Estrutura típica de uma PMU.

A Figura 2.4 apresenta a estrutura básica de uma unidade PMU. O processo para a obtenção das medidas fasoriais inicia na etapa da filtragem, visando evitar efeitos de *aliasing* - equivalente a uma falsa frequência gerada durante o processo de amostragem, devido à baixa

taxa de amostragem. Para evitar o efeito de *aliasing*, a taxa de amostragem, chamada de taxa de Nyquist, deve ser maior do que o dobro da maior componente de frequência que se deseja medir. Na próxima etapa, os sinais de entrada de tensão e corrente são discretizados utilizando-se conversores do tipo analógico-digital. A referência temporal de amostragem é dada pelo receptor de sinais GPS, que recebe os sinais do tipo pulsos por segundo (PPS) e, em conjunto com o oscilador do tipo “*Phase-Locked*”, fornece os instantes de amostragem [17].

A etapa seguinte é o tratamento matemático das amostras através de microprocessadores. Para isso utiliza-se a Transformada Discreta de Fourier (DFT – *Discrete Fourier Transform*), na sua forma recursiva, para converter as amostras de tensão e corrente em fasores [20].

Sistema de Sincronização

O sistema de sincronização que é utilizado para a medição fasorial pode ser tanto terrestre quanto via satélites. Os sistemas terrestres estão mais sujeitos a interferências e, com isso, podem ter limitações com relação ao nível de precisão exigido [21]. Assim, os sistemas via satélites tem sido utilizados preferencialmente. Como exemplo de sistemas de sincronização via satélite pode-se citar:

- *Global Positioning System - GPS*: teve início de desenvolvimento em 1973, estando completamente funcional em 1994, sendo utilizado primeiramente para uso militar e, com o passar do tempo, foi disponibilizado para uso civil.
- *Geostationary Operational Environmental Satellite – Glonass*: sistema russo desenvolvido inicialmente em 1976. Em 2010 permitiu cobertura completa do território russo.
- *Geostationary Operational Environmental Satellite - GOES*: sistema norte-americano de origem militar, com início de operação em 1975, usado principalmente para previsão do tempo. Este sistema atua para fornecer um conjunto contínuo de dados ambientais.
- *Galileo*: sistema europeu concebido para uso civil, teve início do desenvolvimento em 2003 e só estará completamente operacional em 2019.
- *Beidou-Compass*: sistema operacional chinês, de origem militar, com início de desenvolvimento em 2011 e previsão de cobertura mundial no ano de 2020.

Como é de suma importância que as medidas fasoriais da rede elétrica sejam confiáveis, disponíveis, e sincronizadas com uma precisão de tempo específica, o IEEE criou uma padronização de requisitos. As normas vigentes são: IEEE Std C37.118.1-2011 [22] que estabelece os requisitos de desempenho das PMUs em regime permanente e dinâmico, e também define classes de performance para estes equipamentos. E a IEEE Std C37.118.2-2011 [23] que estabelece os requisitos para a transferência de dados de medição para sistemas de potência. As medidas de ângulo, em particular, são extremamente sensíveis a erros de sincronização. Por exemplo, um erro de $1\mu s$, em um sistema de $60Hz$ representaria um erro de fase de $360 \times 1.10^{-6} \approx 0,022^\circ$.

Atualmente, o único sistema que atende a estes níveis de qualidade é o GPS. Este sistema é composto por 24 satélites, com um tempo de órbita de 12 horas, o que torna possível a visualização de 5 a 8 unidades de qualquer lugar da terra e a qualquer tempo. Ele fornece sinais de posição geográfica, com precisão horizontal de 3 a 15 metros e vertical de 27,7 metros, e sinais de tempo (PPS – Pulso por Segundo), com precisão da ordem de aproximadamente 100 nanosegundos [17].

Os sinais de tempo enviados pelo GPS são os responsáveis pela viabilização da tecnologia de medição fasorial sincronizada, pois fornecem a referência temporal necessária para realizar a sincronização das medidas. Isto garante uma precisão adequada para medições de frequência, tensão e corrente [24]. Assim os sistemas de sincronização são utilizados para que as medidas observadas em todas as PMUs sejam feitas ao mesmo tempo, o que garante que os fasores calculados estejam na mesma referência temporal.

Concentrador de Dados

Os concentradores de dados são equipamentos utilizados para concentrar os dados enviados pelas PMUs, e tem a finalidade de receber os fasores das PMUs, verificar eventuais erros de transmissão, e organizar e disponibilizar os dados para outras aplicações.

2.5 Conclusões

Neste capítulo são apresentados as classes de medidas/informações que fornecem os dados de entrada para o Estimador de Estados desenvolvido neste trabalho. São discutidas detalhadamente as características e propriedades de pseudomedidas, medidas SCADA e medidas faso-

riais. Cada uma delas apresenta precisão e propriedades distintas, porém todas podem contribuir para a melhoria da qualidade da monitoração em tempo real de sistemas elétricos de potência. Como informação, vale salientar que, no Brasil, o Operador Nacional do Sistema possui aproximadamente 62.000 medidas analógicas e 140.000 medidas digitais, consumindo uma banda de 11 Mbits/s. Há a previsão de entrada em operação nos próximos anos 181 PMUs, que geram 1267 sincrofasores, esses sincrofasores consumirão aproximadamente uma banda de 10 Mbits/s. Assim, fica evidenciado a importância das medidas SCADA para o Sistema Elétrico Brasileiro, e a importância de haver trabalhos na linha de associar outros tipos de medidas e sensores às medidas SCADA. Em que pese as características desejáveis das novas tecnologias, porém sem abrir mão da confiabilidade e simplicidade das medidas tradicionais.

3 ESTIMAÇÃO DE ESTADOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

3.1 Introdução

A estimação de estados de sistemas de potência tem como função realizar a integração e tratamento de medidas elétricas coletadas em campo através de sistemas de aquisição de dados, e processá-las em modelos matemáticos de forma que se obtenha estimativas confiáveis para o estado operativo do sistema elétrico. Na operação em tempo real de um sistema de potência, é de suma importância a determinação de um modelo preciso e confiável para a rede elétrica. A todo o momento chegam ao centro de operações do sistema informações teledadadas provenientes de toda a rede relativas aos *status* de disjuntores, tensões nas barras de carga ou geração, fluxo de potência ativa e reativa em linhas, e injeção de potência ativa ou reativa nas barras de carga e geração. A partir destas medidas e da topologia correta da rede de operação, o estimador de estados deve fazer a determinação de um modelo preciso e confiável para a condição operativa do sistema.

Neste capítulo é apresentada a formulação matemática da estimação de estados, bem como características importantes deste problema, objeto de estudo deste trabalho.

O estimador de estados se vale dos conceitos de otimização para minimização de uma função custo, que pode ser representada pelo somatório dos quadrados dos resíduos ponderados, resultando no Método dos Mínimos Quadrados Ponderados [13], ou ainda pelo somatório dos valores absolutos dos resíduos, produzindo o Método dos Mínimos Valores Absolutos Ponderados [25]. Nesta dissertação, o foco de interesse é o método dos mínimos quadrados ponderados, reconhecidamente o mais utilizado por concessionárias e operadores da indústria de energia elétrica.

Para resolução do problema de otimização resultante, existem diversos métodos, entre eles o método de Gauss-Newton, também conhecido na literatura como método da equação normal, o método da matriz aumentada, métodos baseados em transformações ortogonais, etc. Os respectivos algoritmos de solução são revistos no Capítulo 4 deste documento.

3.2 Medidas para EESP

As medidas utilizadas neste trabalho para a Estimação de Estados em Sistemas de Potência, são provenientes dos sistemas SCADA, de pseudomedidas e de medidas fasoriais sincronizadas, estas fontes foram apresentadas no Capítulo 2. Sendo assim, as medidas que serão consideradas neste trabalho são:

- Módulo de tensões nodais convencional;
- Injeções de potência ativa nodais;
- Injeções de potência reativa nodais;
- Fluxos de potência ativa;
- Fluxos de potência reativa;
- Módulo de tensões nodais (medidas fasoriais);
- Ângulo de fase das tensões nodais (medidas fasoriais);
- Parte real de medidas de corrente (medidas fasoriais);
- Parte imaginária de medidas de corrente (medidas fasoriais);

As unidades de medição fasorial (PMUs, da sigla em inglês) são capazes de fornecer medidas fasoriais de tensão nas barras onde estão instaladas, bem como medidas fasoriais de corrente em um ou mais ramos incidentes naquelas barras.

3.3 Formulação Matemática

Considerando que um sistema elétrico seja composto por N barras, as variáveis de estado, que compõem o vetor de estados \mathbf{x} são dadas neste trabalho, por:

- Módulo das tensões nodais (N elementos);
- Ângulo de fase das tensões nodais, exceto da barra de referência ($N - 1$ elementos).

Ao ângulo de referência é atribuído um valor arbitrário, geralmente 0(zero) radianos. Considerando que um sistema elétrico de potência é composto por N barras, o vetor de estados deste sistema é

portanto formado pelo módulo e ângulo da tensão complexa em todas as N barras do sistema, desconsiderando o ângulo da barra de referência. Desta forma, o número de variáveis de estado do sistema é dado por:

$$n = 2N - 1 \quad (3.1)$$

Supondo que a barra 1 é adotada como a referência angular, o vetor de estados é ordenado da seguinte forma:

$$x^T = [\theta_2, \theta_3, \dots, \theta_N, V_1, V_2, \dots, V_N] \quad (3.2)$$

O *plano de medição* é definido como o conjunto de todas as medidas disponíveis associadas ao sistema elétrico monitorado. Essas medidas estão sujeitas a ruídos nos vários níveis de processamento a que são submetidas, desde a medição em si, realizada por um transdutor, passando por estágios de conversão analógico-digital e canais de comunicação até os centros de processamento. Sendo assim, deve-se levar em conta que as medidas estão sujeitas a erros de natureza aleatória, cujas propriedades devem ser consideradas nos algoritmos de estimação de estados.

Considere que um plano de medição dado, formado por m medidas, cujos valores “verdadeiros”, sejam dados por z_0 . As medidas, contaminadas por erros aleatórios, podem ser definidas pelo seguinte modelo de medição [26]:

$$z = z_0 + \eta \quad (3.3)$$

onde z é o vetor de medidas, com dimensão $m \times 1$;

z_0 é o vetor com os valores verdadeiros (e desconhecidos) associados às medidas z , de dimensão $m \times 1$;

η é vetor com os erros associados à medição, de dimensão $m \times 1$;

Os erros de medição η são de natureza aleatória, e se considera que em condições normais apresentam distribuição Gaussiana (Normal) com média zero, ou seja [26]:

$$E \{ \eta_i \} = 0, i = 1, \dots, m \quad (3.4)$$

sendo E . o operador valor esperado.

Supõe-se ainda que os erros associados a medidores distintos são não-correlacionados, ou seja:

$$Cov\{\eta_i, \eta_j\} = 0, i, j = 1, \dots, m, \quad (3.5)$$

onde $Cov(\cdot)$ é o operador Covariância. Com essas considerações, a matriz de covariância dos erros de medição, definida por \mathbf{R} , torna-se diagonal, definida como [26]:

$$\mathbf{R} = Cov\{\boldsymbol{\eta}\} = E\{\boldsymbol{\eta} \cdot \boldsymbol{\eta}^T\} = diag\{\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_m^2\} \quad (3.6)$$

onde σ_i^2 é a variância da i -ésima medida.

Pode-se ainda considerar que os estados são relacionados às quantidades medidas de acordo com a Equação (3.7):

$$\mathbf{z}_0 = \mathbf{h}(\mathbf{x}_{verd}) \quad (3.7)$$

onde

\mathbf{x}_{verd} é o vetor com os estados verdadeiros (e desconhecidos) do sistema, de dimensão $n \times 1$;

$h(\cdot)$ é o vetor com as funções não lineares que relacionam as quantidades medidas aos estados da rede elétrica, de dimensão $m \times 1$;

Substituindo-se a Equação(3.7) em (3.3), pode-se obter a relação entre as medidas e os estados da rede, descrita pelo seguinte modelo de medição [26]:

$$\mathbf{z} = \mathbf{h}(x_{verd}) + \boldsymbol{\eta} \quad (3.8)$$

Para quantificar a informação disponível ao estimador de estados, define-se o *índice de redundância global*, simbolizado por ρ , que expressa a relação entre o número de medidas que compõem o plano de medição e o número de estados, como mostrado em (3.9):

$$\rho = \frac{m}{n} = \frac{m}{2N - 1} \quad (3.9)$$

Vale salientar que a redundância não é uma característica apenas do sistema, mas sobretudo de um determinado plano de medição associado a ele. Uma condição necessária, porém não suficiente para que o problema de estimação de estados tenha solução é que $\rho \geq 1$. Isto significa que o número de medidas deve ser sempre maior ou pelo menos igual ao número de estados do sistema. Os planos de medição com redundância próxima à unidade ficam mais vulneráveis a medidas de baixa qualidade e a erros grosseiros, o que pode comprometer a qualidade dos estados estimados.

Desta forma, a estimação de estados pode ser modelada como um problema de otimização para encontrar uma estimativa que mais se aproxime do vetor de estados \mathbf{x}_{verd} , tendo por base a minimização de algum critério predefinido. Um dos critérios mais difundidos para esta formulação é o dos Mínimos Quadrados Ponderados (MQP), que será o utilizado neste trabalho.

3.4 Formulação por Mínimos Quadrados Ponderados

O método dos Mínimos Quadrados Ponderados se vale de uma estimativa $\hat{\mathbf{x}}$ para os estados, minimizando uma função custo baseada no modelo de medição dado pela Equação (3.3). Assim, o problema a ser resolvido pode ser definido como um problema de otimização da seguinte forma:

$$\min_{\hat{\mathbf{x}}} J(\hat{\mathbf{x}}) = [\mathbf{z} - h(\hat{\mathbf{x}})]^t \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - h(\hat{\mathbf{x}})] \quad (3.10)$$

$$= \sum_{i=1}^m R_{ii}^{-1} [z_i - h_i(\hat{\mathbf{x}})]^2 \quad (3.11)$$

onde: $\mathbf{r} = \mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}})$ é o vetor dos resíduos de estimação.

O Problema (3.10) define a função objetivo \mathbf{J} cuja variável de otimização é $\hat{\mathbf{x}}$. Assim, deseja-se minimizar o índice representado pelo somatório dos quadrados dos resíduos, ponderados pelos inversos das variâncias dos erros de medição. A utilização da inversa da matriz \mathbf{R} faz com que as medidas de menor variância recebam maior ponderação do que aquelas que apresentam maiores incertezas, e portanto aquelas terão maior influência na solução da estimação de estados. O vetor de resíduos \mathbf{r} é dado pela diferença entre o valor efetivamente medido e o valor calculado pelo estimador.

A ponderação das medidas é de extrema importância para a resolução do problema. É através dela que poderão ser diferenciadas as diversas classes de medidas. Esta ponderação basicamente indica que quanto maior a incerteza com relação à quantidade medida, menor o seu peso, ou seja, menor será a importância daquela medida no resultado final.

3.4.1 Matriz Ganho - $\mathbf{G}(\mathbf{x}^k)$

Como será visto no Capítulo 4, a solução clássica do problema de Estimação de Estados é dada pela Equação Normal de Gauss. Trata-se de uma equação matricial, cuja matriz de coeficientes é frequentemente designada como “matriz ganho” [27]. A matriz Ganho é dada por:

$$\mathbf{G}(\hat{\mathbf{x}}^k) = \mathbf{H}^t(\hat{\mathbf{x}}^k)\mathbf{R}^{-1}\mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}^k) \quad (3.12)$$

onde $\mathbf{H}(\mathbf{x}_k)$ é matriz Jacobiana do modelo de medição linearizado e \mathbf{R} é a matriz de covariância dos erros de medição.

A matriz Ganho é a matriz que será usada durante o processo de fusão para se realizar a ponderação de cada classe de medida. Por se tratar de um subproduto do método da equação Normal, a implementação do módulo de fusão é facilitada.

A matriz Ganho é esparsa, simétrica e positiva definida, desde que o sistema seja observável. Devido à sua esparsidade, podem ser utilizadas técnicas de cálculo e armazenamento compacto de modo a elevar a eficiência computacional e reduzir o consumo de memória.

Outro conceito muito importante no contexto deste trabalho é o de “matriz de covariância dos erros de estimação”, que é definida como:

$$\mathbf{P}_{cov} = E \{ (\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x})(\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x})^T \} \quad (3.13)$$

A relevância desta matriz reside no fato de que seus elementos diagonais representam as variâncias dos erros de estimação para as variáveis de estado, isto é, medem o espalhamento destes erros com relação à média. Evidentemente, baixos valores de variância são desejáveis, e portanto a matriz \mathbf{P}_{cov} fornece um instrumento para se avaliar a qualidade das estimativas obtidas pelo método dos mínimos quadrados ponderados. Dada uma matriz Jacobiana \mathbf{H} associada a um determinado plano de medição, e uma matriz de covariância dos erros de medição \mathbf{R} , mostra-se que \mathbf{P}_{cov} pode ser calculado como:

$$\mathbf{P}_{cov} = (\mathbf{H}^T\mathbf{R}^{-1}\mathbf{H})^{-1} \quad (3.14)$$

Comparando (3.14) com (3.13), conclui-se portanto que

$$\mathbf{P}_{cov} = \mathbf{G}^{-1} \quad (3.15)$$

ou seja, a matriz de covariância dos erros de estimação é a inversa da matriz ganho calculada na solução do problema de estimação de estados. Este resultado será utilizado no Capítulo 5, ao se discutir a

implementação computacional dos métodos de fusão de estimativas.

3.4.2 Observabilidade da rede

A análise da observabilidade de uma rede elétrica com respeito a um determinado plano de medição visa determinar se os estados da rede podem ser obtidos a partir das medidas que compõem o plano de medição. A observabilidade da rede é determinada pelo tipo e localização das medidas, bem como pela topologia da rede. Mudanças de topologia, erros de telecomunicação e falha em equipamentos de medição podem levar à perda da observabilidade de um sistema de potência. Portanto, sempre que o plano de medição for alterado, é necessária a verificação da observabilidade da rede. Caso um sistema não seja observável será necessária a utilização de pseudomedidas, a integração de informações *a priori*, ou ainda se estimar os estados separadamente para cada ilha observável [28]. Neste trabalho serão utilizados três planos de medição um para cada classe de medida, e devido a restrições no número de medidas de algumas das classes consideradas, em alguns casos a observabilidade não será garantida. Para contornar este problema, serão utilizadas as informações *a priori* [4],[29].

3.5 Conclusões

O objetivo deste capítulo foi introduzir o assunto de interesse desta dissertação: a estimação de estados em sistemas de potência. Nele foram apresentadas as características e aplicações dos estimadores de estado. Para melhor caracterizá-lo, foi apresentada a modelagem matemática do método dos mínimos quadrados ponderados, e a formulação do problema de otimização desenvolvido a partir deste método. Discute-se também a matriz Ganho, que merece atenção especial neste capítulo pois está diretamente ligada ao módulo de fusão que será discutido no Capítulo 5, sendo este o tema principal desta dissertação. Por fim, é discutido o conceito de observabilidade da rede elétrica, outro tópico importante e bastante utilizado neste trabalho. No próximo capítulo será feita a apresentação dos principais métodos utilizados para resolver o problema de otimização apresentado neste capítulo.

4 MÉTODOS DE RESOLUÇÃO PARA ESTIMAÇÃO DE ESTADOS

4.1 Introdução

Como foi visto no capítulo anterior a Estimação de Estados em Sistemas de Potência consiste em um problema de otimização não linear de grande porte, com certo grau de complexidade em sua solução. Além disso dependendo do método de solução utilizado, está sujeito a problemas de condicionamento numérico, como será discutido em seção subsequente. Este capítulo apresenta os métodos de resolução mais utilizados para a estimação de estados, com ênfase no método da Equação Normal, que é o utilizado neste trabalho. Também se discute sucintamente o método da Matriz Aumentada, também chamado de Tableau Esparsa ou de Hachtel, e o método das Rotações Ortogonais de Givens. O capítulo é concluído com uma descrição de algumas arquiteturas de estimação de estados concebidas para possibilitar o tratamento de diferentes classes de medidas.

4.2 Método da Equação Normal

Nesta seção apresenta-se a resolução do problema de mínimos quadrados ponderados através do método clássico, que se baseia na solução da chamada Equação Normal de Gauss. Este modelo foi o primeiro a ser utilizado na resolução deste problema, e continua válido como um método de solução para a EESP. Em particular, este método possui uma facilidade especial para a formulação da Fusão de Estimativas, como será discutido no Capítulo 5.

Em sua formulação básica, o Método da Equação Normal utiliza-se apenas de dados estocásticos provenientes das telemedições realizadas na rede. A ponderação de cada telemedida é definida como sendo o inverso da variância dos erros da medição a ela associado. Assim pode-se realizar a modelagem matemática deste método a partir do Método dos Mínimos Quadrados Ponderados:

$$\min J(\hat{\mathbf{x}}) = [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}})]^t \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}})] \quad (4.1)$$

onde:

$\hat{\mathbf{x}}$ é o vetor de estados estimados,

\mathbf{z} é o vetor de medidas,

\mathbf{R} é a matriz de covariância dos erros de medição.

A condição de otimalidade para o problema representado pela Equação (4.1) é expressa por:

$$\left. \frac{\partial \mathbf{J}}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}} = 0 \rightarrow \mathbf{H}^t(\hat{\mathbf{x}})\mathbf{R}^{-1}[\mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}})] = 0 \quad (4.2)$$

onde $\mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}) = \left. \frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}}$ é a matriz Jacobiana das funções não lineares do vetor $\mathbf{h}(\mathbf{x})$, calculado no ponto representado pelo vetor de estados estimados $\hat{\mathbf{x}}$.

A Equação (4.1) não envolve restrições, porém a resolução deste problema de mínimos quadrados ponderados apresenta certo grau de dificuldade. O índice a ser otimizado é uma função quadrática, expressa em termos de um vetor de equações não lineares, relacionando os estados às quantidades medidas. Além disso, a equação (4.2), que representa a condição de otimalidade, não tem solução fechada e, portanto precisa de um método iterativo para sua resolução. Diversos métodos numéricos poderiam resolver este problema. Porém a natureza quadrática da função objetivo e ausência de restrições tornam este problema apropriado para resolver pelo método de Newton.

4.2.1 Linearização do Modelo de Medição (Método de Newton)

A aplicação de métodos iterativos para obter a solução do problema de otimização não linear descrito pela equação (4.1), requer que a estimativa corrente do vetor de estados seja atualizado com correções sucessivas dadas por:

$$\hat{\mathbf{x}}^{k+1} = \hat{\mathbf{x}}^k + \Delta \mathbf{x} \quad (4.3)$$

Para determinação do passo incremental $\Delta \mathbf{x}$ da equação (4.3), considera-se inicialmente a linearização das equações $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ em torno do ponto $\hat{\mathbf{x}}^k$, e ao longo da direção $(\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}^k)$, como a equação (4.4):

$$\mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}^k + \Delta \mathbf{x}) \approx \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}^k) + \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}^k)(\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}^k) \quad (4.4)$$

A substituição desta expressão na equação não linear $\mathbf{z} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\eta}$ fornece:

$$\mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}^k) = \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}^k)(\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}^k) + \eta \quad (4.5)$$

A equação (4.5) representa o modelo de medição linearizado, que na forma compacta é dada por (4.6):

$$\Delta \mathbf{z} = \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}^k) \Delta \mathbf{x} + \eta; E(\eta) = 0; E(\eta \eta^t) = \mathbf{R}, \quad (4.6)$$

onde $\Delta \mathbf{z}$ é o vetor dos resíduos de medição; $\Delta \mathbf{x}$ é o vetor incremental de estados.

Assim, a função objetivo do problema de Mínimos Quadrados Ponderados considerando o modelo linearizado é dada por:

$$J(\Delta \mathbf{x}) = [\Delta \mathbf{z} - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}^k) \Delta \mathbf{x}]^t \mathbf{R}^{-1} [\Delta \mathbf{z} - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}^k) \Delta \mathbf{x}] \quad (4.7)$$

e a sua condição de otimalidade é dada por:

$$\left. \frac{\partial J}{\partial \Delta \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}^k} = 0 \rightarrow \mathbf{H}^t(\hat{\mathbf{x}}^k) \mathbf{R}^{-1} [\Delta \mathbf{z} - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}^k) \Delta \mathbf{x}] = 0 \quad (4.8)$$

que também pode ser expressa da seguinte forma:

$$[\mathbf{H}^t(\hat{\mathbf{x}}^k) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}^k)] \Delta \mathbf{x} = \mathbf{H}^t(\hat{\mathbf{x}}^k) \mathbf{R}^{-1} \Delta \mathbf{z} \quad (4.9)$$

A expressão (4.9) é chamada de Equação Normal de Gauss e representa o sistema linear a ser resolvido a cada iteração para a determinação do incremento do vetor de estados $\Delta \mathbf{x}$.

A correção $\Delta \mathbf{x}$ da equação (4.9) também pode ser determinada através do método de Gauss-Newton. Para isso a função $J(\mathbf{x})$ da equação (4.1) é expandida em série de Taylor, em torno do ponto $\hat{\mathbf{x}}^k$ e ao longo da direção $\Delta \mathbf{x}$, sendo truncado no termo de segunda ordem, da seguinte forma:

$$J(\hat{\mathbf{x}}^k + \Delta \mathbf{x}) = J(\hat{\mathbf{x}}^k) + \left. \frac{\partial J(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}^k} \Delta \mathbf{x} + \frac{1}{2} \Delta \mathbf{x}^t \left. \frac{\partial^2 J(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}^2} \right|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}^k} \Delta \mathbf{x} \quad (4.10)$$

onde $\left. \frac{\partial J(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}^k}$ e $\left. \frac{\partial^2 J(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}^2} \right|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}^k}$ são respectivamente o vetor de primeiras derivadas e a matriz de segundas derivadas da função $J(\mathbf{x})$ com

relação à variável \mathbf{x} , calculados no ponto que representa a estimativa atual.

O mínimo da função (4.10) é obtido diferenciando-se esta função em relação a $\Delta \mathbf{x}$ e igualando-se a zero, como mostrado em (4.11).

$$\frac{\partial J(\mathbf{x})}{\partial \Delta \mathbf{x}} = \frac{\partial J(\mathbf{x})^t}{\partial \mathbf{x}} \Big|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}^k} \Delta \mathbf{x} + \frac{\partial^2 J(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}^2} \Big|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}} \Delta \mathbf{x} = 0 \quad (4.11)$$

Ou também:

$$\frac{\partial^2 J(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}^2} \Big|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}} \Delta \mathbf{x} = - \frac{\partial J(\mathbf{x})^t}{\partial \hat{\mathbf{x}}} \Big|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}^k} \quad (4.12)$$

O vetor Gradiente $\frac{\partial J(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \Big|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}^k}$ é dado por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial J(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \Big|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}} &= \left(\frac{\partial \{ [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})]^t \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})] \}}{\partial \mathbf{x}} \right) \Big|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}^k} \\ &= -2 \left(\frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right)^t \Big|_{\hat{\mathbf{x}}=\hat{\mathbf{x}}} \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})]_{\hat{\mathbf{x}}=\hat{\mathbf{x}}^k} \\ &= -2 \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}^k)^t \mathbf{R}^{-1} \Delta \mathbf{z} \end{aligned} \quad (4.13)$$

onde $\mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}^k)$ e $\Delta \mathbf{z}$ Têm os mesmos significados citados anteriormente. Assim aplica-se o mesmo procedimento para o cálculo da matriz de segundas derivadas de $J(\mathbf{x})$, obtendo-se:

$$\frac{\partial^2 J(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}^2} \Big|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \left[-2 \left(\frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right)^t \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})] \right]_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}^k} \quad (4.14)$$

Sabendo-se que nas proximidades da solução as variações na matriz $\mathbf{H}(\mathbf{x})$ são desprezíveis, ou seja:

$$\mathbf{H}(\mathbf{x}) = \frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \approx \text{constante} \quad (4.15)$$

Então:

$$\left. \frac{\partial^2 J(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}^2} \right|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}^k} \approx -2\mathbf{H}^t(\hat{\mathbf{x}}^k)\mathbf{R}^{-1}\mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}^k)$$

Dessa forma a equação (4.12) pode ser reescrita como:

$$[\mathbf{H}^t(\hat{\mathbf{x}}^k)\mathbf{R}^{-1}\mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}^k)] \Delta \mathbf{x} = \mathbf{H}^t(\hat{\mathbf{x}}^k)\mathbf{R}^{-1}\Delta \mathbf{z} \quad (4.16)$$

Conclui-se portanto que a equação (4.16) é a mesma expressão obtida a partir do modelo de medição linearizado.

4.2.2 Implementação e Aspectos Computacionais Método da Equação Normal

No sistema linear expresso pela Equação (4.16), a matriz \mathbf{R} é diagonal. Com esta característica o produto matricial $(\mathbf{H}^t\mathbf{R}^{-1}\mathbf{H})$, denominado de Matriz Ganho ou de Informação, é aproximadamente duas vezes mais denso do que a Matriz \mathbf{H} . Com relação à matriz \mathbf{H} , ela é esparsa, e portanto a matriz de informação possui também um número reduzido de elementos não nulos, o que possibilita o uso de técnicas de compactação e esparsidade. Por fim esta matriz é simétrica em estrutura e valores numéricos e, supondo que o sistema de potência é observável com relação ao plano de medição disponível, é também positiva definida, fato este que facilita a sua fatoração [30]. Os elementos da Matriz Jacobiana $\mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}^k)$ são obtidos a partir da derivação das expressões de $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ que é o vetor das funções das medidas, (cujas expressões são de fluxo de potência nas linhas de transmissão, injeção de potência ativa e reativa nas barras, magnitude e fase de tensões, e correntes nos ramos da rede), com relação ao vetor de estados \mathbf{x} , que representa a magnitude e o ângulo das tensões nas barras do sistema.

O processo iterativo para solução da equação normal de Gauss é iniciado a partir de uma estimativa inicial $\hat{\mathbf{x}}^0$, que frequentemente corresponde ao perfil plano de tensões nodais, isto é, módulos das tensões iguais a 1,0 pu e ângulos iguais a zero radianos. A cada iteração os incrementos nas variáveis de estado $\Delta \hat{\mathbf{x}}$ são obtidos resolvendo-se a equação (4.16). A atualização do vetor de estados é obtida através da relação iterativa representada na Equação (4.3), até que o critério $\max|\Delta \hat{\mathbf{x}}_k| \leq \epsilon$, onde ϵ é uma tolerância pré estabelecida.

Um aspecto a ser considerado quando se emprega o método da equação normal é que há uma tendência de mau condicionamento numérico. Isto pode ser verificado examinando-se o número de condi-

onamento da *matriz ganho*. Este índice pode ser calculado para uma dada matriz quadrada \mathbf{C} da seguinte forma:

$$\text{Cond}(\mathbf{C}) = \frac{\sigma_M}{\sigma_m} \quad (4.17)$$

onde σ_M é o maior auto valor da matriz $\mathbf{C}^t\mathbf{C}$. σ_m é o menor auto valor da matriz $\mathbf{C}^t\mathbf{C}$.

A função $\text{Cond}(\mathbf{C})$ mede o quanto pequenas perturbações na matriz \mathbf{C} afetam a solução do sistema linear $\mathbf{C}\mathbf{x} = \mathbf{b}$. Para a equação normal de Gauss, pode-se provar que [30]:

$$\text{Cond}(\mathbf{H}^t\mathbf{H}) = (\text{Cond}(\mathbf{H}))^2 \quad (4.18)$$

Ou seja, se \mathbf{H} não for bem condicionada, $\mathbf{H}^t\mathbf{H}$ tenderá a ser mal condicionada.

A partir da formulação matemática da solução da EESP via equação Normal de Gauss, pode-se representar o algoritmo corresponde como na Figura (4.1).

4.2.3 Inclusão de Informações *a Priori* ao Método da Equação Normal

Este trabalho aborda a estimação de estados descentralizada com técnicas de fusão de dados, sendo os estimadores de estados todos baseados no método da equação Normal. Devido a características de algumas classes de medidas, como as medições fasoriais, poderão ocorrer planos de medição em relação aos quais a rede é não-observável. Sendo assim, serão utilizadas informações *a priori* para estender de forma virtual o plano de medição e assim recuperar a observabilidade.

Inicialmente, é importante diferenciar as informações *a priori* das pseudomedidas. As informações *a priori* dizem respeito apenas aos estados do sistema. À falta de dados de melhor qualidade, pode-se até mesmo adotar valor unitário (em p.u.) para a magnitude de tensão e zero radiano para o ângulo das tensões nodais. Estas são aproximações com alto grau de incerteza mas que, atribuídas às barras apropriadas, garantem a recuperação da observabilidade. Por outro lado, as pseudomedidas são informações não telemidas provenientes de qualquer natureza, que estejam disponíveis ao operador, conforme já discutido

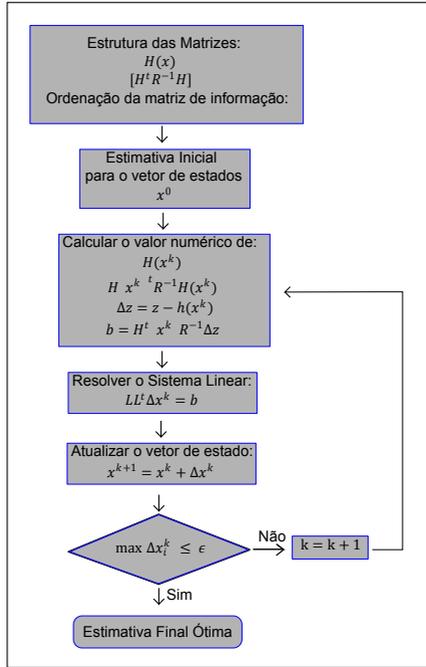


Figura 4.1 – Algoritmo de resolução via Equação Normal.

no Capítulo 2. Em geral se considera que elas tenham uma precisão melhor do que as informações *a priori*. Após esse esclarecimento acerca das informações *a priori*, pode-se apresentar a forma de inclusão das mesmas na equação Normal.

Para se levar em consideração as informações *a priori* no método da equação Normal é preciso acrescentar o termo (4.19) a função objetivo (4.1) [31]:

$$\frac{1}{2}(\hat{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}})^t \mathbf{P}^{-1}(\hat{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}}) \quad (4.19)$$

onde $\bar{\mathbf{x}}$ é o vetor $(n \times 1)$ formado pelos valores *a priori* das variáveis de estado; \mathbf{P} é a matriz de covariância das informações *a priori* de ordem $(n \times n)$.

Na prática, supõe-se que a matriz \mathbf{P} é diagonal, sendo o seu i -ésimo termo diagonal a variância $\bar{\sigma}_i^2$ da informação *a priori* \bar{x}_i . Apli-

cando as condições de otimalidade ao problema aumentado chega-se na seguinte equação [31].

$$[\mathbf{H}^t \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H} + \mathbf{P}^{-1}] \Delta \mathbf{x} = \mathbf{H}^t \mathbf{R}^{-1} \Delta \mathbf{z} + \mathbf{P}^{-1} \Delta \bar{\mathbf{x}} \quad (4.20)$$

onde: $\Delta \bar{\mathbf{x}} \triangleq (\bar{\mathbf{x}} - \mathbf{x}^k)$.

Dessa forma, a consideração de informações a priori implica na substituição da Equação (4.9) pela Equação (4.20) na solução do problema de Estimação de Estados. Esse conceito é relevante para o desenvolvimento das Técnicas de Fusão de Estimativas, como será visto nos capítulos seguintes.

4.3 Outros Métodos de Solução da EESP

4.3.1 Método da Matriz Aumentada

Como foi observado, o método da Equação Normal de Gauss apresenta restrições de estabilidade numérica, em função da forma das matrizes utilizadas. Para contornar estas dificuldades foram desenvolvidos métodos alternativos. Um deles é o Método da Matriz Aumentada [5], também chamado de Tableau Esparsa ou de Hachtel. Este método é considerado como sendo intermediário no critério de estabilidade numérica, sendo melhor quando comparado com a Equação Normal, porém inferior ao Método de Rotações Ortogonais, que será apresentado na próxima subseção. Além disso, o seu desempenho quanto a requisitos de memória e número de operações, medido a partir de testes realizados com vários problemas esparsos de estrutura diferentes, também é muito satisfatório, em comparação com outros métodos de solução de sistemas esparsos redundantes [6]. Além destes atributos este método também é relativamente simples de ser implementado, fato este que faz com que ele sirva de base para pacotes de estimação de estados disponíveis comercialmente. Descrições detalhadas do Método da Matriz Aumentada podem ser encontradas nas referências [5],[6].

4.3.2 Método das Rotações Ortogonais de Givens

Por fim, devem ser mencionados os métodos ortogonais, e em particular o Método das Rotações Ortogonais de Givens, cujo desenvolvimento foi motivado pelas propriedades de robustez numérica das

transformações ortogonais, que se mostram muito superiores às do método da Equação Normal de Gauss [7],[32],[33]. O Estimador Ortogonal mais utilizado em aplicações à EESP tem por base as Rotações de Givens.

O método consiste na aplicação de sucessivas rotações de plano entre as linhas da matriz Jacobiana e as linhas de uma matriz triangular superior (aumentada por um vetor independente). Na prática, no curso das rotações a matriz triangular superior \mathbf{U} “absorve” toda a informação contida na matriz Jacobiana, enquanto o vetor independente \mathbf{y} absorve a informação contida nas medidas. Ao final do processamento de todas as medidas, o vetor de estados incrementais é obtido simplesmente resolvendo-se o sistema triangular no qual a matriz \mathbf{U} resultante é a matriz de coeficientes e o vetor \mathbf{y} final é o vetor independente [7],[33].

Um subproduto importante das rotações de Givens é a soma ponderada dos quadrados dos resíduos, que se torna prontamente disponível sem custo computacional após a aplicação de todas as rotações. A partir desta quantidade, pode-se proceder a detecção de erros grosseiros [32]. Outra característica que chama atenção no método de Givens é a possibilidade de remover efeitos de qualquer linha da matriz Jacobiana e de sua medida associada, no caso da detecção e identificação de erros grosseiros [32]. Além disso, essas técnicas trabalham com informações *a priori* com menor custo computacional.

4.4 Arquiteturas de Estimação para Classes Distintas de Medidas

Após a apresentação da formulação do problema de estimação de estados e dos respectivos métodos de solução esta seção trata da arquitetura dos estimadores de estados que processam diferentes classes de medida, como por exemplo medidas SCADA e medidas fasoriais sincronizadas. Conforme [4], existem três diferentes estratégias possíveis para incorporar as medidas fasoriais sincronizadas ao processo de estimação de estados, as quais são abordadas nesta seção. Essas foram categorizadas como: estimadores de estado apenas com medidas fasoriais, estimadores de estado centralizados, e estimadores de estado com múltiplos estágios.

4.4.1 Estimadores de Estado apenas com medidas fasoriais

A utilização deste tipo de estimador tem objetivo de utilizar um vetor de medidas composto somente com medidas fasoriais de tensão nas barras e medidas de corrente em ramos da rede elétrica [34]. Uma dificuldade desta abordagem é que a instalação de PMUs nas redes elétricas ocorre de forma gradual, sendo que ainda não contempla todas as barras do sistema, o que ocorre tanto por dificuldades técnicas como econômicas [35], [36], [37]. Entretanto, alguns trabalhos indicam que não é necessária a instalação de medidas fasoriais em todas as subestações para garantir a observabilidade da rede. Considerando que as PMUs fornecem medidas de corrente em todos os ramos adjacentes às barras onde estão instaladas, o número de unidades necessárias podem ser de aproximadamente 20% do número de nós do sistema, podendo variar de acordo com o plano de medição [36]. Nesta abordagem, é importante levar em consideração as seguintes observações:

- Considerando que as medidas disponíveis incluem os próprios estados, e que as medidas de corrente podem ser expressas como funções lineares dos estados em coordenadas polares, é possível a utilização de estimadores lineares, os quais são mais rápidos e eficientes;
- Estes estimadores necessitam que a rede apresente observabilidade apenas com medidas fasoriais, o que não é uma realidade para a grande maioria das redes elétricas, mesmo considerando que existam algoritmos que otimizam a alocação de PMUs, reduzindo assim o número de unidades totais.
- Este tipo de estimador não utiliza de nenhum benefício do uso dos estimadores convencionais baseados em medidas SCADA, sendo esta uma das suas principais desvantagens, uma vez que os sistemas SCADA proporcionam uma estrutura confiável, e ampla cobertura da rede elétrica. Além disso, muito foi investido em pesquisa e implementação destes sistemas, não sendo viável o simples descarte do mesmo.
- Por fim, como o número de medidas fasoriais disponíveis é menor do que as do sistema SCADA, essa opção implica em baixo índice de redundância global dos planos de medição, levando a uma diminuição da confiabilidade dos estimadores e aumentando a sua vulnerabilidade a erros de medição e a dados espúrios, dentre outras perdas significativas.

Existem muitos trabalhos que abordam a inclusão de medidas fasoriais na EESP, e muitos desses citam a utilização de estimadores de estado apenas com medidas fasoriais como uma das opções. Porém, a grande maioria propõe estratégias alternativas que, de alguma forma, considerem também a utilização das medidas SCADA [35], [38], [39], [40].

4.4.2 Estimadores de Estado Centralizados

Outra estratégia utilizada para inclusão de medidas fasoriais na estimação de estados é expandindo os estimadores convencionais para que passem a considerar também estas medidas [35], [38], [41], [42], [43], [44], [37]. Não há um consenso para os nomes dados a esse tipo de estratégia, mas como é um estimador que centraliza o processamento de todas as medidas, conforme a Figura 4.3, esta estratégia foi chamada de estimador centralizado em [4], embora seja também conhecida como estimador híbrido simultâneo.

Para implementar essa estratégia, algumas modificações no algoritmo dos estimadores convencionais são necessárias, o que corresponde à expansão das variáveis do modelo de medição da Equação (3.8), para que o estimador convencional passe a modelar e processar medidas fasoriais. Se forem incluídas também as pseudomedidas, o modelo estendido pode ser representado por:

$$\mathbf{z} = (\mathbf{z}_{ps}^T \quad \mathbf{z}_s^T \quad \mathbf{z}_f^h)^T, \quad (4.21)$$

$$\mathbf{h} = (\mathbf{h}_{ps}^T \quad \mathbf{h}_s^T \quad \mathbf{h}_f^h)^T, \quad (4.22)$$

$$\mathbf{n} = (\mathbf{n}_{ps}^T \quad \mathbf{n}_s^T \quad \mathbf{n}_f^T)^T \quad (4.23)$$

onde os subscritos ps , s e f representam respectivamente as pseudomedidas, medidas SCADA e medidas fasoriais.

Devido a estas modificações, as matrizes Jacobiana e de covariância dos erros de medição são também expandidas, resultando em:

$$\mathbf{z} = \begin{pmatrix} \mathbf{H}_{ps} \\ \mathbf{H}_s \\ \mathbf{H}_f \end{pmatrix} e \mathbf{R} = \begin{pmatrix} \mathbf{R}_{ps} & \vdots & 0 \\ \dots & \mathbf{R}_s & \dots \\ 0 & \vdots & \mathbf{R}_f \end{pmatrix} \quad (4.24)$$

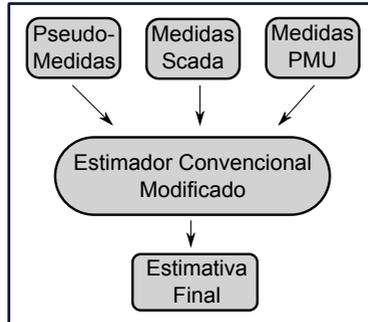


Figura 4.2 – Estrutura do Estimador Centralizado.

A utilização de um estimador já existente pode apresentar algumas dificuldades devido à falta de conhecimento quanto ao código utilizado, a linguagem de programação utilizada, e códigos de programação fechados, impossibilitando o acesso ou a modificação do algoritmo. Por outro lado, elaborar um novo estimador, totalmente independente do existente, levaria ao desuso do estimador existente, o que pode não ser uma alternativa financeiramente viável, uma vez que todo o investimento já realizado seria perdido, além da perda de uma ferramenta confiável e já consolidada.

Outra provável dificuldade de implementação prática deste modelo é que o estimador da Figura 4.2 recebe simultaneamente informações pseudomedidas, medidas SCADA e medidas fasoriais, o que corresponde a um grande volume de informações, gerando necessidade de aumento de capacidade de processamento, transmissão e armazenamento. Por isso, a capacidade dos equipamentos de comunicação e processamento deve ser rigorosamente avaliada, e ter um alto peso na hora da tomada da decisão sobre qual estratégia utilizar em cada situação.

4.4.3 Estimador de Estados de Múltiplos Estágios

Esta alternativa considera a inclusão das medidas fasoriais na estimação de estados, porém sem descartar a ferramenta e as medidas que já estão em uso, com intuito de agregar a qualidade e precisão das medidas fasoriais à confiabilidade proporcionada pelo estimador já consolidado, baseado em medidas SCADA.

A estratégia baseada em múltiplos estágios consiste em processar em etapas separadas as pseudomedidas, as medidas SCADA e as medidas fasoriais e, por fim, realizar uma combinação entre os resultados processados para obter uma estimativa final. Este método permite a inclusão de qualquer nova classe de medidas ao processo de estimação de estados, sendo uma extensão de outros processos que incluíam apenas duas classes de medidas distintas [4],[45]. A Figura 4.3 ilustra esta alternativa.

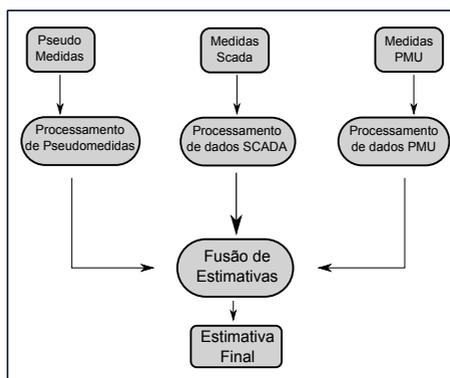


Figura 4.3 – Estrutura do Estimador de estados em dois estágios.

De uma forma geral, pode-se salientar as seguintes características dessa estratégia:

- Esta arquitetura é capaz de preservar totalmente a estrutura de monitoração em tempo real já existente, tanto associada ao sistema de medição (SCADA), quanto os próprios estimadores.
- Os benefícios associados às medidas Fasoriais são incorporadas por novos módulos independentes, que não necessitam de informações específicas dos sistemas existentes, e sim de acesso a sua saída e aos dados de rede.

- Todos os conjuntos de medidas – SCADA, pseudomedidas, e fasoriais – são processados de forma distribuída, reduzindo os requisitos de capacidade de comunicação e processamento de dados, o que pode ser observado na Figura 4.3.
- Apesar das medidas fasoriais serem processadas separadamente das medidas SCADA e pseudomedidas, o requisito de observabilidade da rede apenas com as PMUs pode ser relaxado utilizando-se de artifícios, como o uso de informações *a priori*, conforme apresentado na primeira seção deste capítulo.

4.5 Conclusões

As arquiteturas de estimação de estados apresentadas na Seção 4.4 foram todas elas implementadas e simuladas, para comparação de resultados. A proposta deste trabalho é a utilização da metodologia de dois estágios. O uso desta estratégia não significa que os processos sejam executados de forma seqüencial. Pelo contrário, considera-se um cenário em que os três módulos de estimação são executados em paralelo, sendo o módulo de fusão executado quando as estimativas individuais, baseadas em cada classe de dados, estiverem disponíveis. A característica marcante deste método é que o mesmo não altera os estimadores já existentes, podendo-se aproveitar a experiência e a confiabilidade acumuladas com seu uso ao longo do tempo. Além disso, a arquitetura proposta permite a agregação de novas classes de medidores além das consideradas nesta dissertação.

5 FUSÃO DE DADOS E ESTIMATIVAS

5.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados os princípios da Teoria da Fusão de Dados e Estimativas, seguida por uma descrição de seu uso na aplicação de interesse deste trabalho. O capítulo também inclui uma revisão bibliográfica acerca do assunto.

5.2 Teoria da Fusão de Dados

A fusão de dados de múltiplos sensores é uma teoria que vem sendo estudada para aplicação em diversos setores, onde existem aplicações que utilizam um conjunto de sensores distintos para monitoração de um mesmo processo. As principais áreas de aplicação dessas técnicas são: militar [46], robótica [47], medicina [46] e segurança pública (por exemplo em análise e reconhecimento de imagens), bem como em processos industriais (detecção de falhas, monitoramento e controle de processos) [48].

As técnicas de fusão de dados envolvem a combinação das informações coletadas por diversas fontes (sensores), para derivar informações úteis que não são fornecidas pelos mesmos sensores individualmente, visando principalmente melhorar a confiabilidade e a exatidão dos resultados obtidos. Desta forma o procedimento de medição baseado em técnicas de fusão de dados permite que o sistema se torne mais tolerante a falhas e com capacidade para prover novas informações o que, como foi dito anteriormente, não poderia ser obtido a partir dos sensores individualmente [49].

Algumas aplicações de fusão de dados são voltadas à solução do problema de refinamento dos valores obtidos pelo processamento dos dados. Especificamente no caso de instrumentação, a fusão de dados pode ser utilizada como uma ferramenta capaz de reduzir potencialmente as incertezas associadas às medições, aumentando a confiança dos resultados medidos, através da combinação dos dados individuais [50].

Nos sistemas de medição, cada tipo de medida (sensor) tem as suas próprias características, bem como limitações, conforme abordado anteriormente no capítulo 2 sobre Fontes de Dados para Estimadores. Em muitos casos, algumas características de cada sensor são necessá-

rias ou desejáveis para um plano de medição em particular, como a precisão e confiabilidade, e são limitadas por restrições como o custo ou a dificuldade de implantação de cada tipo de sensor.

Levando-se em consideração essas características, pode-se definir de uma forma mais oportuna a localização de cada sensor. Por exemplo, as medidas PMUs podem ser instaladas em troncos de maior importância de monitoramento para o sistema, normalmente onde se tem preocupação com oscilações de estabilidade, já que as PMUs têm maior precisão para monitorar esses fenômenos. Após estarem instaladas, o estimador poderia também aproveitar estas medidas.

Da mesma forma, com relação às pseudomedidas, elas seriam utilizadas prioritariamente onde o sistema não fosse observável com medidores on-line, com o objetivo de melhorar o plano de medição em uso. Assim as estimativas finais obtidas por esta estratégia de estimação seria o uso do conjunto dos sensores SCADA, que já estão em funcionamento no sistema, com as pseudomedidas utilizadas em regiões não observáveis da rede, e as medidas oriundas de PMUs distribuídas em pontos estratégicos do sistema.

Assim, aplicações de sistemas de múltiplos sensores se sustentam nas limitações fundamentais inerentes à descrição de um ambiente baseado em sistemas com um único sensor, com as seguintes características [49]:

- Um único tipo de sensor irá ter informações parciais sobre o seu ambiente de operação, tornando-se insuficiente para interpretar completamente a todos os eventos e limitado na resolução de ambigüidades;
- As observações a partir de um único sensor podem ser incertas e ocasionalmente espúrias ou incorretas. Sistemas com um único sensor não tem capacidade de reduzir esta incerteza intrínseca ou medidas errôneas;
- Os diferentes sensores fornecem tipos diferentes de informação apropriados para diferentes circunstâncias e aplicações;
- Sistemas que utilizam um único sensor tem menor robustez, e são mais propensos a falhas, que podem trazer consequências drásticas em sistemas críticos;
- Além disso, algumas informações acerca do sistema só podem ser obtidas através dos métodos de fusão, não sendo disponíveis em sistemas monitorados por uma única classe de sensores.

Desta forma, os objetivos dos métodos de fusão consistem em utilizar ativamente a diversidade de informações disponíveis a partir de múltiplos sensores para superar as limitações que podem conter os métodos de um único sensor [49]. Apesar de cada tipo de sensor ser capaz de proporcionar um aspecto diferente do sistema, um grupo de sensores aplicados em conjunto podem interagir, e gerar informações mais robustas e completas. A natureza dessas interações irão determinar como é definido o modelo de fusão [51],[52],[53]:

- **Fusão complementar:** é a fusão de informações incompletas obtidas de cada sensor. Neste caso existem diferentes grupos de sensores instalados em diferentes locais do sistema, ou ainda cada tipo de sensor é utilizada para diferentes medidas;
- **Fusão Competitiva:** é a fusão de informações redundantes com relação à região monitorada e a informação, de forma a tornar o sistema mais confiável e tolerante a falhas. Neste caso, todos os sensores medem a mesma parte ou aspecto do ambiente;
- **Fusão cooperativa:** é a fusão de informações a partir de sensores independentes, de forma que se possa obter dados e informações que não estariam disponíveis a partir dos sensores de forma individual. Isto permite a aquisição de novas informações;
- **Fusão Independente:** é a fusão de dados a partir de sensores não relacionados, para a armazenagem das informações em uma estrutura comum de dados.

Assim pode-se classificar os tipos de fusão conforme a Tabela (5.1):

5.2.1 Estimação de Estados com Métodos de Fusão

Como visto anteriormente a fusão de dados alia técnicas utilizadas nos mais diversos setores, com a intenção de obter o melhor resultado possível utilizando-se os sensores disponíveis no sistema. O desafio dos métodos de fusão é combinar os dados obtidos de sensores de diferentes classes de qualidade e diferentes tecnologias.

Este conceito de reunir e combinar informações de várias fontes para melhorar as disponíveis com uma única classe de sensor pode ser utilizado na Estimação de Estados em Sistemas de Potência, com o objetivo de promover a combinação (fusão) de sensores SCADA, PMUs

Tabela 5.1 – Classificação dos métodos de fusão.

Classificação	Região de Cobertura	Objetivo
Complementar	Diferentes	Complementação da informação
Competitiva	A mesma (Dados Redundantes)	Melhora da confiança do sistema
Cooperativa	A mesma	Obter informações que não poderiam ser obtidas pelos sensores individualmente
Independente	A mesma ou diferente	Armazenar em um mesmo banco de dados, informações obtidas a partir de diferentes sensores

e pseudomedidas. Neste contexto, um ramo da Fusão de Dados de Múltiplos Sensores tem um interesse em particular: é a Fusão Descentralizada de Estimativas, que se preocupa com a combinação de dados processados por conjuntos distintos de sensores [54], [9]. A Figura 5.1 ilustra essa arquitetura de fusão em particular:

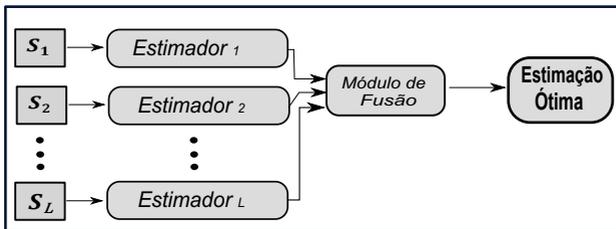


Figura 5.1 – Estimador Descentralizado.

Nas próximas seções são apresentadas a metodologia e a formulação matemática da fusão de estimativas. Será dada atenção especial ao problema com 3 sensores, que é o foco deste trabalho.

5.2.2 Fusão de Estimativas Aplicadas para o Estimador de Estados Baseado em Medidas PMU, SCADA e Pseudomedidas

Neste trabalho é proposta a aplicação dos conceitos de fusão de dados de múltiplos sensores para combinar, de maneira ótima em um sentido a ser definido, estimativas obtidas a partir de três diferentes fontes de informação: sistema SCADA, sistema de medição fasorial e pseudomedidas. Para isso essas medidas serão tratadas como diferentes classes de sensores, sendo utilizados para monitorar o mesmo processo, ou seja a rede dos Sistemas de Potência. Desta forma, cada um desses conjuntos de monitoramento terão as suas próprias medições, a fim de produzir estimativas de estados independentes que irão refletir a condição de operação do sistema de potência naquele momento.

5.2.3 Formulação Matemática do Problema de Estimação Descentralizado

Considere que um processo, seja monitorado por ℓ conjuntos de sensores distintos. Baseado nos dados disponíveis de cada conjunto, pode-se assumir que um vetor de estimativas $\hat{\mathbf{x}}_k(n \times 1)$, onde $k = 1, \dots, \ell$, é obtido para as variáveis de estado do sistema. Além disso, os erros de estimativas resultantes podem ser correlacionados, de modo que a matriz de covariância $n.\ell \times n.\ell$ correspondente é dado por:

$$\mathbf{P}_a = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_1 & \mathbf{P}_{12} & \dots & \mathbf{P}_{1\ell} \\ \vdots & \mathbf{P}_2 & \dots & \vdots \\ \vdots & \dots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{P}_{\ell 1} & \dots & \dots & \mathbf{P}_\ell \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

O problema de fusão ótima de estimativas busca determinar uma combinação linear das estimativas individuais de cada grupo de sensores, \hat{x}_i , ou seja:

$$\hat{\mathbf{x}}_i^* = \mathbf{W}_1^t \hat{\mathbf{x}}_1 + \dots + \mathbf{W}_\ell^t \hat{\mathbf{x}}_\ell \triangleq \mathbf{W}^t \hat{\mathbf{x}}_a \quad (5.2)$$

onde: $\hat{\mathbf{x}}_i^*$ é o vetor de estimativas ótimas após a fusão. $\mathbf{W}_1, \dots, \mathbf{W}_\ell$ são as matrizes $n \times n$ de ponderação, e:

$$\mathbf{W}^t \triangleq [\mathbf{W}_1^t, \dots, \mathbf{W}_\ell^t] \quad (5.3)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_a^t = [\hat{\mathbf{x}}_1^t, \dots, \hat{\mathbf{x}}_\ell^t]^t \quad (5.4)$$

As matrizes de ponderação \mathbf{W}_i são obtidas resolvendo-se o problema de otimização a seguir:

$$\min_W E (\mathbf{W}^t \hat{\mathbf{x}}_a - \mathbf{x}) (\mathbf{W}^t \hat{\mathbf{x}}_a - \mathbf{x})^t \quad (5.5)$$

sujeito a:

$$\sum_{i=1}^{\ell} \mathbf{W}_i = \mathbf{I}$$

onde:

E é o operador Valor Esperado;

x é o vetor de valores verdadeiros das variáveis de estado;

I é uma matriz identidade $n \times n$;

ℓ é o número de classes de sensores;

W_i é a matriz de ponderação de cada classe de sensor.

O Problema (5.5) visa minimizar a covariância do erro de estimação ($\hat{x}^* - x$), impondo a restrição às matrizes de ponderação W_i . Este estimador é portanto referido como Estimador Linear Não-tendencioso de Mínima Variância (*Linear Unbiased Minimum Variance Estimator*, em inglês) [54], [55]. Considerando-se que a matriz de covariância \mathbf{P} em (5.1) é não-singular, pode-se demonstrar que a solução do Problema (5.5) é única, e as matrizes de ponderação \mathbf{W}_i podem ser obtidas de [56], Teorema 6.2.3, pág. 167:

$$\mathbf{W} = \mathbf{P}^{-1} \mathbf{A}^t (\mathbf{A} \mathbf{P}^{-1} \mathbf{A}^t)^{-1} \quad (5.6)$$

e da Equação (5.3), onde \mathbf{P} é dado pela Equação (5.1) e

$$\mathbf{A} = [\mathbf{I} \quad \mathbf{I} \quad \dots \quad \mathbf{I}] \quad (5.7)$$

Para o caso particular de três classes de sensores ($\ell = 3$), considera-se inicialmente que os erros de estimação associados a cada classe individual são não-correlacionados com os erros das demais classes, já que os processos de estimação são independentes. Isto implica em que as submatrizes $\mathbf{P}_{ij}, i \neq j$, na Equação (5.1) são todas nulas.

Consequentemente:

$$\mathbf{P}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{11}^{-1} & & \\ & \mathbf{P}_{22}^{-1} & \\ & & \mathbf{P}_{33}^{-1} \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

onde \mathbf{P}_{ii} é a matriz de covariância dos erros de estimação gerados por cada classe de sensor. Além disso:

$$\mathbf{A} = [\mathbf{I} \quad \mathbf{I} \quad \mathbf{I}] \quad (5.9)$$

onde \mathbf{I} é uma matriz identidade de dimensão igual ao número de estados do processo a serem estimados.

Substituindo-se (5.8) e (5.9) no argumento da matriz inversa no lado direito da Equação (5.6), obtém-se:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}\mathbf{P}^{-1}\mathbf{A}^t &= [\mathbf{I} \quad \mathbf{I} \quad \mathbf{I}] \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{11}^{-1} & & \\ & \mathbf{P}_{22}^{-1} & \\ & & \mathbf{P}_{33}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{I} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix} \\ &= \mathbf{P}_{11}^{-1} + \mathbf{P}_{22}^{-1} + \mathbf{P}_{33}^{-1} \end{aligned} \quad (5.10)$$

Substituindo-se (5.10) na Equação (5.6) e depois de algumas manipulações algébricas, obtém-se:

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{11}^{-1} \\ \mathbf{P}_{22}^{-1} \\ \mathbf{P}_{33}^{-1} \end{bmatrix} (\mathbf{P}_{11}^{-1} + \mathbf{P}_{22}^{-1} + \mathbf{P}_{33}^{-1})^{-1} \quad (5.11)$$

ou:

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{11}^{-1} (\mathbf{P}_{11}^{-1} + \mathbf{P}_{22}^{-1} + \mathbf{P}_{33}^{-1})^{-1} \\ \mathbf{P}_{22}^{-1} (\mathbf{P}_{11}^{-1} + \mathbf{P}_{22}^{-1} + \mathbf{P}_{33}^{-1})^{-1} \\ \mathbf{P}_{33}^{-1} (\mathbf{P}_{11}^{-1} + \mathbf{P}_{22}^{-1} + \mathbf{P}_{33}^{-1})^{-1} \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

ou seja, cada partição da matriz \mathbf{W} em (5.12) corresponde à matriz de ponderação da classe de sensores ℓ , $\ell = 1, 2, 3$. Consequentemente, levando também em conta a simetria das matrizes de covariância, pode-se escrever:

$$\hat{\mathbf{x}}^* = \mathbf{W}^t \hat{\mathbf{x}}_a = (\mathbf{P}_{11}^{-1} + \mathbf{P}_{22}^{-1} + \mathbf{P}_{33}^{-1})^{-1} \sum_{\ell=1}^3 \mathbf{P}_{\ell\ell}^{-1} \hat{\mathbf{x}}_\ell \quad (5.13)$$

Nota-se que a expressão $(\mathbf{P}_{11} + \mathbf{P}_{22} + \mathbf{P}_{33})^{-1}$ é comum a todos os termos no lado direito da Equação (5.12).

Na aplicação à Estimação de Estados em Sistemas de Potência, as três classes de sensores serão denotadas pelos índices “s” (medidas SCADA), “f” (medidas fasoriais) e “ps” (pseudomedidas). Além disso, conforme visto no Capítulo 4, as matrizes de covariância dos erros de estimação de cada classe são dadas pelas inversas das respectivas matrizes Ganho, isto é:

$$\mathbf{P}_s = \mathbf{G}_s^{-1} \quad (5.14)$$

$$\mathbf{P}_f = \mathbf{G}_f^{-1} \quad (5.15)$$

$$\mathbf{P}_{ps} = \mathbf{G}_{ps}^{-1} \quad (5.16)$$

Considerando as Equações (5.12), (5.14), (5.15) e (5.16) acima, as transpostas das matrizes de ponderação para cada classe de medida podem finalmente ser escritas como:

- Para os medidores SCADA:

$$\mathbf{W}_s^t = (\mathbf{G}_s + \mathbf{G}_f + \mathbf{G}_{ps})^{-1} \mathbf{G}_s \quad (5.17)$$

- Para os medidores PMU:

$$\mathbf{W}_f^t = (\mathbf{G}_s + \mathbf{G}_f + \mathbf{G}_{ps})^{-1} \mathbf{G}_f \quad (5.18)$$

- Para as pseudomedidas:

$$\mathbf{W}_{ps}^t = (\mathbf{G}_s + \mathbf{G}_f + \mathbf{G}_{ps})^{-1} \mathbf{G}_{ps} \quad (5.19)$$

Por fim a equação de fusão de três estimativas é dada por:

$$\hat{\mathbf{x}}^* = \mathbf{W}_s^t \times \hat{\mathbf{x}}_s + \mathbf{W}_f^t \times \hat{\mathbf{x}}_f + \mathbf{W}_{ps}^t \times \hat{\mathbf{x}}_{ps} \quad (5.20)$$

A figura (5.2) ilustra a estratégia de simulação de medidas e implementação da estratégia de fusão de estimativas. O módulo de fusão baseia-se na Equação (5.20).

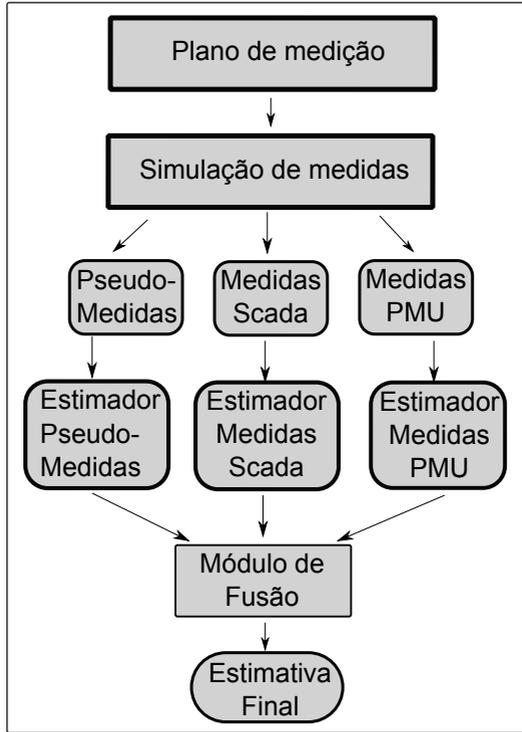


Figura 5.2 – Fusão de Estimativas a Três Níveis.

5.2.4 Otimalidade do Estimador Descentralizado

Uma importante propriedade teórica do Estimador Descentralizado com técnicas de fusão que reúne os ℓ estimadores como descrito na seção anterior, é que sob certas condições, a serem descritas posteriormente, os resultados obtidos são basicamente os mesmos produzidos por um estimador centralizado (híbrido simultâneo) isto é, o estimador que processa conjuntamente as diferentes classes disponibilizadas pelos conjuntos de sensores [55]. Isso equivale a dizer que não há nenhuma degradação de desempenho ao se adotar a estratégia descentralizada, desde que as seguintes condições sejam satisfeitas:

- Os erros de medição são não-correlacionados entre as diferentes classes de medidores;

- As matrizes de observação de cada classe de medida devem apresentar posto-coluna completo.

O termo Matriz de Observação se refere à matriz que relaciona os vetores de medição e de estado. No presente problema de estimação de estados, esta matriz corresponde à Jacobiana.

No estimador descentralizado, que processa separadamente as pseudomedidas, medidas SCADA e medidas PMU, a necessidade de se ter posto-coluna completo significa que a rede elétrica é observável com relação a cada uma das classes de medida, ou seja, pseudomedidas, medidas SCADA e medidas PMU. Por outro lado a condição de não-correlação de erros entre os conjuntos de sensores implicam em que os medidores SCADA e PMU utilizam canais de comunicação diferentes entre si. Sendo satisfeitas estas duas propriedades, há sentido em se efetuar a comparação entre os resultados do estimador híbrido simultâneo e o estimador baseado nos métodos de fusão.

5.2.5 Aspectos Computacionais

É possível se implementar eficientemente o método de fusão de estimativas considerando múltiplas fontes de dados. Aplicando-se a hipótese da não-correlação de erros de estimação entre as distintas classes de sensores e supondo observabilidade com relação a cada classe individual, a Equação (5.20) fornece a estimativa final produzida pelo método de fusão, baseada nas três classes de informação. Substituindo-se as matrizes ganho dadas pelas Equações (5.17) a (5.19) em (5.20), obtém-se:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}^* &= (\mathbf{G}_{ps} + \mathbf{G}_s + \mathbf{G}_f)^{-1} \mathbf{G}_{ps} \hat{\mathbf{x}}_{ps} + \\ &\quad (\mathbf{G}_{ps} + \mathbf{G}_s + \mathbf{G}_f)^{-1} \mathbf{G}_s \hat{\mathbf{x}}_s + \\ &\quad (\mathbf{G}_{ps} + \mathbf{G}_s + \mathbf{G}_f)^{-1} \mathbf{G}_f \hat{\mathbf{x}}_f \end{aligned} \quad (5.21)$$

A Equação (5.21) pode ser reescrita como:

$$(\mathbf{G}_{ps} + \mathbf{G}_s + \mathbf{G}_f) \hat{\mathbf{x}}^* = \mathbf{G}_{ps} \hat{\mathbf{x}}_{ps} + \mathbf{G}_s \hat{\mathbf{x}}_s + \mathbf{G}_f \hat{\mathbf{x}}_f \quad (5.22)$$

A Equação (5.22) pode ser resolvida por fatoração triangular esparsa e substituição direta e inversa, tendo ainda a vantagem de que

as Matrizes \mathbf{G}_{ps} , \mathbf{G}_s e \mathbf{G}_f estão disponíveis das soluções obtidas pelos estimadores individuais. Nota-se também que o vetor do lado direito da equação consiste em uma combinação ponderada das mesmas estimativas.

5.2.6 Observabilidade com respeito às medidas fasoriais

Em uma primeira interpretação da Equação (5.22) pode levar à conclusão que a observabilidade com relação a pseudomedidas, medidas SCADA e medidas PMU é condição estritamente necessária para a aplicação das técnicas de fusão de estimativas de estados, uma vez que esta propriedade é exigida para calcular as estimativas individuais $\hat{\mathbf{x}}_{ps}$, $\hat{\mathbf{x}}_s$ e $\hat{\mathbf{x}}_f$. A suposição de que o sistema seja observável com medidas SCADA é realista, uma vez que estes sistemas de supervisão já se encontram em operação corrente há longo tempo e empregam esquemas de medição projetados para fornecer observabilidade mesmo sob condições rigorosas. No Brasil, por exemplo, o Operador Nacional do Sistema prevê em seus procedimentos de rede a necessidade do sistema SCADA em novas instalações incorporadas ao sistema. Já para as pseudomedidas, como são dados de estudos ou de outras fontes *off-line*, elas podem ser aplicadas conforme as necessidades dos outros planos de medição.

Porém para o estimador baseado em medidas PMU a propriedade de observabilidade ainda não se aplica, uma vez que a penetração de medidas PMUs nos sistemas elétricos ainda é limitada, e sem previsão de mudanças drásticas em um futuro próximo. Entretanto, um olhar mais atento para o problema revela que a não observabilidade em relação às medidas fasoriais pode ser contornada através do uso de informações complementares inseridas na fase de cálculo da estimativa individual baseada apenas em medidas fasoriais. Juntamente com as medições PMU existentes, os dados complementares são utilizados para garantir artificialmente a observabilidade e, portanto, permitir o cálculo de $\hat{\mathbf{x}}_f$. Como a informação adicional é geralmente aproximada e imprecisa, cuidados devem ser tomados a fim de evitar a contaminação das estimativas diretamente advindas das medições PMU. Isto pode ser conseguido através da combinação de uma escolha criteriosa dos valores de variância com as propriedades de filtragem do processo de fusão, como explicado a seguir.

Neste trabalho, as informações complementares são incorporadas no problema sob a forma de informações *a priori*. Há duas razões para esta opção. Primeiramente, há sempre disponível algum tipo de

informação sobre os valores das variáveis de estado, sejam estimativas de estado recentemente calculadas ou, na falta destas, valores esperados para as tensões nodais complexas. Em segundo lugar, o esforço computacional para o processamento de informações *a priori* é baixo.

Portanto, a não observabilidade PMU é contornada neste trabalho utilizando-se informações *a priori* sobre as tensões complexas nas barras não observáveis da rede. Resta entretanto verificar o impacto desses dados aproximados na qualidade final da estimação de estados. Nesse sentido, os seguintes aspectos são fundamentais: essas informações devem ser críticas, ou seja, devem ser atribuídas apenas a barras não observáveis. Além disso, suas variâncias devem ser significativamente maiores do que as variâncias aplicada das medidas. O requisito de criticidade das informações *a priori* vem do fato bem conhecido de que os resíduos de dados críticos são nulos [2]. Garante-se assim que as estimativas para os estados de barras adjacentes às barras que recebem as informações *a priori*, não serão contaminadas pela incerteza inerente a estas informações.

O segundo fator refere-se aos valores de variância atribuídos às informações *a priori*. Para conciliá-los com o nível de exatidão dos demais sensores, eles devem refletir o maior grau de incerteza das informações *a priori* arbitrárias. Portanto, devem ser algumas ordens de grandeza maiores que as variâncias dos outros sensores utilizados pela fusão de estimadores. Na etapa de fusão de estimativas, variâncias maiores refletem-se na diagonal da Matriz de covariância \mathbf{P} , cujos valores correspondentes aos estados não observáveis, também serão grandes. Uma vez que grandes valores de variância produzem pequenos fatores de ponderação, na etapa da fusão as estimativas fornecidas para os estados não observáveis recebem pesos muito pequenos. Consequentemente, as estimativas baseadas nas outras classes de sensores, tanto pseudomedidas ou SCADA, irão prevalecer sobre as informações *a priori*. Portanto, desde que as respectivas variâncias estejam devidamente definidas, os efeitos de se utilizar as informações *a priori* são filtrados na fase final da Fusão, e não degradam significativamente as estimativas ótimas finais.

5.2.7 Conclusões

Após a apresentação das técnicas de fusão de estimativas, conclui-se que as mesmas são uma boa alternativa para incorporar novas classes de medidas a processos de estimação de estados já em operação.

Como a fusão é implementada em um módulo que processa os estados já estimados, sua utilização não requer alterações nos estimadores já em funcionamento. Para comprovar as propriedades da estratégia de fusão de estimativas e ilustrar a sua aplicação, no próximo capítulo serão apresentados resultados de estudos de caso conduzidos com os sistemas-teste IEEE 14, 57 e 118 barras.

6 RESULTADOS E SIMULAÇÕES

6.1 Introdução

Para se avaliar o desempenho do algoritmo e das estratégias desenvolvidas para essa dissertação, foram realizadas várias simulações, cujos resultados e avaliações mais importantes serão apresentadas neste capítulo. Os casos simulados servem para exemplificar as principais características dos estimadores considerados, sob situações realísticas. Os dados processados pelos estimadores são pseudomedidas, medidas SCADA e medidas fasoriais. Após estes estudos preliminares, são apresentados e discutidos resultados de simulações com o estimador Híbrido (EEH) e o estimador proposto, baseado no método de Fusão (EEFS). Para tanto, foram realizadas simulações com sistemas observáveis e com planos de medição não-observáveis.

Na próxima seção serão feitas algumas considerações sobre os procedimentos de simulação, os níveis de exatidão adotados para cada classe de medidores, bem como apresentar os critérios de avaliação dos resultados e de desempenho dos estimadores. Nas seções seguintes serão apresentados os resultados obtidos para os sistemas-teste IEEE de 14, 57 e 118 barras, bem como as avaliações pertinentes a cada caso.

6.2 Procedimentos de Simulação

6.2.1 Classes de Medidas e Estimadores Utilizados

As classes de medidas discutidas no Capítulo 2 desta dissertação, podem ser classificadas em telemedidas, fornecidas pelos sistemas SCADA e de medição fasorial, e pseudomedidas, que consistem de informações não oriundas de sistemas de telemetria, como por exemplo estudos de previsão de carga e resultados de estimação de estados anteriores. Nos estudos de caso relatados neste capítulo, estes dados são gerados por um programa simulador de medidas, a partir de resultados de um programa de fluxo de potência, aos quais são adicionados ruídos para representar os erros de medição. Estes ruídos são gerados como números aleatórios com distribuição normal, com média zero e variância que depende da exatidão atribuída à medida e do valor desta.

Na Tabela 6.1 apresentam-se os tipos de medidas que são simu-

ladas, a que classe de medidas elas pertencem, bem como o nível de exatidão (em valores percentuais) atribuído a cada tipo de medida.

Tabela 6.1 – Medidas utilizadas pelo estimador de estados.

Medida	Símbolo	Grupo	Exatidão (%)
Injeção de Potência Ativa	P_i	Pseudom.	1×10^0
Injeção de Potência Reativa	Q_i	Pseudom.	1×10^0
Tensão Convencional	V_i	SCADA	5×10^{-2}
Fluxo de Potência Ativa	T_{ij}	SCADA	1×10^{-1}
Fluxo de Potência Reativa	U_{ij}	SCADA	1×10^{-1}
Tensão Fasorial (Módulo)	\vec{V}_i	Fasorial	1×10^{-2}
Tensão Fasorial (Fase)	\vec{V}_θ	Fasorial	1×10^{-2}
Corrente Fasorial (Parte Real)	\vec{I}_{Real}	Fasorial	1×10^{-2}
Corrente Fasorial (Parte Imag.)	\vec{I}_{Imag}	Fasorial	1×10^{-2}

Como discutido nos capítulos anteriores, atualmente ainda não é realístico considerar que uma rede elétrica seja completamente observável com relação a um plano de medição formado unicamente por medidas fasoriais. Para se obter resultados da estimação de estados com planos de medição assim constituídos, faz-se portanto necessária a utilização de informações *a priori*, cujas variâncias devem ser algumas ordens de grandeza superiores às variâncias das medidas, de modo a refletir a maior incerteza associadas a estes dados. Nesta dissertação considera-se que as informações *a priori* são as tensões nodais em todas as barras da rede, com valor presumido igual a $1,0pu \angle 0$ rad.

Neste capítulo são apresentados resultados de um Estimador de Estados Híbrido (EEH) cujo plano de medição é composto pelas três classes de medida acima mencionadas, e por um estimador baseado no método de fusão de estimativas. Neste último caso o mesmo plano de medição do estimador EEH é decomposto em três planos cada um deles formado apenas por: (i) pseudomedidas, (ii) medidas SCADA e (iii) medidas fasoriais. Cada um desses planos de medição é então processado separadamente pelo respectivo estimador, que fornece seus próprios resultados. Por fim o módulo de fusão processa os resultados dos três estimadores individuais, gerando os resultados do Estimador de Estados baseado em métodos de Fusão (EEFS).

6.2.2 Critérios de Avaliação dos Resultados

A avaliação dos resultados do estimador EEFS proposto é feita tomando como referência os resultados do estimador híbrido centralizado, EEH, que processa todas as medidas ao mesmo tempo. Isto se justifica por ser o processamento simultâneo do EEH a estratégia teoricamente ideal, embora enfrente na prática as dificuldades já discutidas em capítulos anteriores desta dissertação.

Para se avaliar o desempenho do método desenvolvido, faz-se necessária definição de índices adequados. Um desses índices é inspirado na métrica de precisão de tensão proposto em [57] e definido como:

$$M_{acc_v} = \|\dot{\mathbf{V}}_{erro}\|_2 = \left(\sum_j |\dot{\mathbf{V}}_j^{EEH} - \dot{\mathbf{V}}_j^{EEFS}|^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6.1)$$

onde $\dot{\mathbf{V}}_j^{EEH}$ e $\dot{\mathbf{V}}_j^{EEFS}$ são estimativas para os fasores das tensões nodais produzidas pelos estimadores EEH e EEFS, respectivamente.

Para dimensionar o desvio dos resultados fornecidos pelo estimador baseado no método de fusão em relação aos produzidos pelo o estimador híbrido, é utilizado um *índice de subotimalidade*. Este índice foi previamente utilizado na literatura para avaliar e mensurar o quanto a qualidade da estimação é degradada pelo novo método utilizado, e é dado por [29] [58]:

$$\mu_{SubOpt} \triangleq \frac{\mathbf{J}^{EEFS} - \mathbf{J}^{EEH}}{\mathbf{J}^{EEH}} \times 100 \quad (6.2)$$

onde \mathbf{J}^{EEFS} e \mathbf{J}^{EEH} são os valores da soma ponderada dos quadrados dos resíduos relativos às estimativas produzidas pelos estimadores com técnicas de fusão e Híbrido, respectivamente.

Além destes índices, são apresentados gráficos dos erros absolutos das estimativas fornecidas pelos estimadores individuais, em relação aos estados estimados pelo EEH. Nestes gráficos, no eixo x representam-se os estados de cada sistema-teste, e no eixo y são representados os erros de estimação correspondente. Este é um recurso visual que permite que o leitor rapidamente tire as suas conclusões.

Com relação aos estimadores desenvolvidos, tanto o EEH como o EEFS são resolvidos utilizando-se o método da Equação Normal de Gauss (vide Capítulo 4) e são utilizadas técnicas de esparsidade para maior eficiência computacional. Além disso, os estimadores são capazes

de processar informações *a priori*, para o caso de não observabilidade.

Os resultados serão apresentados por sistemas-teste, começando pelo IEEE 14 barras, seguido pelo IEEE 57 barras e por fim o sistema IEEE 118 barras. Inicialmente são apresentados os resultados considerando que os sistemas são observáveis com relação a cada classe de medidas, o que permite avaliar os resultados sem a influência das informações *a priori*. Em seguida serão consideradas situações mais realísticas nas quais os planos de medição utilizando medidas fasoriais são não observáveis.

6.3 Resultados para o Sistema-Teste IEEE 14 barras

Nesta seção serão apresentados os resultados das simulações com o sistema teste IEEE 14 barras, cujo diagrama unifilar é mostrado na Figura 6.1. Por conveniência não são utilizadas as medidas convencionais de corrente.

6.3.1 1º Caso – Rede Observável com Pseudomedidas, Medidas SCADA e Medidas Fasoriais

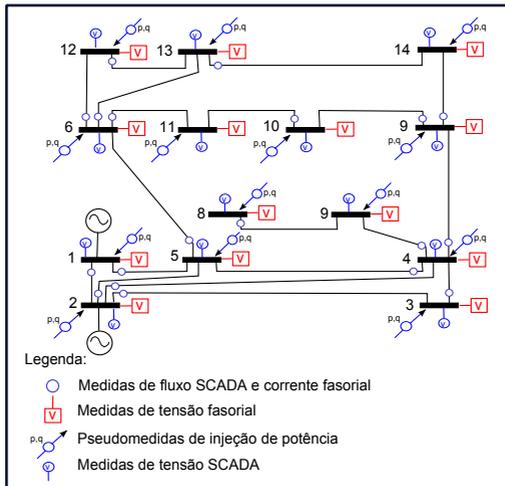


Figura 6.1 – Sistema teste IEEE 14 barras e plano de medição observável.

Nesta primeira simulação é ilustrada uma situação em que os planos de medição garantem a observabilidade do sistema com relação a cada classe de medidas. Embora pouco realística, esta condição de simulação permite analisar os resultados do EEFS com relação ao EEH sem a interferência das informações *a priori* nos resultados.

A partir dos estados estimados são calculados os erros de estimação em relação aos resultados fornecidos pelo EEH. Na Figura 6.2 é possível se analisar os erros para os ângulos de cada barra, enquanto que na Figura 6.3 são plotados os erros para os módulos da tensão, para cada estimador separadamente. São apresentados os desvios dos resultados fornecidos pelo estimador baseado em pseudomedidas, baseado em medidas SCADA, baseado em medidas fasoriais e estimador EEFS em relação ao EEH.

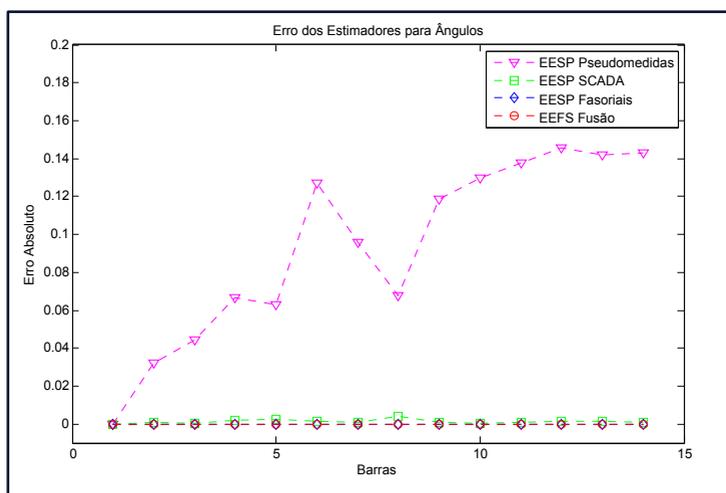


Figura 6.2 – Erros de estimação de ângulos do estimador EEFS para o EEH - Sistema IEEE 14 barras, considerando-se observabilidade para cada classe de medida.

Tanto na Figura 6.2 como na 6.3 nota-se a influência da variância atribuída a cada classe de medidas. É possível assim se observar que os maiores erros ocorrem na estimação com pseudomedidas, as estimativas baseadas nas medidas SCADA apresentam um nível intermediário de precisão, e as medidas fasoriais garantem estimativas de melhor qualidade, como esperado. Por fim, nota-se que o estimador que utiliza técnicas de fusão fornece resultados muito próximos ao do estimador

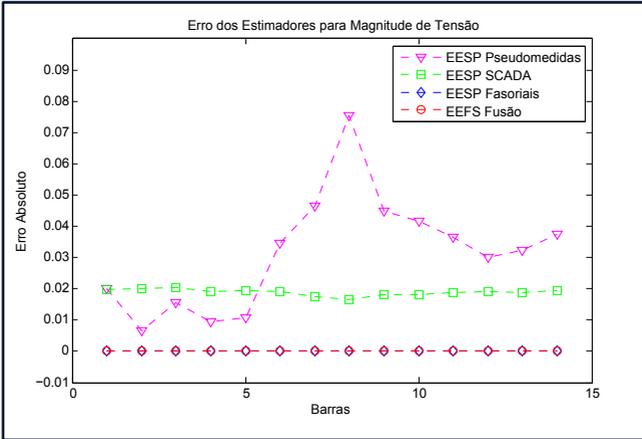


Figura 6.3 – Erros de estimação de magnitude de tensão do estimador EEFS para o EEH - Sistema IEEE 14 barras, considerando-se observabilidade para cada classe de medida.

com medidas fasoriais, sendo essas medidas as que têm maior influência no processamento do EEFS.

Na Tabela 6.2 são apresentados os indicadores de desempenho para o sistema teste IEEE 14 barras com planos de medição observáveis. Conforme estes resultados nota-se que, como era esperado, os erros associados a cada classe de medidas variam na razão inversa de sua qualidade, ou seja, as medidas de menor qualidade são as que possuem os maiores erros. Quanto ao desempenho do EEFS, fica evidente o seu nível superior de precisão, sendo que seus resultados foram melhores do que qualquer outro estimador que processa uma classe individual de medidas. Com isso é possível concluir que o EEFS é uma alternativa atraente para a incorporação de qualquer classe de medidas a um estimador SCADA, uma vez que o algoritmo de fusão se aproveita da confiabilidade e robustez do estimador que já está em operação e agrega as qualidades de outras classes de medidas eventualmente disponíveis em determinados pontos da rede.

Neste caso o valor calculado do índice de subotimalidade é:

$$\mu_{SubOpt} = 0,0303\%$$

Nesta simulação nota-se que o índice de subotimalidade é muito

Tabela 6.2 – Indicadores de desempenho Caso 1 sistema IEEE 14 barras.

Estimador	Mét. de Tensão	Média do Erro		Desvio Padrão	
		$ V $	δ	$ V $	δ
EESP-Pseudo	5,9247	0,4232	0,0938	0,0205	3,3409
EESP-SCADA	0,1608	0,0115	0,0013	0,0210	2,0719
EESP-PMU	0,0008	0,0001	0,0000	0,0183	2,0594
EEFS-Fusão	0,0004	0,0000	0,0000	0,0183	2,0592

baixo, o que é um bom indicativo da aderência dos resultados fornecidos pelos estimadores EEH e EEFS. Conseqüentemente, o uso da estratégia de fusão praticamente não implica em degradação da solução teoricamente ótima fornecida pelo estimador EEH. Isto fica ainda mais evidenciado pelas estimativas finais fornecidas por ambos os estimadores, apresentadas na Tabela 6.3. Pode-se concluir que os resultados são muito próximos, confirmando a interpretação dos indicadores acima.

Tabela 6.3 – Resultados Finais da Estimação para o Caso 1 - sistema IEEE 14 barras.

Resultado da Fusão das Estimativas			Resultado Estimador Híbrido	
Barra	$ V $	$\hat{Angulo}(^{\circ})$	$ V $	$\hat{Angulo}(^{\circ})$
01	+1.056065	+0.000000	+1.056108	0.000000
02	+1.040960	-2.116706	+1.040998	-2.116624
03	+1.006105	-4.741784	+1.006127	-4.741429
04	+1.039972	-3.999680	+1.040007	-3.999557
05	+1.044383	-3.550521	+1.044421	-3.550472
06	+1.065830	-6.360538	+1.065868	-6.360363
07	+1.063049	-6.124696	+1.063086	-6.124384
08	+1.086320	-8.208305	+1.086360	-8.208105
09	+1.061601	-5.878139	+1.061631	-5.877854
10	+1.062397	-5.960531	+1.062428	-5.960238
11	+1.064144	-6.156113	+1.064175	-6.155818
12	+1.065495	-6.330277	+1.065527	-6.329984
13	+1.065097	-6.285213	+1.065131	-6.284975
14	+1.064077	-6.064405	+1.064105	-6.064093

6.3.2 2º Caso – Rede Observável com Pseudomedidas e Medidas SCADA, e não Observável com Medidas Fasoriais

O caso que será estudado nesta seção ilustra uma situação mais aderente à realidade dos Sistemas Elétricos em geral: a rede elétrica é observável apenas com pseudomedidas e medidas SCADA, porém as medidas fasoriais estão presentes apenas em alguns pontos estratégicos do sistema. Este plano de medição é apresentado na Figura 6.4. Nesta condição se torna indispensável a utilização de informações *a priori* para processar as medidas fasoriais na estratégia de fusão de estimativas.

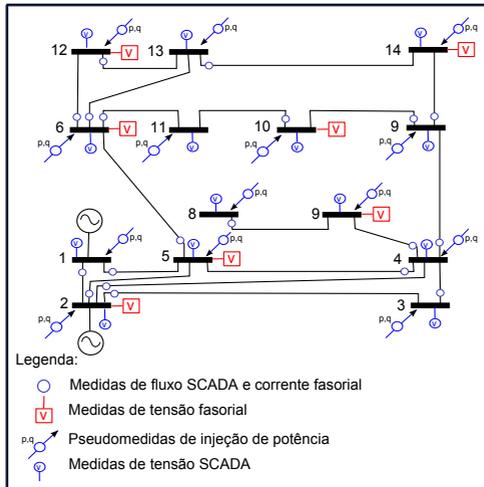


Figura 6.4 – Sistema teste IEEE 14 barras e plano de medição não observável com medidas PMU.

Como essa é uma situação que se aproxima da realidade da maioria dos sistemas elétricos, esta simulação é importante para demonstrar a capacidade do algoritmo implementado quanto à sua aplicação prática em um centro de operação de sistemas elétricos. Esses resultados também permitem avaliar a influência das informações *a priori* nos planos de medição não-observáveis. Da mesma forma que no primeiro caso, os resultados aqui apresentados para o Estimador de Estados baseado em técnicas de fusão são referidos aos resultados do Estimador Híbrido centralizado.

A partir dos estados estimados, calculam-se os erros de estimação em relação aos valores obtidos pelo EEH. Na Figura 6.5 é possível se analisar os erros para os ângulos de cada barra, e na Figura 6.6 são apresentados os erros para o módulo da tensão da estimação dos estados de cada estimador separadamente.

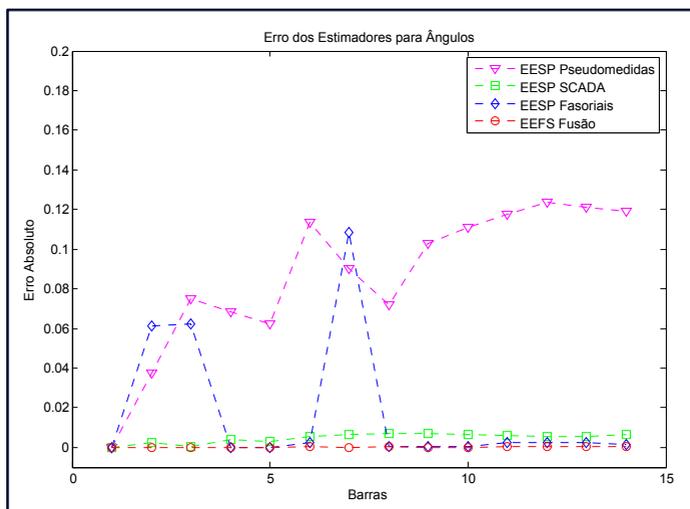


Figura 6.5 – Erros de estimação de ângulo do estimador EEFS para o EEH - Sistema IEEE 14 barras, caso não observável com relação a medidas fasoriais.

Neste caso, tanto na Figura 6.5 como na 6.6 é possível notar que a falta de observabilidade de algumas barras com relação às medidas PMU reflete-se no aumento do erro das estimativas obtidas apenas a partir das medidas PMU. Por outro lado, é também possível perceber dessa simulação a propriedade cooperativa da fusão de estimativas, ou seja, a fusão das estimativas obtidas a partir das três classes de medidas permite se alcançar um resultado que nenhum dos outros estimadores alcançou por si só. Isso é ilustrado, por exemplo, pelas estimativas referentes à barra 7, onde o EEFS fornece o resultado de mínimo erro, enquanto estimadores que processam apenas classes individuais de medidas apresentam erros bem mais significativos.

Na Tabela 6.4 são apresentados os indicadores de desempenho para o Caso 2 do sistema IEEE-14 barras.

Neste caso, os indicadores revelam um comportamento carac-

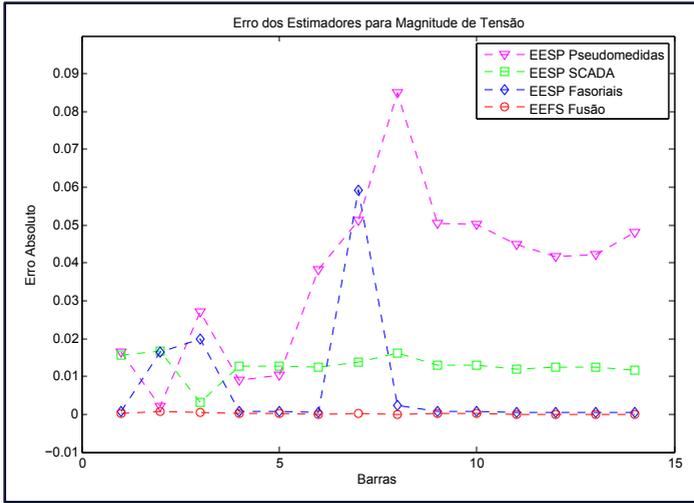


Figura 6.6 – Erros de estimação de magnitude de tensão do estimador EEFS para o EEH - Sistema IEEE 14 barras, caso não observável com relação a medidas fasoriais.

Tabela 6.4 – Indicadores de desempenho Caso 2 sistema IEEE 14 barras.

Estimador	Mét. de Tensão	Média do Erro		Desvio Padrão	
		$ V $	δ	$ V $	δ
EESP-Pseudo	7,7494	0,5535	0,0967	0,0295	3,0434
EESP-SCADA	4,6908	0,3245	0,0534	0,0262	3,0765
EESP-PMU	1,3720	0,0980	0,0175	0,0223	2,4039
EEFS-Fusão	0,0098	0,0007	0,0002	0,0163	2,0327

terístico do estimador com técnicas de fusão: se no primeiro caso os erros de estimação do estimador que processa apenas medidas fasoriais eram muito próximos dos produzidos pelo EEFS, neste pode-se notar um grande descolamento desses erros. Isso se deve principalmente ao uso das informações *a priori*, usadas para garantir a observabilidade no caso do estimador baseado em medidas fasoriais. Por outro lado, a fusão de estimativas continua produzindo resultados muito aderentes aos do estimador híbrido, o que comprova o seu desempenho superior aos demais métodos.

Para esta simulação o índice de subotimalidade calculado é igual a:

$$\mu_{SubOpt} = 0,0525\%$$

Ao se analisar o valor do índice de subotimalidade nota-se um aumento com relação ao caso anterior. Isto era esperado, pela necessidade da inclusão das informações *a priori*. Porém, mesmo assim o resultado é muito próximo do ótimo estimado pelo estimador híbrido, como pode ser confirmado pelas estimativas apresentadas na Tabela 6.5.

Tabela 6.5 – Resultados Finais da Estimação para o Caso 2 - sistema IEEE 14 barras.

Resultado da Fusão das Estimativas			Resultado Estimador Híbrido	
Barra	$ V $	$\tilde{Angulo}(^{\circ})$	$ V $	$\tilde{Angulo}(^{\circ})$
01	+1.050938	0.000000	+1.050899	0.000000
02	+1.036743	-2.030974	+1.036429	-2.036566
03	+1.001756	-4.660959	+1.001488	-4.662112
04	+1.035066	-4.017030	+1.035027	-4.018032
05	+1.039197	-3.562406	+1.039156	-3.563336
06	+1.060703	-6.422669	+1.061032	-6.460627
07	+1.060983	-6.316423	+1.060829	-6.339922
08	+1.089221	-8.597573	+1.089302	-8.635839
09	+1.056417	-5.908549	+1.056409	-5.913651
10	+1.057312	-5.993006	+1.057306	-5.998197
11	+1.058943	-6.212299	+1.059210	-6.249099
12	+1.060228	-6.390563	+1.060575	-6.429596
13	+1.060052	-6.349635	+1.060384	-6.387850
14	+1.056690	-6.079273	+1.056800	-6.129462

6.4 Resultados para o Sistema-Teste IEEE 57

A primeira parte deste capítulo refere-se aos resultados obtidos pelo estimador aqui desenvolvido com o sistema-teste IEEE 14 barras. A importância destas simulações relaciona-se à dimensão reduzida do sistema-teste, que possibilita apresentar os resultados de forma mais detalhada. Porém é necessário testar as ferramentas e métodos desenvolvidos também em sistemas de maior porte, para melhor avaliar o seu desempenho. Para isso, esta seção e a seguinte apresentam as simulações desenvolvidas com os sistemas IEEE 57 e IEEE 118 barras, com o objetivo de avaliar o desempenho das estratégias aqui propostas frente a problemas de maior dimensão.

6.4.1 1º Caso – IEEE 57 Barras: Rede Observável com Pseudomedidas, Medidas SCADA e Medidas Fasoriais

Os dados do sistema IEEE 57 barras são apresentados no Anexo B deste trabalho. Da mesma forma como foi feito anteriormente, dois planos de medição são considerados. No primeiro a rede é observável com relação a cada classe individual de medidas, enquanto que no segundo utiliza-se um plano de medição para as medidas PMU que não garante a observabilidade da rede. As medidas que foram utilizadas no plano de medição observável são apresentadas na Tabela 6.6. É importante salientar que neste plano de medição não foram utilizadas as informações *a priori*.

Tabela 6.6 – Medidas utilizadas pelo plano de medição observável para o sistema IEEE 57 barras.

Medida	Classe/Medida	Local(barra/ramo)
Injeção de Potência Ativa	Pseudo.	1-57
Injeção de Potência Reativa	Pseudo.	1-57
Tensão Convencional	SCADA	1
Fluxo de Potência Ativa	SCADA	1-78
Fluxo de Potência Reativa	SCADA	1-78
Tensão Fas. (Módulo)	PMU	2-57
Tensão Fas. (Fase)	PMU	2-57
Corrente Fas. (Parte Real)	PMU	1-78
Corrente Fas. (Parte Imag.)	PMU	1-78

Nesta primeira simulação em que o sistema de 57 barras é obser-

vável com relação a cada classe individual de medidas, espera-se o bom resultado obtido no Caso 1 do sistema de 14 barras. Sua importância porém reside na comparação de que o método é escalonável, no sentido de que suas propriedades permanecem válidas independentemente da dimensão do sistema a que é aplicado. Como nos casos anteriores, a precisão dos resultados é calculada usando-se como referência as estimativas obtidas com o estimador EEH.

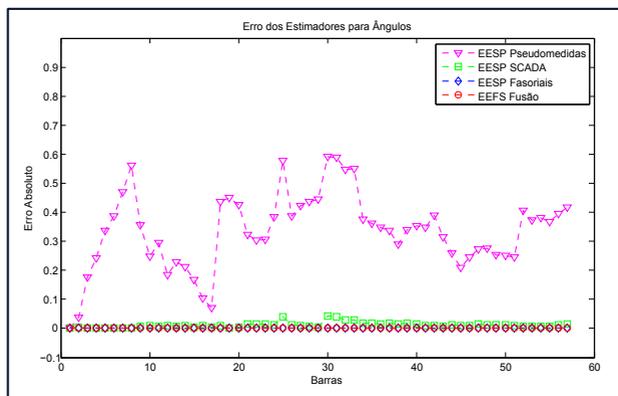


Figura 6.7 – Erros de estimação de ângulos do estimador EEFS para o EEH - Sistema IEEE 57 barras, considerando-se observabilidade para cada classe de medida.

Nos gráficos apresentados nas Figuras 6.7 e 6.8 nota-se a influência das variâncias de cada classe de medida sobre as estimativas. O método de fusão permite tirar o melhor proveito das estimativas fornecidas pelos estimadores baseados nas classes individuais de medidas, produzindo assim estimativas de melhor qualidade. Os resultados numéricos desta simulação são apresentados a seguir.

Na Tabela 6.7 são apresentados os indicadores de desempenho para o Caso 1 do sistema IEEE-57 barras.

O índice de subotimalidade que comprova a boa aderência entre os resultados do EEFS e o EEH é apresentado abaixo. Seu valor indica que os valores das estimativas calculadas por ambos os estimadores são muito próximas.

$$\mu_{SubOpt} = 0,0017\%$$

Pode-se portanto concluir que a técnica de fusão das estimativas produzidas com base em cada classe individual de medidas mostra-se

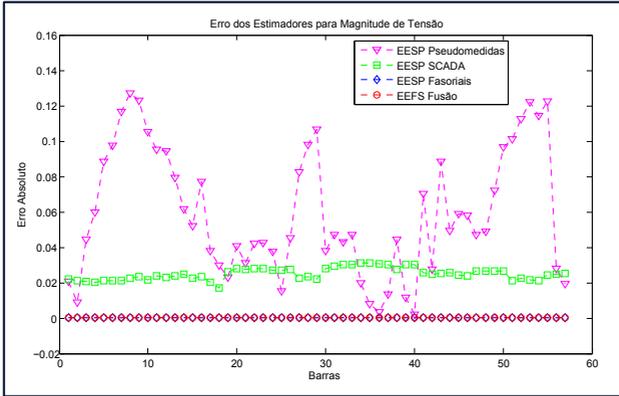


Figura 6.8 – Erros de estimação de magnitude de tensão do estimador EEFS para o EEH - Sistema IEEE 57 barras, considerando-se observabilidade para cada classe de medida.

Tabela 6.7 – Indicadores de desempenho Caso 1 - sistema IEEE 57 barras.

Estimador	Mét. de Tensão	Média do Erro		Desvio Padrão	
		$ V $	δ	$ V $	δ
EESP-Pseudo	3,5469	0,0622	0,3339	0,0546	9,8456
EESP-SCADA	0,0771	0,0014	0,0113	0,0227	3,4981
EESP-PMU	0,0004	0,0001	0,0001	0,0196	3,4233
EEFS-Fusão	0,0002	0,0000	0,0000	0,0196	3,4227

eficaz para a estimação de estados do sistema IEEE-57 barras, na situação em que o sistema é observável com respeito a cada classe individual.

6.4.2 2º Caso – IEEE 57 Barras: Rede Observável com Pseudomedidas e Medidas SCADA, porém não-observável com Medidas Fasoriais

Esta simulação busca emular a situação real dos centros de operação atual, em que as medidas fasoriais, por ainda estarem em fase de implantação, ainda não garantem por si só a observabilidade da rede. Por outro lado, o sistema é observável com relação tanto a medidas SCADA quanto pseudomedidas. As medidas utilizadas nesta simulação são apresentadas na Tabela 6.9. No caso do estimador que processa apenas medidas fasoriais, é importante salientar que o problema da não-observabilidade é contornado com o auxílio de informações *a priori*.

Tabela 6.8 – Medidas utilizadas pelo plano de medição não observável com relação a medidas fasoriais para o sistema IEEE 57 barras.

Medida	Classe/Medida	Quantidades
Injeção de Potência Ativa	Pseudo	57
Injeção de Potência Reativa	Pseudo	57
Tensão Convencional	SCADA	1
Fluxo de Potência Ativa	SCADA	70
Fluxo de Potência Reativa	SCADA	70
Tensão Fas. (Módulo)	PMU	12
Tensão Fas. (Fase)	PMU	12
Corrente Fas. (Parte Real)	PMU	16
Corrente Fas. (Parte Imag.)	PMU	16

A Figura 6.9 apresenta os erros de estimação dos ângulos das tensões nodais para cada estimador considerado, enquanto a Figura 6.10 mostra os erros de estimação das magnitudes das tensões nodais. Na Tabela 6.9 são apresentados os indicadores de desempenho para o Caso 2 do sistema IEEE-57 barras.

O índice de subotimalidade, que reflete a aderência entre os resultados do EEFS e o EEH, é apresentado a seguir. Seu valor baixo comprova que os estados estimados a partir das mesmas medidas são de fato próximos:

$$\mu_{SubOpt} = 0,0318\%$$

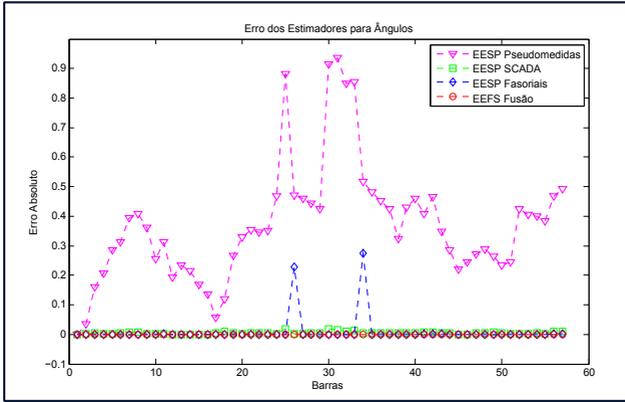


Figura 6.9 – Erros de estimação de ângulos do estimador EEFS para o EEH - Sistema IEEE 57 barras, considerando-se a não-observabilidade em relação às medidas fasoriais.

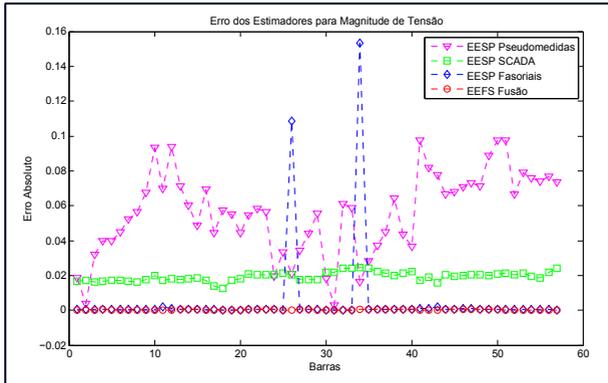


Figura 6.10 – Erros de estimação de magnitude de tensão do estimador EEFS para o EEH - Sistema IEEE 57 barras, considerando-se a não-observabilidade em relação às medidas fasoriais.

Tabela 6.9 – Indicadores de desempenho Caso 2 sistema IEEE 57 barras.

Estimador	Mét. de Tensão	Média do Erro		Desvio Padrão	
		$ V $	δ	$ V $	δ
EESP-Pseudo	2,9190	0,0512	0,3705	0,0705	12,562
EESP-SCADA	0,0669	0,0012	0,0048	0,0675	5,3600
EESP-PMU	2,0008	0,0351	0,0093	0,0663	5,4960
EEFS-Fusão	0,0005	0,0000	0,0001	0,0659	5,2380

Conclui-se portanto que a técnica de fusão de estimativas geradas a partir de três classes distintas de medidas é igualmente eficaz para a estimação de estados do sistema IEEE-57 barras, mesmo na situação em que não há observabilidade com relação às medidas fasoriais. Alguns pontos devem ser destacados, como a influência das informações *a priori* utilizadas no estimador que processa exclusivamente medidas fasoriais. Quanto menos medidas deste tipo estiverem disponíveis, maior será o efeito das informações *a priori* sobre as estimativas. Como os valores adotados para as informações *a priori* são aproximações imprecisas, este efeito é normalmente degradante, particularmente para os ângulos das tensões nodais. Por outro lado, nas barras atendidas por medidas fasoriais de alta precisão, as estimativas obtidas são de alta qualidade. Assim, devido à “propriedade cooperativa” das técnicas de fusão, os resultados alcançados ao final serão melhores do que os resultados fornecidos pelos estimadores que processam classes individuais de medidas.

6.5 Resultados para o Sistema-Teste IEEE 118 barras

Por fim são apresentados os resultados para o sistema-teste IEEE 118 barras. Da mesma forma como foram apresentados os sistemas anteriores, primeiro se apresenta o caso onde é garantida a observabilidade do sistema pelas três classes de medidas, e após é realizado um caso em que não é garantida a observabilidade do sistema com medidas fasoriais.

6.5.1 1º Caso – IEEE 118 Barras: Rede Observável com Pseudomedidas, Medidas SCADA e Medidas Fasoriais

Os dados do sistema IEEE 118 barras são apresentados no Anexo D desta dissertação. Como nos casos simulados para os sistemas anteri-

ores, são considerados dois planos de medição. No primeiro deles a rede é observável com respeito a cada uma das classes medidas, enquanto que no segundo as medidas fasoriais não garantem a observabilidade, embora tanto medidas SCADA quanto pseudomedidas individualmente assegurem a observabilidade. As medidas utilizadas no plano de medição observável são apresentadas na Tabela 6.10. Neste caso não são utilizadas informações *a priori*.

Tabela 6.10 – Medidas utilizadas pelo plano de medição observável para o sistema IEEE 118 barras.

Medida	Classe/Medida	Local(barra/ramo)
Injeção de Potência Ativa	Pseudo.	1-118
Injeção de Potência Reativa	Pseudo.	1-118
Tensão Convencional	SCADA	1
Fluxo de Potência Ativa	SCADA	1- 179
Fluxo de Potência Reativa	SCADA	1-179
Tensão Fas. (Módulo)	PMU	2-118
Tensão Fas. (Fase)	PMU	2-118
Corrente Fas. (Parte Real)	PMU	1-179
Corrente Fas. (Parte Imag.)	PMU	1-179

Embora sejam esperados bons resultados como os obtidos anteriormente para os sistemas de 14 e 57 barras, neste caso o maior número de variáveis decorrentes da dimensão do sistema impõe mais desafios às técnicas de fusão.

Nos gráficos apresentados nas Figuras 6.11 e 6.12 nota-se que as diferenças entre as estimativas decorrem dos distintos valores de variâncias de cada classe de medida. Entretanto, a “propriedade cooperativa” do estimador baseado nos métodos de fusão permite tirar o melhor proveito dos resultados de cada estimador individual. A seguir são apresentados os resultados numéricos desta simulação.

Na Tabela 6.11 são apresentados os indicadores de desempenho para o Caso 1 do sistema IEEE-118 barras.

Mais uma vez, o índice de subotimalidade confirma a boa aderência entre os resultados do EEFS e o EEH, indicando que os estados estimados a partir das mesmas medidas pelos dois estimadores são muito próximos:

$$\mu_{SubOpt} = 0,0124\%$$

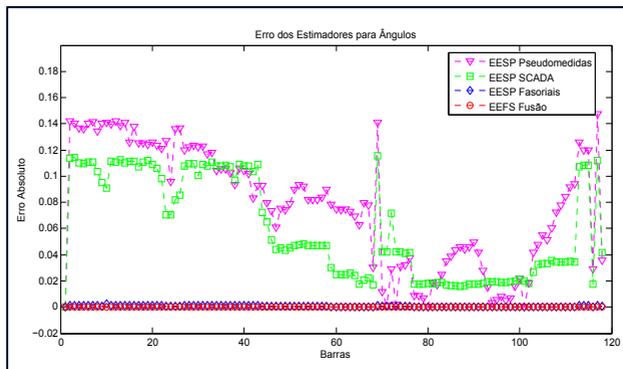


Figura 6.11 – Erros de estimação de ângulos do estimador EEFS para o EEH - Sistema IEEE 118 barras, considerando-se observabilidade para cada classe de medida.

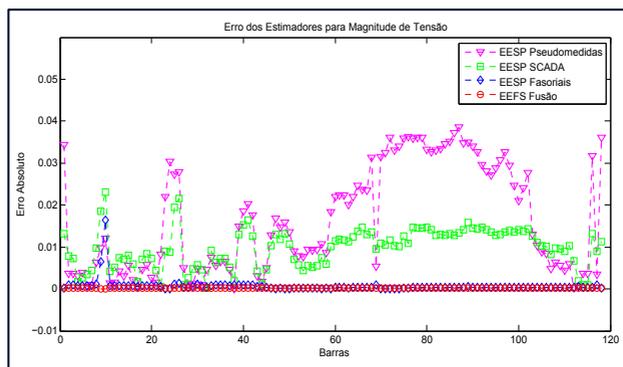


Figura 6.12 – Erros de estimação de magnitude de tensão do estimador EEFS para o EEH - Sistema IEEE 118 barras, considerando-se observabilidade para cada classe de medida.

Tabela 6.11 – Indicadores de desempenho Caso 1 sistema IEEE 118 barras.

Estimador	Mét. de Tensão	Média do Erro		Desvio Padrão	
		$ V $	δ	$ V $	δ
EESP-Pseudo	10,103	0,0856	0,0777	0,0269	5,2658
EESP-SCADA	4,6665	0,0395	0,0603	0,0258	6,4927
EESP-PMU	0,0815	0,0007	0,0007	0,0286	5,4306
EEFS-Fusão	0,0056	0,0002	0,0000	0,0281	5,4412

6.5.2 2º Caso – IEEE 118 Barras Rede Observável com Pseudomedidas, Medidas SCADA e não observável com Medidas Fasoriais

Após realizar a simulação com planos de medição observáveis, apresentam-se por fim os resultados para a simulação com rede não observável com relação às medidas fasoriais. Este é um caso que se aproxima da situação atual dos centros de operação, já que a pouca penetração das medidas fasoriais ainda não garante, por si só, a observabilidade das redes elétricas. Por outro lado, a rede de 118 barras é suposta observável tanto com relação às medidas SCADA quanto com respeito às pseudomedidas. As medidas que foram utilizadas nesta simulação são apresentadas na Tabela 6.12. Neste caso, torna-se necessário o uso de informações *a priori* no estimador que processa apenas medidas fasoriais, de modo a contornar o problema de não-observabilidade da rede.

Tabela 6.12 – Medidas utilizadas pelo plano de medição não observável com relação às medidas fasoriais para o sistema IEEE 118 barras.

Medida	Classe/Medida	Quantidades
Injeção de Potência Ativa	Pseudo.	118
Injeção de Potência Reativa	Pseudo.	118
Tensão Convencional	SCADA	1
Fluxo de Potência Ativa	SCADA	179
Fluxo de Potência Reativa	SCADA	179
Tensão Fas. (Módulo)	SCADA	28
Tensão Fas. (Fase)	PMU	28
Corrente Fas. (Parte Real)	PMU	62
Corrente Fas. (Parte Imag.)	PMU	62

Os resultados obtidos demonstram um desempenho uniforme do

estimador baseado nos métodos de fusão, no que diz respeito às estimativas de ângulos e módulos de tensão. Quanto aos ângulos, a Figura 6.13 claramente indica que os erros do estimador EEFS são os de menor magnitude dentre todos os estimadores analisados, como nos casos anteriores. Os gráficos na Figura 6.14, mostram que o mesmo se aplica aos módulos de tensão. Estes resultados se refletem também nos indicadores globais da Tabela 6.13. Vê-se que o estimador EEFS apresenta a menor média de erros de estimação de ângulo e magnitude de tensão, e a métrica de tensão demonstra que mesmo com as medidas PMU sendo de menor qualidade, após passarem pelo módulo de fusão elas agregam qualidade ao resultado final, e o módulo de fusão consegue processar todas as classes de medidas de forma a obter o resultado ótimo. O valor do índice de otimalidade, dado abaixo, indica que a degradação de desempenho do método de fusão com respeito ao estimador híbrido centralizado é suficientemente pequena.

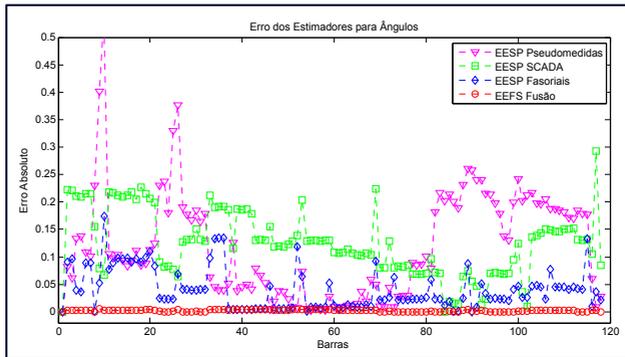


Figura 6.13 – Erros de estimação de ângulos do estimador EEFS para o EEH - Sistema IEEE 118 barras, considerando-se a não-observabilidade em relação às medidas fasoriais.

$$\mu_{SubOpt} = 0,8214\%$$

Por fim, apresenta-se a seguir uma comparação entre os tempos de processamento do estimador centralizado híbrido e do estimador que utiliza as técnicas de fusão. Para as análises, da mesma forma como vinha sendo utilizado nas simulações, considera-se como base de comparação o tempo de processamento do estimador híbrido. Portanto, nestes resultados ele será expresso como o tempo base, ou seja 100%, e

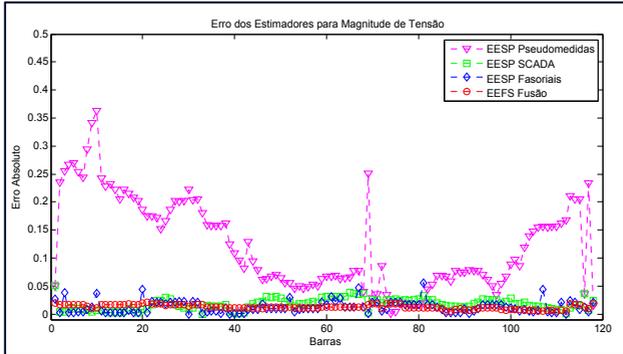


Figura 6.14 – Erros de estimação de magnitude de tensão do estimador EEFS para o EEH - Sistema IEEE 57 barras, considerando-se a não-observabilidade em relação às medidas fasoriais.

Tabela 6.13 – Indicadores de desempenho Caso 2 sistema IEEE 118 barras.

Estimador	Mét. de Tensão	Média do Erro		Desvio Padrão	
		$ V $	δ	$ V $	δ
EESP-Pseudo	13,704	0,1222	0,1186	0,1034	6,8630
EESP-SCADA	9,0153	0,0175	0,1256	0,0280	7,4431
EESP-PMU	4,8081	0,0123	0,0407	0,0288	4,5155
EEFS-Fusão	1,3436	0,0124	0,0022	0,0290	4,6257

o tempo do estimador com métodos de fusão será expresso percentualmente com relação a esta base.

Outro aspecto importante é o fato de que os estimadores que processam diferentes classes de medidas operam em paralelo, ou seja, todos eles iniciam o processamento de suas medidas a partir do mesmo instante de tempo. Desta forma, o tempo considerado para a estimação de estados será o máximo tempo entre os estimadores das diferentes classes, adicionado ao tempo de processamento do módulo de fusão. Disto resulta que o tempo de processamento do estimador com técnicas de fusão pode ser expresso como:

$$t_{EEFS} = \max(t_{EESP_{SC}}, t_{EESP_{PMU}}, t_{EESP_{pseudo}}) + t_{Mod_{fusao}} \quad (6.3)$$

onde t_{EESP} com subscrito apropriado designa os tempos de processamento dos módulos de estimação e $T_{Mod_{fusao}}$ é o tempo de processamento para a execução da fusão de estimativas.

Tabela 6.14 – Tempo de processamento dos estimadores EEH x EEFS

Estimador	IEEE-14 B.		IEEE-57 B.		IEEE-118 B.	
	1º Caso	2º Caso	1º Caso	2º Caso	1º Caso	2º Caso
EEH	100%	100%	100%	100%	100%	100%
EEFS-Fusão	12,9%	25,7%	29,3%	29,8%	52,6%	62,9%

A Tabela 6.14 apresenta a comparação entre o EEH e o EEFS. Na análise dos casos, é importante atentar para o fato de que cada um deles possui a sua referência de tempo. Consequentemente, não há sentido em se comparar tempos de processamento expressos em % entre os diferentes casos. O resultado mais importante desta análise é que, em todas as simulações, o tempo de processamento do EEFS foi menor do que o do EEH. Isto se deve principalmente às seguintes causas: (i) os estimadores individuais trabalham com conjuntos de dados muito menores do que o do estimador híbrido, o que reduz a dimensão e o enchimento da matriz ganho e portanto agiliza a solução da equação normal; (ii) o fato do método de fusão trabalhar em paralelo, enquanto o EEH trabalha sequencialmente. Conclui-se portanto que, também no aspecto computacional há vantagens em se utilizar a estratégia de fusão.

6.6 Conclusões

Os resultados dos estudos de caso apresentados neste capítulo permitem que se conclua que as técnicas de fusão de estimativas fornecem um método viável para a agregação de múltiplas classes de medidas e informações aos já estabelecidos processos de estimação de estados baseados nos sistemas SCADA. Nos casos onde cada uma das classes de medida consideradas garantem a observabilidade da rede elétrica, os valores do índice de subotimalidade calculado em relação aos resultados de um estimador híbrido centralizado são virtualmente nulos. Isto significa que praticamente não há degradação de resultados ao se utilizar o estimador EEFS em lugar do estimador EEH. Adicionalmente, mesmo nos casos em que os planos de medição formados exclusivamente por medições fasoriais não são observáveis, a degradação calculada é de apenas umas poucas unidades percentuais. Nos casos de não-observabilidade com relação a alguma das classes de medida, há ainda uma série de perguntas a serem respondidas, particularmente quando a parte não-observável for significativa com relação à dimensão da rede. Nestes casos é de suma importância que as informações *a priori* sejam críticas, ou seja devem ser atribuídas, apenas àquelas barras não observáveis. Isto faz com que a maior variância atribuída a elas não se propague sobre as demais medidas estimadas, o que corromperia as estimativas finais.

7 CONCLUSÕES

7.1 Considerações Finais

Este trabalho apresenta um novo método para a agregação de novas classes de medidas aos estimadores de estado convencionais baseados em medidas SCADA. A arquitetura de estimação proposta não causa alterações na estrutura do aplicativo convencional. Sendo assim, pode-se aproveitar toda a experiência e confiança acumuladas no uso de uma ferramenta já consolidada e em pleno funcionamento, além de não se desperdiçar o investimento feito em seu desenvolvimento. Do ponto de vista teórico, os resultados apresentados comprovam que, nos casos onde a observabilidade é garantida para cada uma das classes de medida, não há degradação de desempenho em relação à solução de um estimador híbrido simultâneo. Mesmo quando se considera a situação mais realista em que a rede elétrica não é observável com relação a alguma das classes de medida, observa-se uma degradação muito pequena no desempenho, da ordem de apenas alguns poucos pontos percentuais.

O Capítulo 2 desta dissertação é dedicado à apresentação das fontes de dados para os programas de estimação de estados, ou seja, as principais classes de medidas/informações que podem ser utilizadas como dados de entrada para programas de estimação de estados. Isto inclui as pseudomedidas, obtidas de dados de estudos, previsão de carga, conhecimento prévio do operador, etc. Outra classe considerada é formada pelas medidas SCADA, oriundas de uma tecnologia já consolidada, e as primeiras telemidas utilizadas na estimação de estados em sistemas de potência. Por este motivo apresentam grande penetração nas redes elétricas, porém apresentam menor precisão quando comparadas às medidas fasoriais. Por fim, são apresentadas as medidas fasoriais, que se constituem em uma nova tecnologia em medição, e apresentam maiores precisão e taxa de amostragem. Por outro lado, esta tecnologia ainda está em fase de implantação nos centros de operação, e na grande maioria dos sistemas de potência reais ainda não consegue abranger toda a rede elétrica.

No Capítulo 3 é formulado o problema de Estimação de Estados em Sistemas de Potência como um problema de otimização no qual se busca minimizar a soma ponderada dos quadrados dos resíduos da estimação. Também são apresentados alguns conceitos e aspectos importantes da formulação matemática utilizada para a implementação do estimador de estados e do módulo de fusão.

O Capítulo 4 faz uma revisão dos métodos mais conhecidos para a resolução do problema de estimação de estados, com destaque para o método da Equação Normal de Gauss, que é o utilizado na implementação do estimador desenvolvido nesta dissertação. Discutem-se as características do método, com seus aspectos positivos e negativos. Aborda-se também a inclusão de informações *a priori* no método da Equação Normal, técnica utilizada neste trabalho para contornar problemas de falta de observabilidade com relação a determinados planos de medição.

O Capítulo 5 introduz os métodos de fusão de dados, contendo um histórico da utilização destas técnicas e a formulação matemática correspondente. O arcabouço teórico é então particularizado para a aplicação ao problema de fusão de estimativas produzidas a partir de três classes de sensores, ou seja, pseudomedidas, medidas SCADA e medidas fasoriais. Este capítulo é muito importante para todo o desenvolvimento da dissertação, e nele estão contidas as principais contribuições deste trabalho.

Por fim, no Capítulo 6 são apresentados os resultados de várias simulações numéricas realizadas com os sistemas teste IEEE 14, 57 e 118 barras. São introduzidos índices de desempenho apropriados para os estimadores, que se mostram muito importantes para avaliação expedita de resultados envolvendo sistemas com grande número de variáveis. Para avaliação dos resultados no nível nodal, são utilizados gráficos que representam os erros absolutos de estimação para cada tipo de estimador. Os resultados apresentados no capítulo comprovam o bom desempenho da estratégia de fusão, tanto no caso em que se garante a observabilidade com respeito a cada classe de medidas, quanto em situações em que a rede não é observável com respeito a medidas fasoriais sincronizadas. Os métodos de fusão de estimativas qualificam-se portanto como uma alternativa válida e competitiva para a agregação de estimativas obtidas a partir de diferentes classes de medidas/informações.

7.1.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

O método apresentado nesta dissertação é uma alternativa válida e eficiente para a inclusão de novas classes de medidas à estimação de estados. Embora tenham sido apresentados e avaliados vários aspectos ligados à Fusão de Estimativas aplicada à Estimação de Estados, esforços de pesquisa acerca de pontos correlatos ao tema ainda se fazem

necessários. Os tópicos que merecem atenção em trabalhos futuros são os seguintes:

- Realizar a implementação do estimador de estados utilizado para a fusão de estimativas de três ou mais classes de sensores utilizando as técnicas de rotações ortogonais, uma vez que essas técnicas trabalham com informações *a priori* com menor custo computacional;
- Desenvolver técnicas para o processamento de erros grosseiros para aplicação a estimadores de estados baseados em métodos de fusão, considerando a incidência de erros nas diferentes classes de medidas consideradas.
- Estender o método de fusão de estimativas para aplicação a outras classes ou possivelmente subclasses de sensores.

8 ANEXOS

ANEXO A – EQUAÇÕES DA FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

A.0.2 Equações das Medidas - Elementos de $h(x)$

O vetor de medidas $h(x)$, é o vetor que relaciona as medidas aos estados, e tem a seguinte forma:

$$h(x^k) = \begin{bmatrix} \theta_i \\ V_{iPMU} \\ V_{iConv} \\ P_i \\ Q_i \\ T_{ij} \\ U_{ij} \\ I_{ij,r} \\ I_{ij,i} \end{bmatrix} \quad (A.1)$$

onde

θ_i é o ângulo de fase das medidas de tensão fasorial na barra i ;

V_{iPMU} é a medida de módulo de tensão fasorial na barra i ;

V_{iConv} é a medida de módulo de tensão convencional na barra i ;

P_i é a medida de injeção de potência ativa na barra i ;

Q_i é a medida de injeção de potência reativa na barra i ;

T_{ij} é a medida de fluxo ativo no ramo de i para j ;

U_{ij} é a medida de fluxo reativo no ramo de i para j ;

$I_{ij,r}$ é a medida de corrente parte real no ramo de i para j ;

$I_{ij,i}$ é a medida de corrente parte imaginária no ramo de i para j ;

Considerando-se o modelo π da linha de transmissão mostrada na Figura A.1.

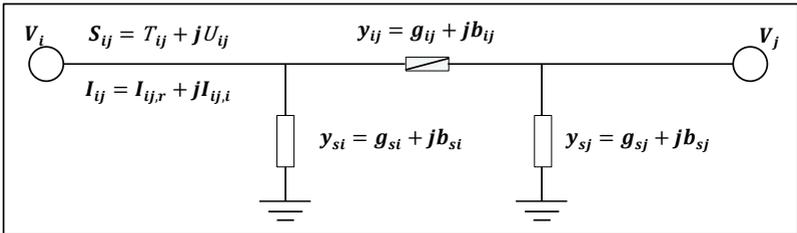


Figura A.1 – Modelo π de uma linha de transmissão.

- Equações de Fluxo de Potência: Os fluxos de potência ativa e

reativa da barra i para a barra j são dadas por:

$$T_{ij} = V_i^2(g_{si} + g_{ij}) - V_i V_j(g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (\text{A.2})$$

$$U_{ij} = -V_i^2(b_{si} + b_{ij}) - V_i V_j(g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (\text{A.3})$$

- Equações de Injeção de Potência: As injeções de potência ativa e reativa na barra i são dadas por:

$$P_i = V_i \sum_{j \in \mathfrak{N}_1} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (\text{A.4})$$

$$Q_i = V_i \sum_{j \in \mathfrak{N}_1} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (\text{A.5})$$

- Equações de Corrente: As equações da parte real e imaginária das correntes são dadas por:

$$I_{ij,r} = (g_{ij} + g_{si}) V_i \cos \theta_i - g_{ij} V_j \cos \theta_j - (b_{ij} + b_{si}) V_i \sin \theta_i + b_{ij} V_j \sin \theta_j \quad (\text{A.6})$$

$$I_{ij,i} = (g_{ij} + g_{si}) V_i \sin \theta_i - g_{ij} V_j \sin \theta_j + (b_{ij} + b_{si}) V_i \cos \theta_i - b_{ij} V_j \cos \theta_j \quad (\text{A.7})$$

onde

V_i e θ_i são respectivamente o módulo e ângulo da tensão na barra i ;

$\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$;

G_{ij} e B_{ij} são elementos da matriz de admitância nodal

$Y = G + jB$;

g_{ij} e b_{ij} são elementos da admitância série conectando as barras i e j ;

g_{si} e b_{si} são elementos da admitância shunt conectados à barra i ;

\mathfrak{N}_1 é o conjunto das barras diretamente conectadas à barra i ,

incluindo a própria barra i .

A.0.3 Estrutura da matriz Jacobiana - $H(x)$

A matriz Jacobiana $H(x)$ é a matriz que contém as derivadas de primeira ordem das medidas com relação às variáveis de estado, apresentando a seguinte estrutura:

$$\mathbf{H}(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta_i}{\partial \theta} & \frac{\partial \theta_i}{\partial V} \\ \frac{\partial V_{iPMU}}{\partial V_{iConv}} \frac{\partial \theta}{\partial V} & \frac{\partial V_{iPMU}}{\partial V_{iConv}} \frac{\partial V}{\partial V} \\ \frac{\partial P_i}{\partial Q_i} \frac{\partial \theta}{\partial V} & \frac{\partial P_i}{\partial Q_i} \frac{\partial V}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial T_{ij}} \frac{\partial \theta}{\partial V} & \frac{\partial Q_i}{\partial T_{ij}} \frac{\partial V}{\partial V} \\ \frac{\partial U_{ij}}{\partial I_{ij}} \frac{\partial \theta}{\partial V} & \frac{\partial U_{ij}}{\partial I_{ij}} \frac{\partial V}{\partial V} \\ \frac{\partial I_{ij,r}}{\partial I_{ij,i}} \frac{\partial \theta}{\partial V} & \frac{\partial I_{ij,r}}{\partial I_{ij,i}} \frac{\partial V}{\partial V} \\ \frac{\partial I_{ij,i}}{\partial \theta} & \frac{\partial I_{ij,i}}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (\text{A.8})$$

Os elementos internos a matriz Jacobiana $\mathbf{H}(x^k)$ são dados a seguir:

- Elementos correspondentes às medidas de ângulo de tensão:

$$\frac{\partial \theta_i}{\partial \theta_i} = 1, \frac{\partial \theta_i}{\partial \theta_k} = 0, \frac{\partial \theta_i}{\partial V_i} = 0, \frac{\partial \theta_i}{\partial V_k} = 0$$

- Elementos correspondentes às medidas de módulo de tensão (PMU/Scada):

$$\frac{\partial V_i}{\partial \theta_i} = 0, \frac{\partial V_i}{\partial \theta_k} = 0, \frac{\partial V_i}{\partial V_i} = 1, \frac{\partial V_i}{\partial V_k} = 0$$

- Elementos correspondentes às medidas de injeção de potência ativa:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} = \sum_{j=1}^N V_i V_j (-G_{ij} \text{sen} \theta_{ij} + B_{ij} \text{cos} \theta_{ij}) - V_i^2 B_{ii}$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} = V_i V_j (G_{ij} \text{sen} \theta_{ij} - B_{ij} \text{cos} \theta_{ij})$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_i} = \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \text{cos} \theta_{ij} + B_{ij} \text{sen} \theta_{ij}) + V_i G_{ii}$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_j} = V_i (G_{ij} \text{cos} \theta_{ij} + B_{ij} \text{sen} \theta_{ij})$$

- Elementos correspondentes às medidas de injeção de potência relativa:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} = \sum_{j=1}^N V_i V_j (G_{ij} \text{cos} \theta_{ij} + B_{ij} \text{sen} \theta_{ij}) - V_i^2 G_{ii}$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} = V_i V_j (-G_{ij} \text{cos} \theta_{ij} - B_{ij} \text{sen} \theta_{ij})$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \text{sen} \theta_{ij} - B_{ij} \text{cos} \theta_{ij}) - V_i B_{ii}$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_j} = V_i (G_{ij} \text{sen} \theta_{ij} - B_{ij} \text{cos} \theta_{ij})$$

- Elementos correspondentes às medidas de fluxo de potência ativa:

$$\frac{\partial T_{ij}}{\partial \theta_i} = V_i V_j (g_{ij} \text{sen} \theta_{ij} - b_{ij} \text{cos} \theta_{ij})$$

$$\frac{\partial T_{ij}}{\partial \theta_j} = -V_i V_j (g_{ij} \text{sen} \theta_{ij} - b_{ij} \text{cos} \theta_{ij})$$

$$\frac{\partial T_{ij}}{\partial V_i} = -V_j(g_{ij}\cos\theta_{ij} + b_{ij}\text{sen}\theta_{ij}) + 2V_i(g_{ij} + g_{si})$$

$$\frac{\partial T_{ij}}{\partial V_j} = -V_i(g_{ij}\cos\theta_{ij} + b_{ij}\text{sen}\theta_{ij})$$

- Elementos correspondentes às medidas de fluxo de potência reativa:

$$\frac{\partial U_{ij}}{\partial \theta_i} = -V_i V_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \text{sen} \theta_{ij})$$

$$\frac{\partial U_{ij}}{\partial \theta_j} = V_i V_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \text{sen} \theta_{ij})$$

$$\frac{\partial U_{ij}}{\partial V_i} = -V_j (g_{ij} \text{sen} \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) - 2V_i (b_{ij} + b_{si})$$

$$\frac{\partial U_{ij}}{\partial V_j} = -V_i (g_{ij} \text{sen} \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij})$$

- Elementos correspondentes às medidas da parte real da corrente:

$$\frac{\partial I_{ij,r}}{\partial \theta_i} = -V_i [(g_{ij} + g_{si}) \text{sen} \theta_i + (b_{ij} + b_{si}) \cos \theta_i]$$

$$\frac{\partial I_{ij,r}}{\partial \theta_j} = V_j (g_{ij} \text{sen} \theta_j + b_{ij} \cos \theta_j)$$

$$\frac{\partial I_{ij,r}}{\partial V_i} = (g_{ij} + g_{si}) \cos \theta_i - (b_{ij} + b_{si}) \text{sen} \theta_i$$

$$\frac{\partial I_{ij,r}}{\partial V_j} = -g_{ij} \cos \theta_j + b_{ij} \text{sen} \theta_j$$

- Elementos correspondentes às medidas da parte imaginária da corrente:

$$\frac{\partial I_{ij,i}}{\partial \theta_i} = V_i [(g_{ij} + g_{si}) \cos \theta_i - (b_{ij} + b_{si}) \text{sen} \theta_i]$$

$$\frac{\partial I_{ij,i}}{\partial \theta_j} = V_j (-g_{ij} \cos \theta_j + b_{ij} \text{sen} \theta_j)$$

$$\frac{\partial I_{ij,i}}{\partial V_i} = (g_{ij} + g_{si}) \text{sen} \theta_i + (b_{ij} + b_{si}) \cos \theta_i$$

$$\frac{\partial I_{ij,i}}{\partial V_j} = -g_{ij} \text{sen} \theta_j + b_{ij} \cos \theta_j$$

ANEXO B – SISTEMA TESTE IEEE 14 BARRAS

Tabela B.1 – Dados de Barra do Sistema IEEE 14 Barras

n°	Tipo	V(pu)	P _g (MW)	Q _g (Mvar)	Q _{mín} (Mvar)	Q _{máx} (Mvar)	P _l (MW)	Q _l (Mvar)	Shunt (pu)
1	2	1.060	232.4		-999.0	999.0	0.0	0.0	0.0
2	1	1.045	40.0		-999.0	999.0	21.7	12.7	0.0
3	1	1.010	0.0		-999.0	999.0	94.2	19.0	0.0
4	0		0.0	0.0	0.0	0.0	47.8	-3.9	0.0
5	0		0.0	0.0	0.0	0.0	7.6	1.6	0.0
6	1	1.070	0.0		-999.0	999.0	11.2	7.5	0.0
7	0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	1	1.090	0.0		-999.0	999.0	0.0	0.0	0.0
9	0		0.0	0.0	0.0	0.0	29.5	16.6	0.0
10	0		0.0	0.0	0.0	0.0	9.0	5.8	0.0
11	0		0.0	0.0	0.0	0.0	3.5	1.8	0.0
12	0		0.0	0.0	0.0	0.0	6.1	1.6	0.0
13	0		0.0	0.0	0.0	0.0	13.5	5.8	0.0
14	0		0.0	0.0	0.0	0.0	14.9	5.0	0.0

Tabela B.2 – Dados de Linha do Sistema IEEE 14 Barras

de	para	R(% pu)	X(% pu)	Shunt(% pu)
1	2	1.94	5.92	5.280
1	5	5.40	22.30	4.920
2	3	4.70	19.80	4.380
2	4	5.81	17.63	3.400
2	5	5.70	17.39	3.460
3	4	6.70	17.10	1.280
4	5	1.34	4.21	0.000
4	7	0.00	20.91	0.000
4	9	0.00	55.62	0.000
5	6	0.00	25.20	0.000
6	11	9.50	19.89	0.000
6	12	12.29	25.58	0.000
6	13	6.62	13.03	0.000
7	8	0.00	17.61	0.000
7	9	0.00	11.00	0.000
9	10	3.18	8.45	0.000
9	14	12.71	27.04	0.000
10	11	8.21	19.21	0.000
12	13	22.09	19.99	0.000
13	14	17.09	34.80	0.000

ANEXO C – SISTEMA TESTE IEEE 57 BARRAS

Tabela C.2 – Dados de Linha do Sistema IEEE 57 Barras

de	para	R(% pu)	X(% pu)	Shunt(% pu)
1	2	0.83	2.80	12.900
1	15	1.78	9.10	9.880
1	16	4.54	20.60	5.460
1	17	2.38	10.80	2.860
2	3	2.98	8.50	8.180
3	4	1.12	3.66	3.800
3	15	1.62	5.30	5.440
4	5	6.25	13.20	2.580
4	6	4.30	14.80	3.480
4	18	0.00	24.23	0.000
5	6	3.02	6.41	1.240
6	7	2.00	10.20	2.760
6	8	3.39	17.30	4.700
7	8	1.39	7.12	1.940
7	29	0.00	6.48	0.000
8	9	0.99	5.05	5.480
9	10	3.69	16.79	4.400
9	11	2.58	8.48	2.180
9	12	6.48	29.50	7.720
9	13	4.81	15.80	4.060
9	55	0.00	12.05	0.000
10	12	2.77	12.62	3.280
10	51	0.00	7.12	0.000
11	13	2.23	7.32	1.880
11	41	0.00	74.90	0.000
11	43	0.00	15.30	0.000
12	13	1.78	5.80	6.040
12	16	1.80	8.13	2.160
12	17	3.97	17.90	4.760
13	14	1.32	4.34	1.100
13	15	2.69	8.69	2.300
13	49	0.00	19.10	0.000
14	15	1.71	5.47	1.480
14	46	0.00	7.35	0.000
15	45	0.00	10.42	0.000
18	19	46.10	68.50	0.000
19	20	28.30	43.40	0.000
20	21	0.00	77.67	0.000
21	22	7.36	11.70	0.000
22	23	0.99	1.52	0.000
22	38	1.92	2.95	0.000
23	24	16.60	25.60	0.840
24	25	0.00	60.28	0.000
24	26	0.00	4.73	0.000
25	30	13.50	20.20	0.000
26	27	16.50	25.40	0.000
27	28	6.18	9.54	0.000
28	29	4.18	5.87	0.000
29	52	14.42	18.70	0.000
30	31	32.60	49.70	0.000
31	32	50.70	75.50	0.000
32	33	3.92	3.60	0.000
32	34	0.00	95.30	0.000
34	35	5.20	7.80	0.320
35	36	4.30	5.37	0.160
36	37	2.90	3.66	0.000
36	40	3.00	4.66	0.000
37	38	6.51	10.09	0.200

Tabela C.2 – Dados de Linha do Sistema IEEE 57 Barras

de	para	R(% pu)	X(% pu)	Shunt(% pu)
37	39	2.39	3.79	0.000
38	44	2.89	5.85	0.200
38	48	3.12	4.82	0.000
38	49	11.50	17.70	0.300
39	57	0.00	135.50	0.000
40	56	0.00	119.50	0.000
41	42	20.70	35.20	0.000
41	43	0.00	41.20	0.000
41	56	55.30	54.90	0.000
42	56	21.25	35.40	0.000
44	45	6.24	12.42	0.400
46	47	2.30	6.80	0.320
47	48	1.82	2.33	0.000
48	49	8.34	12.90	0.480
49	50	8.01	12.80	0.000
50	51	13.86	22.00	0.000
52	53	7.62	9.84	0.000
53	54	18.78	23.20	0.000
54	55	17.32	22.65	0.000
56	57	17.40	26.00	0.000

Tabela C.1 – Dados de Barra do Sistema IEEE 57 Barras

n ^o	Tipo	V(pu)	Pg(MW)	Qg(Mvar)	Qmín (Mvar)	Qmáx (Mvar)	Pl(MW)	Ql(Mvar)	Shunt (pu)
1	2	1.040	128.9		-999.0	999.0	55.0	17.0	0.0
2	1	1.010	0.0		-999.0	999.0	3.0	88.0	0.0
3	1	0.985	40.0		-999.0	999.0	41.0	21.0	0.0
4	0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0		0.0	0.0	0.0	0.0	13.0	4.0	0.0
6	1	0.980	0.0		-999.0	999.0	75.0	2.0	0.0
7	0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	1	1.005	450.0		-999.0	999.0	150.0	22.0	0.0
9	1	0.980	0.0		-999.0	999.0	121.0	26.0	0.0
10	0		0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	2.0	0.0
11	0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	1	1.015	310.0		-999.0	999.0	377.0	24.0	0.0
13	0		0.0	0.0	0.0	0.0	18.0	2.3	0.0
14	0		0.0	0.0	0.0	0.0	10.5	5.3	0.0
15	0		0.0	0.0	0.0	0.0	22.0	5.0	0.0
16	0		0.0	0.0	0.0	0.0	43.0	3.0	0.0
17	0		0.0	0.0	0.0	0.0	42.0	8.0	0.0
18	0		0.0	0.0	0.0	0.0	27.2	9.8	0.0
19	0		0.0	0.0	0.0	0.0	3.3	0.6	0.0
20	0		0.0	0.0	0.0	0.0	2.3	1.0	0.0
21	0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
22	0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
23	0		0.0	0.0	0.0	0.0	6.3	2.1	0.0
24	0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25	0		0.0	0.0	0.0	0.0	6.3	3.2	0.0
26	0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
27	0		0.0	0.0	0.0	0.0	9.3	0.5	0.0
28	0		0.0	0.0	0.0	0.0	4.6	2.3	0.0
29	0		0.0	0.0	0.0	0.0	17.0	2.6	0.0
30	0		0.0	0.0	0.0	0.0	3.6	1.8	0.0
31	0		0.0	0.0	0.0	0.0	5.8	2.9	0.0
32	0		0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	0.8	0.0
33	0		0.0	0.0	0.0	0.0	3.8	1.9	0.0
34	0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
35	0		0.0	0.0	0.0	0.0	6.0	3.0	0.0
36	0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
37	0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
38	0		0.0	0.0	0.0	0.0	14.0	7.0	0.0
39	0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
40	0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
41	0		0.0	0.0	0.0	0.0	6.3	3.0	0.0
42	0		0.0	0.0	0.0	0.0	7.1	4.4	0.0
43	0		0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	1.0	0.0
44	0		0.0	0.0	0.0	0.0	12.0	1.8	0.0
45	0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
46	0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
47	0		0.0	0.0	0.0	0.0	29.7	11.6	0.0
48	0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
49	0		0.0	0.0	0.0	0.0	18.0	8.5	0.0
50	0		0.0	0.0	0.0	0.0	21.0	10.5	0.0
51	0		0.0	0.0	0.0	0.0	18.0	5.3	0.0
52	0		0.0	0.0	0.0	0.0	4.9	2.2	0.0
53	0		0.0	0.0	0.0	0.0	20.0	10.0	0.0
54	0		0.0	0.0	0.0	0.0	4.1	1.4	0.0
55	0		0.0	0.0	0.0	0.0	6.8	3.4	0.0
56	0		0.0	0.0	0.0	0.0	7.6	2.2	0.0
57	0		0.0	0.0	0.0	0.0	6.7	2.0	0.0

ANEXO D – SISTEMA TESTE IEEE 118 BARRAS

Tabela D.1 – Dados de Barra do Sistema IEEE 118 Barras

nº	Tipo	V (pu)	Pg (MW)	Qg (Mvar)	Qmín (Mvar)	Qmáx (Mvar)	P (MW)	Ql (Mvar)	Shunt (pu)
1	2	0.955	0.0	27.0	-5.0	15.0	51.0	27.0	0.0
2	0	0.971	0.0	9.0	0.0	0.0	20.0	9.0	0.0
3	0	0.968	0.0	10.0	0.0	0.0	39.0	10.0	0.0
4	2	0.998	-9.0	12.0	-300.0	300.0	30.0	12.0	0.0
5	0	1.002	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.40
6	2	0.990	0.0	22.0	-13.0	50.0	52.0	22.0	0.0
7	0	0.989	0.0	2.0	0.0	19.0	0.0	2.0	0.0
8	2	1.015	-28.0	0.0	-300.0	300.0	0.0	0.0	0.0
9	0	1.043	0.0	0.0	0.0	200.0	0.0	0.0	0.0
10	2	1.050	450.0	0.0	-147.0	0.0	70.0	23.0	0.0
11	0	0.985	0.0	23.0	0.0	120.0	47.0	10.0	0.0
12	2	0.990	85.0	10.0	-35.0	0.0	34.0	16.0	0.0
13	0	0.968	0.0	16.0	0.0	0.0	14.0	1.0	0.0
14	0	0.984	0.0	1.0	0.0	30.0	90.0	30.0	0.0
15	2	0.970	0.0	30.0	-10.0	0.0	25.0	10.0	0.0
16	0	0.984	0.0	10.0	0.0	0.0	11.0	3.0	0.0
17	0	0.995	0.0	3.0	0.0	50.0	60.0	34.0	0.0
18	2	0.973	0.0	34.0	-16.0	24.0	45.0	25.0	0.0
19	2	0.963	0.0	25.0	-8.0	0.0	18.0	3.0	0.0
20	0	0.958	0.0	3.0	0.0	0.0	14.0	8.0	0.0
21	0	0.959	0.0	8.0	0.0	0.0	1.0	5.0	0.0
22	0	0.970	0.0	5.0	0.0	0.0	7.0	3.0	0.0
23	0	1.000	0.0	3.0	0.0	300.0	0.0	0.0	0.0
24	2	0.992	-13.0	0.0	-300.0	140.0	0.0	0.0	0.0
25	2	1.050	220.0	0.0	-47.0	0.0	0.0	0.0	0.0
26	2	1.015	314.0	0.0	-1000.0	1000.0	62.0	13.0	0.0
27	2	0.968	-9.0	13.0	-300.0	300.0	17.0	7.0	0.0
28	0	0.962	0.0	7.0	0.0	0.0	24.0	4.0	0.0
29	0	0.963	0.0	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30	0	0.968	0.0	0.0	0.0	300.0	0.0	0.0	0.0
31	2	0.967	7.0	27.0	-300.0	0.0	43.0	27.0	0.0
32	2	0.964	0.0	23.0	-14.0	42.0	59.0	23.0	0.0
33	0	0.972	0.0	9.0	0.0	0.0	23.0	9.0	0.0
34	2	0.986	0.0	26.0	-8.0	24.0	59.0	26.0	0.14
35	0	0.981	0.0	9.0	0.0	24.0	33.0	9.0	0.0
36	2	0.980	0.0	17.0	-8.0	0.0	31.0	17.0	0.0
37	0	0.992	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
38	0	0.962	0.0	11.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
39	0	0.970	0.0	23.0	-300.0	300.0	27.0	11.0	0.0
40	2	0.967	-46.0	0.0	0.0	0.0	20.0	23.0	0.0
41	0	0.967	0.0	10.0	0.0	300.0	37.0	10.0	0.0
42	2	0.985	-59.0	23.0	-300.0	300.0	57.0	23.0	0.0
43	0	0.978	0.0	7.0	0.0	0.0	18.0	7.0	0.0
44	0	0.985	0.0	8.0	0.0	0.0	16.0	8.0	0.10
45	0	0.987	0.0	22.0	0.0	0.0	53.0	22.0	0.0
46	2	1.005	19.0	10.0	-100.0	100.0	28.0	10.0	0.10

Tabela D.1 – Dados de Barra do Sistema IEEE 118 Barras

n°	Tipo	V(pu)	Pg(MW)	Qg(Mvar)	Qmín. (Mvar)	Qmáx. (Mvar)	P(MW)	Ql(Mvar)	Shunt (pu)
47	0	1.017	0.0	0.0	0.0	0.0	34.0	0.0	0.0
48	0	1.021	0.0	11.0	0.0	0.0	20.0	11.0	0.15
49	2	1.025	204.0	30.0	-85.0	210.0	17.0	30.0	0.0
50	0	1.001	0.0	4.0	0.0	0.0	87.0	4.0	0.0
51	0	0.967	0.0	8.0	0.0	0.0	17.0	8.0	0.0
52	0	0.957	0.0	5.0	0.0	0.0	18.0	5.0	0.0
53	0	0.946	0.0	11.0	0.0	0.0	23.0	11.0	0.0
54	2	0.955	48.0	32.0	-300.0	300.0	113.0	32.0	0.0
55	2	0.952	0.0	22.0	23.0	63.0	63.0	22.0	0.0
56	2	0.954	0.0	18.0	-8.0	15.0	84.0	18.0	0.0
57	0	0.971	0.0	3.0	0.0	0.0	12.0	3.0	0.0
58	0	0.959	0.0	3.0	0.0	0.0	12.0	3.0	0.0
59	2	0.985	155.0	113.0	-60.0	180.0	277.0	113.0	0.0
60	0	0.993	0.0	3.0	0.0	0.0	78.0	3.0	0.0
61	2	0.995	160.0	0.0	-100.0	300.0	0.0	0.0	0.0
62	2	0.998	0.0	14.0	-20.0	20.0	77.0	14.0	0.0
63	0	0.969	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
64	0	0.984	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
65	2	1.005	391.0	0.0	-67.0	200.0	0.0	0.0	0.0
66	2	1.050	392.0	18.0	-67.0	200.0	39.0	18.0	0.0
67	0	1.020	0.0	7.0	0.0	0.0	28.0	7.0	0.0
68	0	1.003	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
69	3	1.035	516.4	0.0	-300.0	300.0	0.0	0.0	0.0
70	2	0.984	0.0	20.0	-10.0	32.0	66.0	20.0	0.0
71	0	0.987	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
72	2	0.980	-12.0	0.0	-100.0	100.0	0.0	0.0	0.0
73	2	0.991	-6.0	0.0	-100.0	100.0	0.0	0.0	0.0
74	2	0.958	0.0	27.0	-6.0	9.0	68.0	27.0	0.12
75	0	0.967	0.0	11.0	0.0	0.0	47.0	11.0	0.0
76	2	0.943	0.0	36.0	-8.0	23.0	68.0	36.0	0.0
77	2	1.006	0.0	28.0	-20.0	70.0	61.0	28.0	0.0
78	0	1.003	0.0	26.0	0.0	0.0	71.0	26.0	0.0
79	0	1.009	0.0	32.0	0.0	0.0	39.0	32.0	0.20
80	2	1.040	477.0	26.0	-165.0	280.0	130.0	26.0	0.0
81	0	0.997	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
82	0	0.989	0.0	27.0	0.0	0.0	54.0	27.0	0.20
83	0	0.985	0.0	10.0	0.0	0.0	20.0	10.0	0.10
84	0	0.980	0.0	7.0	0.0	0.0	11.0	7.0	0.0
85	2	0.985	0.0	15.0	-8.0	23.0	24.0	15.0	0.0
86	0	0.987	0.0	10.0	0.0	0.0	21.0	10.0	0.0
87	2	1.015	4.0	0.0	-100.0	1000.0	0.0	0.0	0.0
88	0	0.987	0.0	10.0	0.0	0.0	48.0	10.0	0.0
89	2	1.005	607.0	0.0	-210.0	300.0	0.0	0.0	0.0
90	2	0.985	-85.0	42.0	-300.0	300.0	78.0	42.0	0.0
91	2	0.980	-10.0	0.0	-100.0	100.0	0.0	0.0	0.0
92	2	0.993	0.0	10.0	-3.0	9.0	65.0	10.0	0.0

Tabela D.1 – Dados de Barra do Sistema IEEE 118 Barras

n°	Tipo	V (pu)	Pg(MW)	Qg(Mvar)	Qmin (Mvar)	Qmáx (Mvar)	P(MW)	Ql(Mvar)	Shunt (pu)
93	0	0.987	0.0	7.0	0.0	0.0	12.0	7.0	0.0
94	0	0.991	0.0	16.0	0.0	0.0	30.0	16.0	0.0
95	0	0.981	0.0	31.0	0.0	0.0	42.0	31.0	0.0
96	0	0.993	0.0	15.0	0.0	0.0	38.0	15.0	0.0
97	0	1.011	0.0	9.0	0.0	0.0	15.0	9.0	0.0
98	0	1.024	0.0	8.0	0.0	0.0	34.0	8.0	0.0
99	2	1.010	-42.0	0.0	-100.0	100.0	0.0	0.0	0.0
100	2	1.017	252.0	18.0	-50.0	155.0	37.0	18.0	0.0
101	0	0.993	0.0	15.0	0.0	0.0	22.0	15.0	0.0
102	0	0.991	0.0	3.0	0.0	0.0	5.0	3.0	0.0
103	2	1.001	40.0	16.0	-15.0	40.0	23.0	16.0	0.0
104	2	0.971	0.0	25.0	-8.0	23.0	38.0	25.0	0.0
105	2	0.965	0.0	26.0	-8.0	23.0	31.0	26.0	0.20
106	0	0.962	0.0	16.0	0.0	0.0	43.0	16.0	0.0
107	2	0.952	-22.0	12.0	-200.0	200.0	28.0	12.0	0.06
108	0	0.967	0.0	1.0	0.0	0.0	2.0	1.0	0.0
109	0	0.967	0.0	3.0	0.0	0.0	8.0	3.0	0.0
110	2	0.973	0.0	30.0	-8.0	23.0	39.0	30.0	0.06
111	2	0.980	36.0	0.0	-100.0	1000.0	0.0	0.0	0.0
112	2	0.975	-43.0	13.0	-100.0	1000.0	25.0	13.0	0.0
113	2	0.993	-6.0	0.0	-100.0	200.0	0.0	0.0	0.0
114	0	0.960	0.0	3.0	0.0	0.0	8.0	3.0	0.0
115	0	0.960	0.0	7.0	0.0	0.0	22.0	7.0	0.0
116	2	1.005	-184.0	0.0	-1000.0	1000.0	0.0	0.0	0.0
117	0	0.974	0.0	8.0	0.0	0.0	20.0	8.0	0.0
118	0	0.949	0.0	15.0	0.0	0.0	33.0	15.0	0.0

Tabela D.2 – Dados de Linha do Sistema IEEE 118 Barras

de	para	R(% pu)	X(% pu)	Shunt(% pu)
1	2	03.030	09.990	2.540
1	3	01.290	04.240	1.082
4	5	00.176	00.798	0.210
3	5	02.410	10.800	2.840
5	6	01.190	05.400	1.426
6	7	00.459	02.080	0.550
8	9	00.244	03.050	116.2
8	5	00.000	02.670	0.0
9	10	00.258	03.220	123.0
4	11	02.090	06.880	1.748
5	11	02.030	06.820	1.738
11	12	00.595	01.960	0.502
2	12	01.870	06.160	1.572
3	12	04.840	16.000	4.060
7	12	00.862	03.400	0.874
11	13	02.225	07.310	1.876
12	14	02.150	07.070	1.816
13	15	07.440	24.440	6.268
14	15	05.950	19.500	5.020
12	16	02.120	08.340	2.140
15	17	01.320	04.370	4.440
16	17	04.540	18.010	4.660
17	18	01.230	05.050	1.298
18	19	01.119	04.930	1.142
19	20	02.520	11.700	2.980
15	19	01.200	03.940	1.010
20	21	01.830	08.490	2.160
21	22	02.090	09.700	2.460
22	23	03.420	15.900	4.040
23	24	01.350	04.920	4.980
23	25	01.560	08.000	8.640
26	25	00.000	03.820	0.0
25	27	03.180	16.300	17.64
27	28	01.913	08.550	02.16
28	29	02.370	09.430	02.38
30	17	00.000	03.880	0.0
8	30	00.431	05.040	51.40
26	30	00.799	08.600	90.80
17	31	04.740	15.630	03.99
29	31	01.080	03.310	00.83
23	32	03.170	11.530	11.73
31	32	02.980	09.850	02.51
27	32	02.290	07.550	01.92
15	33	03.800	12.440	03.19
19	34	07.520	24.700	06.32
35	36	00.224	01.020	00.26
35	37	01.100	04.970	01.31
33	37	04.150	14.200	03.66
34	36	00.871	02.680	00.56
34	37	00.256	00.940	00.98
38	37	00.000	03.750	0.0
37	39	03.210	10.600	02.70
37	40	05.930	16.800	04.20
30	38	00.464	05.400	42.20
39	40	01.840	06.050	01.55
40	41	01.450	04.870	01.22
40	42	05.550	18.300	04.66
41	42	04.100	13.500	03.44

Tabela D.2 – Dados de Linha do Sistema IEEE 118 Barras

de	para	R(% pu)	X(% pu)	Shunt(% pu)
43	44	06.080	24.540	06.06
34	43	04.130	16.810	04.22
44	45	02.240	09.010	02.24
45	46	04.000	13.560	03.32
46	47	03.800	12.700	03.16
46	48	06.010	18.900	04.72
47	49	01.910	06.250	01.60
42	49	07.150	32.300	08.60
42	49	07.150	32.300	08.60
45	49	06.840	18.600	04.44
48	49	01.790	05.050	01.25
49	50	02.670	07.520	01.87
49	51	04.860	13.700	03.42
51	52	02.030	05.880	01.39
52	53	04.050	16.350	04.05
53	54	02.630	12.200	03.10
49	54	07.300	28.900	07.38
49	54	08.690	29.100	07.30
54	55	01.690	07.070	02.02
54	56	00.275	00.955	00.73
55	56	00.488	01.510	00.37
56	57	03.430	09.660	02.42
50	57	04.740	13.400	03.32
56	58	03.430	09.660	02.42
51	58	02.550	07.190	01.78
54	59	05.030	22.930	05.98
56	59	08.250	25.100	05.69
56	59	08.030	23.900	05.36
55	59	04.739	21.580	05.64
59	60	03.170	14.500	03.76
59	61	03.280	15.000	03.88
60	61	00.264	01.350	01.45
60	62	01.230	05.610	01.46
61	62	00.824	03.760	00.98
63	59	00.000	03.860	0.0
63	64	00.172	02.000	21.60
64	61	00.000	02.680	0.0
38	65	00.901	09.860	04.60
64	65	00.269	03.020	38.00
49	66	01.800	09.190	02.48
49	66	01.800	09.190	02.48
62	66	04.820	21.800	05.78
62	67	02.580	11.700	03.10
65	66	00.000	03.700	0.0
66	67	02.240	10.150	02.68
65	68	00.138	01.600	63.80
47	69	08.440	27.780	07.09
49	69	09.850	32.400	08.28
68	69	00.000	03.700	0.0
69	70	03.000	12.700	12.20
24	70	00.221	41.150	10.19
70	71	00.882	03.550	00.87
24	72	04.880	19.600	04.88
71	72	04.460	18.000	04.44
71	73	00.866	04.540	01.17
70	74	04.010	13.230	03.36
70	75	04.280	14.100	03.60
69	75	04.050	12.200	12.40

Tabela D.2 – Dados de Linha do Sistema IEEE 118 Barras

de	para	R(% pu)	X(% pu)	Shunt(% pu)
74	75	01.230	04.060	01.03
76	77	04.440	14.800	03.68
69	77	03.090	10.100	10.38
75	77	06.010	19.990	04.97
77	78	00.376	01.240	01.26
78	79	00.546	02.440	00.64
77	80	01.700	04.850	04.72
77	80	02.940	10.500	02.28
79	80	01.560	07.040	01.87
68	81	00.175	02.020	80.80
81	80	00.000	03.700	0.0
77	82	02.980	08.530	08.17
82	83	01.120	03.665	03.79
83	84	06.250	13.200	02.58
83	85	04.300	14.800	03.48
84	85	03.020	06.410	01.23
85	86	03.500	12.300	02.76
86	87	02.828	20.740	04.45
85	88	02.000	10.200	02.76
85	89	02.390	17.300	04.70
88	89	01.390	07.120	01.93
89	90	05.180	18.800	05.28
89	90	02.380	09.970	10.60
90	91	02.540	08.360	02.14
89	92	00.990	05.050	05.48
89	92	03.930	15.810	04.14
91	92	03.870	12.720	03.26
92	93	02.580	08.480	02.18
92	94	04.810	15.800	04.06
93	94	02.230	07.320	01.87
94	95	01.320	04.340	01.11
80	96	03.560	18.200	04.94
82	96	01.620	05.300	05.44
94	96	02.690	08.690	02.30
80	97	01.830	09.340	02.54
80	98	02.380	10.800	02.86
80	99	04.540	20.600	05.46
92	100	06.480	29.500	04.72
94	100	01.780	05.800	06.04
95	96	01.710	05.470	01.47
96	97	01.730	08.850	02.40
98	100	03.970	17.900	04.76
99	100	01.800	08.130	02.16
100	101	02.770	12.620	03.28
92	102	01.230	05.590	01.46
101	102	02.460	11.200	02.94
100	103	01.600	05.250	05.36
100	104	04.510	20.400	05.41
103	104	04.660	15.840	04.07
103	105	05.350	16.250	04.08
100	106	06.050	22.900	06.20
104	105	00.994	03.780	00.98
105	106	01.400	05.470	01.43
105	107	05.300	18.300	04.72
105	108	02.610	07.030	01.84
106	107	05.300	18.300	04.72
108	109	01.050	02.880	00.76
103	110	03.906	18.130	04.61

Tabela D.2 – Dados de Linha do Sistema IEEE 118 Barras

de	para	R(% pu)	X(% pu)	Shunt(% pu)
109	110	02.780	07.620	02.02
110	111	02.200	07.550	02.00
110	112	02.470	06.400	06.20
17	113	00.913	03.010	00.76
32	113	06.150	20.300	05.18
32	114	01.350	06.120	01.62
27	115	01.640	07.410	01.97
114	115	00.230	01.040	00.27
68	116	00.034	00.405	16.40
12	117	03.290	14.000	03.58
75	118	01.450	04.810	01.19
76	118	01.640	05.440	01.35

ANEXO E – DADOS DO SISTEMA IEEE 57 BARRAS

Tabela E.1 – Dados do Sistema IEEE 57

Barra		g_l (p.u.)	b_l (p.u.)	b_0 (p.u.)	Barra		g_l (p.u.)	b_l (p.u.)	b_0 (p.u.)
De	Para				De	Para			
1	2	0.97316D+01	-0.32830D+02	0.64500D-01	22	23	0.30087D+02	-0.46194D+02	0.00000D+00
1	15	0.20703D+01	-0.10584D+02	0.49400D-01	22	38	0.15498D+02	-0.23812D+02	0.00000D+00
1	16	0.10203D+01	-0.46295D+01	0.27300D-01	23	24	0.17832D+01	-0.27500D+01	0.42000D-02
1	17	0.19460D+01	-0.88304D+01	0.14300D-01	24	25	0.00000D+00	-0.81301D+00	0.00000D+00
2	3	0.36731D+01	-0.10477D+02	0.40900D-01	24	26	0.00000D+00	-0.21142D+02	0.00000D+00
3	4	0.76451D+01	-0.24983D+02	0.19000D-01	25	30	0.22870D+01	-0.34220D+01	0.00000D+00
3	15	0.52744D+01	-0.17256D+02	0.27200D-01	26	27	0.17985D+01	-0.27687D+01	0.00000D+00
4	5	0.29301D+01	-0.61884D+01	0.12900D-01	27	28	0.47831D+01	-0.73837D+01	0.00000D+00
4	6	0.18103D+01	-0.62308D+01	0.17400D-01	28	29	0.80494D+01	-0.11304D+02	0.00000D+00
4	18	0.00000D+00	-0.18018D+01	0.00000D+00	29	52	0.25860D+01	-0.33535D+01	0.00000D+00
5	6	0.60149D+01	-0.12767D+02	0.62000D-02	30	31	0.92277D+00	-0.14068D+01	0.00000D+00
6	7	0.18512D+01	-0.94409D+01	0.13800D-01	31	32	0.61300D+00	-0.91286D+00	0.00000D+00
6	8	0.10908D+01	-0.55666D+01	0.23500D-01	32	33	0.13839D+02	-0.12709D+02	0.00000D+00
7	8	0.26413D+01	-0.13529D+02	0.97000D-02	32	34	0.00000D+00	-0.10493D+01	0.00000D+00
7	29	0.00000D+00	-0.15432D+02	0.00000D+00	34	35	0.59172D+01	-0.88757D+01	0.16000D-02
8	9	0.37383D+01	-0.19069D+02	0.27400D-01	35	36	0.90857D+01	-0.11347D+02	0.80000D-03
9	10	0.12486D+01	-0.56815D+01	0.22000D-01	36	37	0.13299D+02	-0.16785D+02	0.00000D+00
9	11	0.32838D+01	-0.10793D+02	0.10900D-01	36	40	0.97670D+01	-0.15171D+02	0.00000D+00
9	12	0.71034D+00	-0.32338D+01	0.38600D-01	37	38	0.45149D+01	-0.69978D+01	0.10000D-02
9	13	0.17634D+01	-0.57923D+01	0.20300D-01	37	39	0.11905D+02	-0.18878D+02	0.00000D+00
9	55	0.00000D+00	-0.82988D+01	0.00000D+00	38	44	0.67881D+01	-0.13741D+02	0.10000D-02
10	12	0.16593D+01	-0.75597D+01	0.16400D-01	38	48	0.94641D+01	-0.14621D+02	0.00000D+00
10	51	0.00000D+00	-0.14045D+02	0.00000D+00	38	49	0.25811D+01	-0.39727D+01	0.15000D-02
11	13	0.38084D+01	-0.12501D+02	0.94000D-02	39	57	0.00000D+00	-0.73801D+00	0.00000D+00
11	41	0.00000D+00	-0.13351D+01	0.00000D+00	40	56	0.00000D+00	-0.83682D+00	0.00000D+00
11	43	0.00000D+00	-0.65359D+01	0.00000D+00	41	42	0.12414D+01	-0.21109D+01	0.00000D+00
12	13	0.48359D+01	-0.15757D+02	0.30200D-01	41	43	0.00000D+00	-0.24272D+01	0.00000D+00
12	16	0.25960D+01	-0.11725D+02	0.10800D-01	41	56	0.91072D+00	-0.90414D+00	0.00000D+00
12	17	0.11809D+01	-0.53247D+01	0.23800D-01	42	56	0.12465D+01	-0.20766D+01	0.00000D+00
13	14	0.64146D+01	-0.21090D+02	0.55000D-02	44	45	0.32299D+01	-0.64288D+01	0.20000D-02
13	15	0.32507D+01	-0.10501D+02	0.11500D-01	46	47	0.44634D+01	-0.13196D+02	0.16000D-02
13	49	0.00000D+00	-0.52356D+01	0.00000D+00	47	48	0.20821D+02	-0.26655D+02	0.00000D+00
14	15	0.52063D+01	-0.16654D+02	0.74000D-02	48	49	0.35344D+01	-0.54669D+01	0.24000D-02
14	46	0.00000D+00	-0.13605D+02	0.00000D+00	49	50	0.35132D+01	-0.56140D+01	0.00000D+00
15	45	0.00000D+00	-0.95969D+01	0.00000D+00	50	51	0.20500D+01	-0.32340D+01	0.00000D+00
18	19	0.67620D+00	-0.10048D+01	0.00000D+00	52	53	0.49196D+01	-0.63529D+01	0.00000D+00
19	20	0.10542D+01	-0.16167D+01	0.00000D+00	53	54	0.21079D+01	-0.26040D+01	0.00000D+00
20	21	0.00000D+00	-0.12875D+01	0.00000D+00	54	55	0.21304D+01	-0.27860D+01	0.00000D+00
21	22	0.38522D+01	-0.61237D+01	0.00000D+00	56	57	0.17778D+01	-0.26564D+01	0.00000D+00

ANEXO F – DADOS DO SISTEMA IEEE 118 BARRAS

Tabela F.1 – Dados do Sistema IEEE 118

Barra		<i>g</i> _l	<i>b</i> _l	<i>b</i> ₀	Barra		<i>g</i> _l	<i>b</i> _l	<i>b</i> ₀
De	Para	(p.u.)	(p.u.)	(p.u.)	De	Para	(p.u.)	(p.u.)	(p.u.)
1	47	0.1603D+01	-0.3295D+01	0.35460D+01	53	54	0.16885D+01	-0.78327D+01	0.13900D+01
1	49	0.85892D+00	-0.28253D+01	0.41400D+01	54	55	0.31983D+01	-0.13380D+02	0.10100D+01
1	68	0.00000D+00	-0.27027D+02	0.00000D+00	54	56	0.27681D+02	-0.97396D+02	0.36600D+02
1	70	0.17617D+01	-0.74579D+01	0.61000D+01	54	59	0.91274D+00	-0.41609D+01	0.29900D+01
1	75	0.24509D+01	-0.73831D+01	0.62000D+01	55	56	0.19443D+02	-0.59916D+02	0.18700D+02
1	77	0.27699D+01	-0.90536D+01	0.51900D+01	55	59	0.97099D+00	-0.44206D+01	0.28200D+01
2	12	0.45123D+01	-0.14864D+02	0.78600D+02	56	57	0.32642D+01	-0.91930D+01	0.12100D+01
2	69	0.27803D+01	-0.91667D+01	0.12700D+01	56	58	0.32642D+01	-0.91930D+01	0.12100D+01
3	5	0.19682D+01	-0.88201D+01	0.14200D+01	56	59	0.24462D+01	-0.73565D+01	0.55200D+01
3	12	0.17321D+01	-0.57260D+01	0.20300D+01	59	60	0.14390D+01	-0.65820D+01	0.18800D+01
3	69	0.63677D+01	-0.21587D+02	0.54100D+02	59	61	0.13913D+01	-0.63634D+01	0.19400D+01
4	5	0.26770D+02	-0.11898D+03	0.10500D+02	59	63	0.00000D+00	-0.25997D+02	0.00000D+00
4	11	0.40424D+01	-0.13307D+02	0.87400D+02	60	61	0.13756D+02	-0.71425D+02	0.72800D+02
5	6	0.38910D+01	-0.17661D+02	0.71300D+02	60	62	0.37290D+01	-0.17008D+02	0.73400D+02
5	8	0.00000D+00	-0.37453D+02	0.00000D+00	61	62	0.55368D+01	-0.25388D+02	0.49000D+02
5	11	0.40092D+01	-0.13469D+02	0.86900D+02	61	64	0.00000D+00	-0.37313D+02	0.00000D+00
6	7	0.10137D+02	-0.45835D+02	0.27500D+02	62	66	0.96959D+00	-0.43734D+01	0.28900D+01
7	12	0.69921D+01	-0.27643D+02	0.43700D+02	62	67	0.19793D+01	-0.81507D+01	0.11500D+01
8	9	0.25641D+01	-0.32585D+02	0.58100D+00	63	64	0.42195D+01	-0.49641D+02	0.10800D+00
8	30	0.16806D+01	-0.19698D+02	0.25700D+00	64	65	0.29369D+01	-0.32850D+02	0.19000D+00
9	10	0.24914D+01	-0.30855D+02	0.61500D+00	65	66	0.00000D+00	-0.27027D+02	0.00000D+00
9	12	0.14380D+02	-0.46649D+02	0.25100D+02	65	68	0.54272D+01	-0.63202D+02	0.31900D+01
11	13	0.38170D+01	-0.12515D+02	0.93800D+02	66	67	0.20733D+01	-0.93947D+01	0.13410D+01
12	14	0.39372D+01	-0.12947D+02	0.90800D+02	68	81	0.43766D+01	-0.49115D+02	0.40400D+01
12	16	0.28629D+01	-0.11263D+02	0.10700D+01	68	116	0.18645D+02	-0.24860D+03	0.82000D+01
12	117	0.15907D+01	-0.67690D+01	0.17900D+01	70	71	0.65785D+01	-0.26538D+02	0.43900D+02
13	15	0.11399D+01	-0.37446D+01	0.13140D+01	70	74	0.20982D+01	-0.69226D+01	0.16840D+01
14	15	0.14315D+01	-0.46914D+01	0.25100D+01	70	75	0.19712D+01	-0.64939D+01	0.18000D+01
15	17	0.63424D+01	-0.20970D+02	0.22200D+01	71	72	0.12969D+01	-0.52342D+01	0.2220D+01
15	19	0.70740D+01	-0.23262D+02	0.50500D+02	71	73	0.40714D+01	-0.21246D+02	0.58900D+02
15	33	0.2249D+01	-0.73523D+01	0.13970D+01	74	75	0.68347D+01	-0.22560D+02	0.31700D+02
16	15	0.13194D+01	-0.42945D+01	0.23200D+01	75	77	0.13383D+01	-0.45878D+01	0.25800D+01
17	18	0.45530D+01	-0.18693D+02	0.64900D+02	75	78	0.57432D+01	-0.19058D+02	0.59900D+02
17	30	0.00000D+00	-0.25773D+02	0.00000D+00	76	77	0.18597D+01	-0.61989D+01	0.18400D+01
17	31	0.17768D+01	-0.58591D+01	0.19950D+01	76	118	0.50800D+01	-0.16851D+02	0.67800D+02
17	113	0.92029D+01	-0.30440D+02	0.38400D+02	77	78	0.25929D+02	-0.73722D+02	0.63200D+02
18	19	0.43820D+01	-0.19288D+02	0.57100D+02	77	80	0.89267D+01	-0.27190D+02	0.35000D+01
19	20	0.17939D+01	-0.81681D+01	0.14900D+01	77	82	0.36501D+01	-0.10448D+02	0.40870D+01
19	34	0.11280D+01	-0.37051D+01	0.31600D+01	78	79	0.87914D+01	-0.39002D+02	0.32400D+02
20	21	0.24261D+01	-0.11256D+02	0.10800D+01	79	80	0.30003D+01	-0.13540D+02	0.93500D+02
21	22	0.12277D+01	-0.98519D+01	0.12300D+01	80	81	0.00000D+00	-0.27027D+02	0.00000D+00
22	23	0.12590D+01	-0.60114D+01	0.30200D+01	80	96	0.10313D+01	-0.52920D+01	0.22500D+01
23	24	0.51865D+01	-0.18902D+02	0.24900D+01	80	97	0.20929D+01	-0.10311D+02	0.17900D+01
23	25	0.23482D+01	-0.12042D+02	0.43200D+01	80	98	0.19460D+01	-0.88304D+01	0.14300D+01
23	32	0.22160D+01	-0.80635D+01	0.58650D+01	80	99	0.10203D+01	-0.46295D+01	0.27300D+01
24	70	0.12992D+01	-0.24301D+01	0.50990D+01	82	83	0.76070D+01	-0.24926D+02	0.18980D+01
24	72	0.11962D+01	-0.48042D+01	0.24400D+01	82	96	0.52744D+01	-0.17256D+02	0.27200D+01
25	26	0.00000D+00	-0.26178D+02	0.00000D+00	83	84	0.29301D+01	-0.61884D+01	0.12900D+01
25	27	0.11330D+01	-0.59100D+01	0.88200D+01	83	85	0.18103D+01	-0.62308D+01	0.17400D+01
26	30	0.10724D+01	-0.11528D+02	0.45400D+00	84	85	0.60149D+01	-0.12767D+02	0.61700D+02
27	28	0.24886D+01	-0.11140D+02	0.10800D+01	85	86	0.21401D+01	-0.75211D+01	0.13860D+01
27	32	0.36789D+01	-0.12129D+02	0.96300D+02	85	88	0.18512D+01	-0.94409D+01	0.13800D+01
27	115	0.28142D+01	-0.12855D+02	0.98600D+02	85	89	0.78360D+00	-0.56721D+01	0.25800D+01
28	29	0.23068D+01	-0.99744D+01	0.11900D+01	86	87	0.64589D+00	-0.47335D+01	0.22250D+01
29	31	0.89091D+01	-0.27305D+02	0.41500D+02	88	89	0.26413D+01	-0.13529D+02	0.96700D+02
29	38	0.15661D+01	-0.18385D+02	0.21100D+00	89	90	0.36283D+01	-0.14425D+02	0.79400D+01
31	32	0.28139D+01	-0.93010D+01	0.12550D+01	89	92	0.52257D+01	-0.25018D+02	0.48100D+01
32	113	0.13669D+01	-0.45120D+01	0.25900D+01	90	91	0.33272D+01	-0.10951D+02	0.10700D+01
32	114	0.34371D+01	-0.15582D+02	0.81400D+02	91	92	0.21892D+01	-0.71956D+01	0.16340D+01
33	37	0.18962D+01	-0.64881D+01	0.18300D+01	92	93	0.32838D+01	-0.10793D+02	0.10900D+01
34	36	0.10958D+01	-0.33756D+02	0.28400D+02	92	94	0.17634D+01	-0.57923D+01	0.20300D+01
34	37	0.27344D+02	-0.98823D+02	0.89200D+02	92	100	0.71034D+00	-0.32338D+01	0.23600D+01
34	43	0.13790D+01	-0.56109D+01	0.13100D+01	92	102	0.37515D+01	-0.17869D+02	0.73700D+02
36	0.20208D+02	-0.83683D+02	0.13400D+02	93	94	0.28048D+01	-0.12501D+02	0.62800D+01	
35	37	0.42435D+01	-0.19181D+02	0.65900D+02	94	95	0.64146D+01	-0.21090D+02	0.55500D+02
37	38	0.00000D+00	-0.26667D+02	0.00000D+00	94	96	0.32507D+01	-0.10501D+02	0.11500D+01
37	39	0.26169D+01	-0.86415D+01	0.13500D+01	94	100	0.48359D+01	-0.15757D+02	0.30200D+01
37	40	0.18683D+01	-0.52929D+01	0.21000D+01	95	96	0.32063D+01	-0.16654D+02	0.73700D+02
38	65	0.91809D+00	-0.10058D+02	0.52300D+00	96	97	0.21275D+01	-0.10884D+02	0.12000D+01
39	40	0.46014D+01	-0.15130D+02	0.77600D+02	98	100	0.11809D+01	-0.53247D+01	0.23800D+01
40	41	0.56159D+01	-0.18862D+02	0.61100D+02	99	100	0.23960D+01	-0.11723D+02	0.10800D+01
40	42	0.13177D+01	-0.90044D+01	0.23300D+01	100	101	0.16393D+01	-0.75597D+01	0.16400D+01
41	42	0.2059D+01	-0.67815D+01	0.17200D+01	100	103	0.53116D+01	-0.17298D+02	0.25800D+01
42	49	0.13083D+01	-0.59019D+01	0.80600D+01	100	104	0.10332D+01	-0.46733D+01	0.27050D+01
43	44	0.95122D+00	-0.38933D+01	0.30340D+01	100	106	0.10784D+01	-0.40819D+01	0.31000D+01
44	45	0.25879D+01	-0.10453D+02	0.11900D+01	101	102	0.18708D+01	-0.85177D+01	0.14700D+01
45	46	0.20013D+01	-0.67843D+01	0.16600D+01	103	104	0.17093D+01	-0.58103D+01	0.20350D+01
45	49	0.17416D+01	-0.47359D+01	0.22200D+01	103	105	0.18279D+01	-0.55520D+01	0.20400D+01
46	47	0.21624D+01	-0.72270D+01	0.15800D+01	103	110	0.11367D+01	-0.52706D+01	0.23000D+01
46	48	0.15280D+01	-0.48051D+01	0.23600D+01	104	105	0.64839D+01	-0.24757D+02	0.40300D+02
47	49	0.44720D+01	-0.14633D+02	0.80200D+02	105	106	0.43913D+01	-0.17158D+02	0.71700D+02
48	49	0.62355D+01	-0.17592D+02	0.62900D+02	105	107	0.14601D+01	-0.50416D+01	0.23600D+01
49	50	0.41929D+01	-0.11890D+02	0.93700D+02	105	108	0.46414D+01	-0.12502D+02	0.92300D+02
49	51	0.22949D+01	-0.6834D+01	0.17100D+01	106	107	0.14601D+01	-0.50416D+01	0.23600D+01
49	54	0.17610D+01	-0.64073D+01	0.73400D+01	108	109	0.11174D+02	-0.30648D+02	0.88000D+02
49	66	0.41137D+01	-0.20980D+02	0.24800D+01	109	110	0.42245D+01	-0.11582D+02	0.10100D+01
50	57	0.23462D+01	-0.66328D+01	0.16600D+01	110	111	0.35574D+01	-0.12208D+02	0.10000D+01
51	52	0.52461D+01	-0.15196D+02	0.69800D+02	110	112	0.52485D+01	-0.13599D+02	0.31000D+01
51	58	0.43815D+01	-0.12354D+02	0.89400D+02	114	115	0.20273D+02	-0.91670D+02	0.13800D+02
52	53	0.14274D+01	-0.57260D+01	0.20290D+01	-	-	-	-	-

REFERÊNCIAS

- [1] SCHWEPPE, F. Power system static-state estimation, part iii: Implementation. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, PAS-89, n. 1, p. 130–135, Jan 1970. ISSN 0018-9510.
- [2] CLEMENTS, K.; KRUMPHOLZ, G.; DAVIS, P. Power system state estimation residual analysis: an algorithm using network topology. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, IEEE, n. 4, p. 1779–1787, 1981.
- [3] MONTICELLI, A. J. *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1983.
- [4] ALBUQUERQUE, A. Estratégias em dois estágios para incorporar medidas fasoriais sincronizadas na estimação de estados em sistemas de potência. *Tese de Mestrado, UFSC*, Florianópolis, SC, 2012.
- [5] GJELSVIK, A.; AAM, S.; HOLTEN, L. Hachtel's augmented matrix method - a rapid method improving numerical stability in power system state estimation". *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. 6, No 2., p. 2987–2993, 1991.
- [6] DUFF, I. S.; REID, J. K. A comparison of some methods for the solution of sparse overdetermined systems of linear equations. *IMA Journal of Applied Mathematics*, IMA, v. 17, n. 3, p. 267–280, 1976.
- [7] SIMÕES-COSTA, A.; QUINTANA, V. An orthogonal row processing algorithm for power system sequential state estimation. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, IEEE, n. 8, p. 3791–3800, 1981.
- [8] MITCHELL, H. B. *Multi-sensor data fusion: an introduction*. [S.l.]: Springer, 2007.
- [9] ZHU, Y. *Multisensor decision and estimation fusion*. [S.l.]: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [10] BAR-SHALOM, Y.; CAMPO, L. The effect of the common process noise on the two-sensor fused-track covariance. *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on*, IEEE, n. 6, p. 803–805, 1986.

- [11] JARDINI, J. A. Sistemas digitais para automação da geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. *edição acadêmica*, 1996.
- [12] MYNAM, M. V.; HARIKRISHNA, A.; SINGH, V. Sincrofasores redefinindo os sistemas scada.
- [13] SCHWEPPE, F.; WILDES, J. Power system static-state estimation, part i: Exact model. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, PAS-89, n. 1, p. 120–125, Jan 1970. ISSN 0018-9510.
- [14] SANTOS, M.; DECKER, I.; AGOSTINI, M. Análise de oscilações eletromecânicas usando dados de medição fasorial sincronizada. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE*, 2008.
- [15] PHADKE, A. G.; THORP, J. S. *Synchronized phasor measurements and their applications*. [S.l.]: Springer, 2008.
- [16] LATHI, B. P. *Linear systems and signals*. [S.l.]: Oxford University Press, 2009.
- [17] PHADKE, A. Synchronized phasor measurements in power systems. *Computer Applications in Power, IEEE, IEEE*, v. 6, n. 2, p. 10–15, 1993.
- [18] DECKER, I. et al. Performance of a synchronized phasor measurements system in the brazilian power system. In: IEEE. *Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE*. [S.l.], 2006. p. 8–pp.
- [19] KARLSSON, D.; HEMMINGSSON, M.; LINDAHL, S. Wide area system monitoring and control-terminology, phenomena, and solution implementation strategies. *Power and Energy Magazine, IEEE, IEEE*, v. 2, n. 5, p. 68–76, 2004.
- [20] EHRENSPERGER, J. G. et al. Sistemas de medição fasorial sincronizada. Florianópolis, SC.
- [21] MARTIN, K. et al. Ieee standard for synchrophasors for power systems. *Power Delivery, IEEE Transactions on, IEEE*, v. 13, n. 1, p. 73–77, 1998.
- [22] IEEE-SA. *Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems IEEE Std C37.118.1-2011*.

- [23] IEEE SA. *Standard for Synchrophasor Data Transfer for Power Systems IEEE Std C37.118.2-2011*.
- [24] PHADKE, A. G. Synchronized phasor measurements—a historical overview. In: IEEE. *Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES*. [S.l.], 2002. v. 1, p. 476–479.
- [25] MILI, L.; PHANIRAJ, V.; ROUSSEUW, P. Least median of squares estimation in power systems. *Power Systems, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 6, n. 2, p. 511–523, 1991.
- [26] ABUR, A.; EXPOSITO, A. G. *Power system state estimation: theory and implementation*. [S.l.]: CRC Press, 2004.
- [27] MONTICELLI, A. *State estimation in electric power systems: a generalized approach*. [S.l.]: Springer, 1999.
- [28] MONTICELLI, A.; WU, F. F. Network observability: identification of observable islands and measurement placement. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, IEEE, n. 5, p. 1035–1041, 1985.
- [29] SIMÕES-COSTA, A.; ALBUQUERQUE, A.; BEZ, D. An estimation fusion method for including phasor measurements into power system real-time modeling. *Power Systems, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 1, p. PP(99), 2013.
- [30] LIU, J.; GEORGE, A. Computer solution of large sparse positive definite systems. *Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs. NJ*, v. 7632, p. 1981, 1981.
- [31] LOURENÇO, E. M. et al. A topology error identification method directly based on collinearity tests. *Power Systems, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 21, n. 4, p. 1920–1929, 2006.
- [32] QUINTANA, V.; SIMOES-COSTA, A.; MIER, M. Bad data detection and identification techniques using estimation orthogonal methods. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, IEEE, n. 9, p. 3356–3364, 1982.
- [33] SIMÕES-COSTA, A.; SALGADO, R.; QUINTANA, V. H. Técnicas de processamento de erros grosseiros para estimativa de estado seqüências ortogonais em sistemas de potência. *Anais do 4º Congresso Brasileiro de Automática*, 1982.

- [34] ZHOU, M. et al. An alternative for including phasor measurements in state estimators. *Power Systems, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 21, n. 4, p. 1930–1937, 2006.
- [35] PHADKE, A. et al. Recent developments in state estimation with phasor measurements. In: IEEE. *Power Systems Conference and Exposition, 2009. PSCE'09. IEEE/PES*. [S.l.], 2009. p. 1–7.
- [36] BALDWIN, T. et al. Power system observability with minimal phasor measurement placement. *Power Systems, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 8, n. 2, p. 707–715, 1993.
- [37] CHAKRABARTI, S. et al. A comparative study of the methods of inclusion of pmu current phasor measurements in a hybrid state estimator. In: IEEE. *Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE*. [S.l.], 2010. p. 1–7.
- [38] ZIVANOVIC, R.; CAIRNS, C. Implementation of pmu technology in state estimation: an overview. In: IEEE. *AFRICON, 1996, IEEE AFRICON 4th*. [S.l.], 1996. v. 2, p. 1006–1011.
- [39] VANFRETTI, L. et al. A phasor-data-based state estimator incorporating phase bias correction. *Power Systems, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 26, n. 1, p. 111–119, 2011.
- [40] YANG, T.; SUN, H.; BOSE, A. Two-level pmu-based linear state estimator. In: IEEE. *Power Systems Conference and Exposition, 2009. PSCE'09. IEEE/PES*. [S.l.], 2009. p. 1–6.
- [41] BI, T.; QIN, X.; YANG, Q. A novel hybrid state estimator for including synchronized phasor measurements. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, v. 78, n. 8, p. 1343–1352, 2008.
- [42] LEITES, R. A. C. Processamento de medidas fasoriais de tensão e corrente na estimação de estados em sistemas de potência. 2012.
- [43] BRUNO, C. et al. Possibility of enhancing classical weighted least squares state estimation with linear pmu measurements. In: IEEE. *PowerTech, 2009 IEEE Bucharest*. [S.l.], 2009. p. 1–6.
- [44] CHENG, Y.; HU, X.; GOU, B. A new state estimation using synchronized phasor measurements. In: IEEE. *Circuits and Systems, 2008. ISCAS 2008. IEEE International Symposium on*. [S.l.], 2008. p. 2817–2820.

- [45] BEZ, D. M. Estratégia em dois estágios utilizando rotações de givens em blocos para a inclusão de medidas fasoriais na estimação de estados em sistemas de potência. *Master's thesis, UFSC*, 2013.
- [46] ANTONY, R. T. *Principles of data fusion automation*. [S.l.]: Artech House, Inc., 1995.
- [47] LORA, F. A.; HEMERLY, E. M.; LAGES, W. F. Estimação em tempo real de posição e orientação de robôs móveis utilizando sensores com diferentes taxas de amostragem. In: *Anais do 3o Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*. [S.l.: s.n.], 1997.
- [48] LUO, R. C.; YIH, C.-C.; SU, K. L. Multisensor fusion and integration: approaches, applications, and future research directions. *Sensors Journal, IEEE, IEEE*, v. 2, n. 2, p. 107–119, 2002.
- [49] FACELI, K.; CARVALHO, A. C. D.; REZENDE, S. O. Combining intelligent techniques for sensor fusion. *Applied Intelligence*, Springer, v. 20, n. 3, p. 199–213, 2004.
- [50] KELLY, G. Data fusion: from primary metrology to process measurement. In: *IEEE. Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1999. IMTC/99. Proceedings of the 16th IEEE*. [S.l.], 1999. v. 3, p. 1325–1329.
- [51] BROOKS, R. R.; IYENGAR, S. S. *Multi-sensor fusion: fundamentals and applications with software*. [S.l.]: Prentice-Hall, Inc., 1998.
- [52] JOSHI, R.; SANDERSON, A. C. *Multisensor fusion: A minimal representation framework*. [S.l.]: World Scientific Publishing Company Incorporated, 1999.
- [53] PASIKA, H. *Neural Network Sensor Fusion Engines for Remote Sensing*. Tese (Doutorado) — PhD thesis, McMaster University, 1999, <http://soma.crl.mcmaster.ca/~pasika/pubs.html>, 1999.
- [54] LI, X. R. et al. Optimal linear estimation fusion. i. unified fusion rules. *Information Theory, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 49, n. 9, p. 2192–2208, 2003.
- [55] LI, X. R.; ZHANG, K. Optimal linear estimation fusion—part iv: Optimality and efficiency of distributed fusion. In: *Proc. 2001 International Conf. on Information Fusion*. [S.l.: s.n.], 2001.

-
- [56] ZHU, Y. *Multisensor decision and estimation fusion*. [S.l.]: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [57] KEMA. Metrics for determining the impact of phasor measurements on power system state estimation. *Eastern Interconnection Phasor Project*, March 2006.
- [58] GEROMEL, J.; PERES, P. Decentralised load-frequency control. In: IET. *IEE Proceedings D (Control Theory and Applications)*. [S.l.], 1985. v. 132, n. 5, p. 225–230.