

ESTIMADORES DE ESTADO EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA  
INCLUINDO RESTRIÇÕES FUZZY

Thales Terrola e Lopes

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS  
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE  
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS  
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA  
ELÉTRICA.

Aprovada por:

---

Prof. Djalma Mosqueira Falcão, Ph.D.

---

Prof. José Luiz Resende Pereira, Ph.D.

---

Prof. Alexandre Pinto Alves da Silva, Ph.D.

---

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

---

Prof. Eduardo Nobuhiro Asada, D.Sc.

RIO DE JANEIRO – BRASIL

JUNHO DE 2008

LOPES, THALES TERROLA E

Estimadores de Estado em Sistemas de  
Energia Elétrica Incluindo Restrições Fuzzy  
[Rio de Janeiro] 2008.

XXII, 276 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, D.Sc.,  
Engenharia Elétrica, 2008)

Tese – Universidade Federal do Rio de Ja-  
neiro, COPPE.

1. Estimadores de Estado
2. Programação Fuzzy
3. Pseudo-medidas
4. Erros grosseiros
5. Modelagem da rede elétrica externa
6. Sistemas de distribuição de eletricidade

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

À minha mãe, Ana Maria, e à minha esposa, Ana Caroline.

Aos demais familiares.

E, à memória do meu pai, Willian Fontes Lopes †.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Djalma a oportunidade, a grande sabedoria e a eficiência na orientação deste trabalho. Agradeço-lhe também a enorme paciência, e peço-lhe desculpas, caso não tenha atendido às suas expectativas em algum momento.

Aos professores do LASPOT, que contribuíram direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho de tese e aos demais professores e técnicos do Departamento de Engenharia Elétrica da UFRJ, que me deram a oportunidade de com eles trabalhar durante um ano e meio, contribuindo para a minha formação profissional e pessoal.

Aos amigos do LASPOT, agradeço o incentivo, o companheirismo e as discussões técnicas, vitais à conclusão deste trabalho. Agradeço, principalmente, aos amigos Waltencir, Jorge, Hélio e Fábio, pois sem eles muitas conquistas não seriam possíveis.

Aos amigos Marcelo, Rodrigão e Suzana pelas aventuras vividas entre Juiz de Fora e Rio de Janeiro, no primeiro ano do nosso curso de Doutorado.

Aos grandes amigos, Alysso e Jefferson, os três anos de convívio da melhor qualidade, que resultaram em laços eternos de forte amizade.

Ao CNPQ o suporte financeiro para elaboração deste trabalho de tese.

Agradeço, em particular, à minha mãe, que me incentivou desde os primeiros passos a acreditar no estudo e na minha formação profissional, apoiando-me sempre nesta trajetória. Estendo meus agradecimentos aos meus demais familiares, em especial, a minha tia Maria do Rosário, ao meu tio Inácio e ao senhor Nicolau Alves Fernandes, que também em muito contribuíram para minha formação profissional e pessoal; incentivando-me e acreditando que seria possível.

Por fim, agradeço a minha esposa, Ana Caroline, por seu carinho, seu apoio e compreensão na espera da efetivação de nosso compromisso, em parte, em função da elaboração deste trabalho.

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

ESTIMADORES DE ESTADO EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA  
INCLUINDO RESTRIÇÕES FUZZY

Thales Terrola e Lopes

Junho / 2008

Orientador: Djalma Mosqueira Falcão

Programa: Engenharia Elétrica

Neste trabalho, é proposta uma metodologia para a representação de informações qualitativas, de natureza imprecisa, no problema de estimação de estado em sistemas de energia elétrica. A representação da informação qualitativa é realizada empregando os conceitos de conjuntos Fuzzy, sendo modelada como pseudo-medidas Fuzzy, definidas por uma faixa de valores em um intervalo pré-definido. As pseudo-medidas Fuzzy são tratadas no problema de estimação de estado como restrições de desigualdade. Para a solução do problema de estimação de estado foram desenvolvidos estimadores baseados em programação Fuzzy. A principal aplicação da metodologia é o cálculo do vetor de estado em redes de distribuição e a representação de redes externas em sistemas de transmissão de energia elétrica, que são caracterizados por apresentarem uma fraca base de dados disponibilizada em tempo real, e um elevado grau de informações qualitativas. Outras vantagens dos modelos de estimadores de estado desenvolvidos neste trabalho, como robustez a uma grande variedade de erros grosseiros em medidas analógicas, ou a erros grosseiros na modelagem das pseudo-medidas Fuzzy, também são verificados.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

## POWER SYSTEM STATE ESTIMATION WITH FUZZY CONSTRAINTS

Thales Terrola e Lopes

June / 2008

Advisor: Djalma Mosqueira Falcão

Department: Electrical Engineering

This work presents a methodology for the representation of qualitative information, with high uncertainty content, in the problem of state estimation in electric power systems. The representation of the uncertainties is carried through using the concepts of Fuzzy sets, modeled as Fuzzy pseudo-measurements and set for a range of values in a pre-established way. The Fuzzy pseudo-measurements are represented in the problem of state estimation as inequality constraints, using state estimators models based on Fuzzy programming. The main application of the methodology is the calculation of the state vector in distribution feeders and modeling of external network in electricity transmission systems, characterized by a weak database in real time, and a great deal of qualitative information. Other advantages of state estimators' models, as robustness to a great variety of gross errors in analogical measures, or the gross errors in the modeling of the Fuzzy pseudo-measures, also are verified.

# ÍNDICE DO TEXTO

<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO</b> .....	1
1. 1 CARACTERIZAÇÃO DO TRABALHO .....	1
1. 2 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS DO TRABALHO .....	4
1. 3 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	8
<b>CAPÍTULO 2 – REVISÃO DO PROBLEMA DE ESTIMAÇÃO DE ESTADO EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA</b> .....	10
2. 1 ASPECTOS GERAIS DO PROBLEMA DE ESTIMAÇÃO DE ESTADO .....	10
2. 2 ETAPAS ASSOCIADAS AO PROCESSO DE ESTIMAÇÃO DE ESTADO .....	16
2.2.1 Cálculo do Vetor de Estado.....	18
2.2.1.1 Método dos Mínimos Quadrados Ponderados (MQP) .....	21
2.2.1.1.1 Revisão do Problema de Mínimos Quadrados Ponderados na Estimação de Estado em Sistemas de Energia Elétrica .....	22
2.2.1.1.2 Método das Equações Normais .....	26
2.2.1.2 Estimadores de Estado baseados no critério da Máxima Verossimilhança ....	28
2.2.1.2.1 Formulação de Estimadores de Estado pelo Critério de Máxima Verossimilhança .....	30
2.2.1.2.2 Estimadores de Estado baseados na Soma dos Valores Absolutos Ponderados dos Resíduos .....	33
2.2.2 Configurador da Topologia da Rede Elétrica.....	38
2.2.3 Análise de Observabilidade.....	40
2.2.3.1 Determinação do Plano de Medição.....	45
2.2.3.2 Medidas Críticas.....	47
2.2.4 Tratamento de Erros Grosseiros em Medidas .....	48
2.2.4.1 Método do Teste de Hipóteses baseado no Índice de Performance $J(x)$ .....	52
2.2.4.2 Método dos Maiores Resíduos Normalizados.....	53
2.2.4.3 Tratamento de Erros Topológicos .....	54
2.3 MODELAGEM DA REDE ELÉTRICA EXTERNA EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE ELETRICIDADE INTERCONECTADOS.....	57
2. 4 ESTIMAÇÃO DE ESTADO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	68

<b>CAPÍTULO 3 – REPRESENTAÇÃO DE RESTRIÇÕES FUZZY NO PROBLEMA DE ESTIMAÇÃO DE ESTADO</b> .....	78
3.1 INTRODUÇÃO .....	78
3.2 REPRESENTAÇÃO DE CONJUNTOS FUZZY NO PROBLEMA DE ESTIMAÇÃO DE ESTADO EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA .....	80
3.3 REPRESENTAÇÃO DE INFORMAÇÕES QUALITATIVAS POR CONJUNTOS FUZZY .....	85
3.4 ESTIMADORES DE ESTADO APLICANDO PROGRAMAÇÃO LINEAR FUZZY .....	88
3.4.1 Formulação Matemática do Estimadores de Estado Aplicando Programação Linear Fuzzy com Função Objetivo Simétrica .....	90
3.4.2 Formulação Matemática do Estimadores de Estado Aplicando Programação Linear Fuzzy com Função Objetivo Não - Simétrica .....	92
3.5 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO ESTIMADOR DE ESTADO APLICANDO PROGRAMAÇÃO QUADRÁTICA FUZZY COM FUNÇÃO OBJETIVO NÃO - SIMÉTRICA.....	95
3.6 REPRESENTAÇÃO DA FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA DE UMA PSEUDO-MEDIDA FUZZY NO PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO FUZZY .....	98
3.7 EXEMPLIFICAÇÃO DA METODOLOGIA.....	104
<b>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	116
4.1 INTRODUÇÃO .....	116
4.2 CONSIDERAÇÕES INICIAIS PARA AS SIMULAÇÕES .....	117
4.2.1. Construção do Conjunto de Medidas .....	120
4.2.2. Modelagem das Pseudo-medidas Fuzzy .....	121
4.2.3. Modelagem das Pseudo-medidas Crisp .....	125
4.2.4. Critérios para Avaliação do Resultado da Estimação de Estado.....	125
4.2.5. Sistemas de Teste .....	127
4.2.6. Preparação dos Casos Teste .....	128
4.3. RESULTADOS DOS CASOS TESTES.....	131
4.3.1. Representação de Pseudo-medidas Fuzzy .....	131
4.3.1.1. Representação de Pseudo-medidas Fuzzy Redundantes .....	133
4.3.1.2. Representação de Diferentes Pseudo-medidas Fuzzy Redundantes .....	137
4.3.1.3. Representação de Pseudo-medidas Fuzzy Críticas .....	142

4.3.2.	Avaliação dos Estimadores de Estado com Presença de Erros Grosseiros em Dados de Medição .....	147
4.3.2.1.	Erros Grosseiros Não Interativos e Não Conformativos .....	152
4.3.2.2.	Erros Grosseiros Interativos e Não Conformativos.....	158
4.3.2.3.	Falha na Aquisição de Dados .....	164
4.3.3.	Rede de Distribuição de Energia Elétrica .....	170
4.3.3.1.	Pseudo-medida Fuzzy sem presença de erro grosseiro .....	173
4.3.3.2.	Situação com a pseudo-medida Fuzzy com presença de erro grosseiro ...	176
4.3.3.3.	Pseudo-medida com presença de erro grosseiro e erro grosseiro em medidas analógicas .....	180
4.3.4.	Modelagem da Rede Elétrica Externa em Sistemas de Transmissão.....	185
4.3.4.1.	IEEE 14 Barras .....	186
4.3.4.2.	IEEE 30 Barras .....	192
4.3.4.2.1.	Configuração 1 .....	193
4.3.4.2.2.	Configuração 2 .....	199
4.3.4.3.	IEEE 118 Barras.....	205
<b>CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES.....</b>		<b>213</b>
5.1	CONCLUSÕES GERAIS .....	213
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	218
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>		<b>221</b>
<b>APÊNDICE A.....</b>		<b>242</b>
A.1	INTRODUÇÃO .....	242
A.2	OTIMIZAÇÃO FUZZY .....	244
A.3	PROGRAMAÇÃO LINEAR FUZZY .....	245
A.3.1	Programação Linear Fuzzy com Função Objetivo Simétrica.....	247
A.3.2	Programação Linear Fuzzy com Função Objetivo Não - Simétrica.....	250
A.4	PROGRAMAÇÃO QUADRÁTICA FUZZY COM FUNÇÃO OBJETIVO NÃO - SIMÉTRICA .....	252
<b>APÊNDICE B.....</b>		<b>255</b>
B.1	IEEE 14 BARRAS .....	255
B.2	IEEE 30 BARRAS .....	257
B.3	IEEE 118 BARRAS .....	260

B.4 REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE 33 BARRAMENTOS .....	270
APÊNDICE C.....	273
C.1 EXPRESSÕES GERAIS.....	273

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Etapas básicas do processo de estimação de estado. ....	17
Figura 2.2: Função objetivo modular. ....	35
Figura 2.3: Observabilidade em um sistema elétrico interconectado.....	41
Figura 2.4: Decomposição de uma rede elétrica em sistema interno e externo. ....	58
Figura 3.1: Rede elétrica com sistema de medição... ..	86
Figura 3.2: Funções de pertinência para as três informações qualitativas acima descritas. .....	87
Figura 3.3: Função de pertinência trapezoidal para uma grandeza Fuzzy. ....	100
Figura 3.4: Funções de pertinência resultantes do corte da Figura 3.3. ....	101
Figura 3.5: Função de pertinência triangular de uma grandeza Fuzzy hipotética.....	103
Figura 3.6: Sistema de 3 barras e 3 circuitos com conjunto de medições e pseudo-medida Fuzzy. ....	104
Figura 3.7: Função de pertinência para a pseudo-medida Fuzzy de fluxo de potência ativa entre as barras 2 e 3. ....	106
Figura 4.1: Funções de pertinência trapezoidal e triangular.....	123
Figura 4.2: Plano de medição do sistema teste IEEE 14 barras. ....	132
Figura 4.3: Representação de um par de Pseudo-medidas Fuzzy críticas de injeção de potência nas barras 10 e 11 do sistema IEEE14 barras. ....	143
Figura 4.4: Erros absolutos de estimação.....	147
Figura 4.5: Plano de medição e pseudo-medidas Fuzzy para o sistema IEEE 14 barras..... .....	148
Figura 4.6: Erros absolutos de estimação.....	151
Figura 4.7: Erros absolutos de estimação considerando a presença de erros grosseiros não interativos e não conformativos nas medidas.....	156
Figura 4.8: Erros absolutos de estimação considerando a presença de erros grosseiros interativos e não conformativos nas medidas.....	162
Figura 4.9: Erros absolutos de estimação considerando a presença de erros grosseiros do tipo falha no sistema de aquisição e transmissão de dados. ....	169
Figura 4.10: Plano de medição e pseudo-medidas Fuzzy para o sistema de distribuição de eletricidade de 33 barramentos.....	171
Figura 4.11: Estimativas dos ângulos e módulos das tensões nos barramentos.....	174

Figura 4.12: Erros absolutos por barramento para o sistema de distribuição de eletricidade de 33 barramentos. ....	175
Figura 4.13: Estimativas dos ângulos e módulos das tensões nos barramentos.....	178
Figura 4.14: Erros absolutos por barramento para o sistema de distribuição de eletricidade de 33 barramentos. ....	179
Figura 4.15: Estimativas dos ângulos e módulos das tensões nos barramentos.....	182
Figura 4.16: Erros absolutos por barramento para o sistema de distribuição de eletricidade. ....	183
Figura 4.17: Erros absolutos: Divisão do sistema teste IEEE 14 barras em rede interna e rede externa, com o plano de medição e pseudo-medidas Fuzzy associadas.....	187
Figura 4.18: Estimativas dos ângulos e módulos das tensões nos barramentos do sistema IEEE14 barras particionado em rede interna e rede externa. ....	189
Figura 4.19: Erros absolutos por barramento para o sistema IEEE 14 barras particionado em rede interna e rede externa.....	191
Figura 4.20: Divisão do sistema teste IEEE 30 barras - configuração 1, em rede interna e rede externa, com o plano de medição e pseudo-medidas Fuzzy associadas.....	194
Figura 4.21: Estimativas dos ângulos e magnitudes das tensões nos barramentos para o sistema IEEE 30 barras – configuração 1, dividido em rede interna e rede externa... ..	196
Figura 4.22: Erros absolutos por barramento para o sistema IEEE 30 barras – configuração 1, particionado em rede interna e rede externa.....	198
Figura 4.23: Divisão do sistema teste IEEE 30 barras - configuração 2, em rede interna e duas redes externas, com o plano de medição e pseudo-medidas Fuzzy associadas. ....	200
Figura 4.24: Estimativas dos ângulos e magnitudes das tensões nos barramentos para o sistema IEEE 30 barras – configuração 2, dividido em rede interna e duas redes externas.....	202
Figura 4.25: Erros absolutos por barramento para o sistema IEEE 30 barras – configuração 2, particionado em rede interna e duas redes externas. ....	204
Figura 4.26: Divisão do sistema teste IEEE 118 barras, em rede interna e duas redes externas, com o plano de medição e pseudo-medidas Fuzzy associadas .....	206
Figura 4.27: Estimativas dos ângulos e magnitudes das tensões nos barramentos para o sistema IEEE 118 barras. ....	210
Figura A.1: Representação Fuzzy para uma pessoa alta. ....	243

Figura A.2: Formatos típicos de funções de pertinência.....	243
Figura A.3: Função de pertinência para uma grandeza Fuzzy qualquer. ....	249

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1: Funções resíduos de medição. ....	31
Tabela 3.1: Parâmetros do sistema de 3 barras e 3 circuitos. ....	105
Tabela 3.2: Conjunto de medidas. ....	106
Tabela 3.3: Convergência do problema de programação Fuzzy não linear. ....	114
Tabela 3.4: Valores estimados e resíduos de estimação para as medidas do sistema. ..	114
Tabela 4.1: Valores dos vértices da função de pertinência da pseudo-medida Fuzzy. .	133
Tabela 4.2: Resultado do cálculo do vetor de estado. ....	134
Tabela 4.3: Erros de estimação. ....	135
Tabela 4.4: Resultado do cálculo do vetor de estado. ....	135
Tabela 4.5: Erros de estimação. ....	136
Tabela 4.6: Convergência dos estimadores de estado. ....	136
Tabela 4.7: Valores dos vértices das funções de pertinência das pseudo-medidas Fuzzy. .....	137
Tabela 4.8: Resultado do cálculo do vetor de estado. ....	138
Tabela 4.9: Erros de estimação. ....	139
Tabela 4.10: Resultado do cálculo do vetor de estado. ....	139
Tabela 4.11: Erros de estimação. ....	140
Tabela 4.12: Convergência dos estimadores de estado. ....	141
Tabela 4.13: Convergência do último problema de programação dos estimadores Fuzzy. .....	141
Tabela 4.14: Resultado do pós-processamento para o estimador de estado MQP. ....	141
Tabela 4.15: Erros de estimação para o estimador de estado MQP. ....	142
Tabela 4.16: Valores dos vértices das funções de pertinência das pseudo-medidas Fuzzy. .....	143
Tabela 4.17: Resultado do cálculo do vetor de estado. ....	144
Tabela 4.18: Resultado do cálculo do vetor de estado. ....	145
Tabela 4.19: Erros médio quadráticos de estimação. ....	146
Tabela 4.20: Valores dos vértices das funções de pertinência das pseudo-medidas Fuzzy. .....	149
Tabela 4.21: Resultado do cálculo do vetor de estado. ....	150
Tabela 4.22: Erros médio quadráticos de estimação. ....	151
Tabela 4.23: Medidas com erros grosseiros não conformativos e não interativos. ....	152

Tabela 4.24: Resultado do cálculo do vetor de estado para os estimadores PLFS, PLFNS, PQF considerando erros grosseiros não interativos e não conformativos.....	153
Tabela 4.25: Resultado do cálculo do vetor de estado para os estimadores MQP e VAPR considerando erros grosseiros não interativos e não conformativos. ....	153
Tabela 4.26: Erros médios quadráticos de estimação considerando a presença de erros grosseiros não interativos e não conformativos nas medidas.....	154
Tabela 4.27: Resultado do pós-processamento para o estimador MQP considerando a presença de erros grosseiros não interativos e não conformativos nas medidas...	157
Tabela 4.28: Erros médio quadrático para o estimador de estado MQP pós-processado... ..	157
Tabela 4.29: Medidas com presença de erros grosseiros não conformativos e interativos. ....	158
Tabela 4.30: Resultado do cálculo do vetor de estado para os estimadores PLFS, PLFNS, PQF considerando erros grosseiros interativos e não conformativos. ....	159
Tabela 4.31: Resultado do cálculo do vetor de estado para os estimadores MQP e VAPR considerando erros grosseiros interativos e não conformativos. ....	159
Tabela 4.32: Erros médios quadráticos de estimação considerando a presença de erros grosseiros interativos e não conformativos nas medidas. ....	160
Tabela 4.33: Convergência dos estimadores de estado. ....	163
Tabela 4.34: Resultado do pós-processamento para o estimador MQP considerando a presença de erros grosseiros interativos e não conformativos nas medidas.....	164
Tabela 4.35: Erros médio quadrático para o estimador de estado MQP pós-processado. ....	164
Tabela 4.36: Convergência dos estimadores de estado. ....	165
Tabela 4.37: Resultado do cálculo do vetor de estado para os estimadores PLFS, PLFNS, PQF considerando erros grosseiros por falha no sistema de aquisição de dados..	166
Tabela 4.38: Resultado do cálculo do vetor de estado para os estimadores MQP e VAPR considerando erros grosseiros por falha no sistema de aquisição de dados. ....	166
Tabela 4.39: Erros de estimação médio quadrático e absoluto considerando a presença de erros grosseiros do tipo falha no sistema de aquisição e transmissão de dados....	167
Tabela 4.40: Convergência dos estimadores de estado. ....	170
Tabela 4.41: Valores dos intervalos da função de pertinência da pseudo-medida Fuzzy... ..	173
Tabela 4.42: Erros de estimação. ....	175

Tabela 4.43: Convergência dos estimadores de estado.....	176
Tabela 4.44: Pseudo-medidas Fuzzy com adição de erros grosseiros ao valor central da sua função de pertinência. ....	177
Tabela 4.45: Erros de estimação. ....	179
Tabela 4.46: Convergência dos estimadores de estado.....	180
Tabela 4.47: Medidas com presença de erros grosseiros para o sistema de distribuição de 33 barramentos. ....	181
Tabela 4.48: Erros de estimação. ....	183
Tabela 4.49: Medidas com presença de erros grosseiros para o sistema de distribuição de 33 barramentos. ....	184
Tabela 4.50: Convergência dos estimadores de estado.....	184
Tabela 4.51: Valores dos vértices das funções de pertinência das pseudo-medidas Fuzzy. .....	188
Tabela 4.52: Erros de estimação para o sistema IEEE 14 barras particionado em rede interna e rede externa. ....	190
Tabela 4.53: Convergência dos estimadores de estado.....	192
Tabela 4.54: Pseudo-medidas Fuzzy com adição de erros grosseiros ao valor central da sua função de pertinência para o sistema IEEE30 barras – configuração 1. ....	195
Tabela 4.55: Erros de estimação para o sistema IEEE 30 barras – configuração 1, particionado em rede interna e rede externa.....	197
Tabela 4.56: Convergência dos estimadores de estado.....	199
Tabela 4.57: Pseudo-medidas Fuzzy com adição de erros grosseiros ao valor central da sua função de pertinência para o sistema IEEE30 barras – configuração 2. ....	201
Tabela 4.58: Erros de estimação para o sistema IEEE 30 barras - configuração 2, particionado em rede interna e duas redes externas. ....	203
Tabela 4.59: Convergência dos estimadores de estado.....	205
Tabela 4.60: Valor do desvio padrão adicionado ao valor central de cada pseudo-medidas Fuzzy representada no sistema IEEE118 barras.....	207
Tabela 4.61: Pseudo-medidas Fuzzy com adição de erros grosseiros ao valor central da sua função de pertinência para o sistema IEEE118 barras.....	208
Tabela 4.62: Erros de estimação para a rede externa 1 do sistema IEEE 118 barras....	211
Tabela 4.63: Erros de estimação para a rede externa 2 do sistema IEEE 118 barras....	211
Tabela 4.64: Convergência dos estimadores de estado.....	212
Tabela B.1: Dados de barra, geração e carregamento para o sistema IEEE 14 barras..	255

Tabela B.2: Dados de linha e fluxos de potência para o sistema IEEE 14 barras.....	256
Tabela B.3: Dados de barra, geração e carregamento para o sistema IEEE 30 barras..	257
Tabela B.4: Dados de linha e fluxos de potência para o sistema IEEE 30 barras.....	258
Tabela B.5: Dados de barra, geração e carregamento para o sistema IEEE 118 barras.	260
Tabela B.6: Dados de linha e fluxos de potência para o sistema IEEE 118 barras.....	263
Tabela B.7: Dados dos circuitos, em p.u., e fluxo de potência, em kW/kvar, para a rede de distribuição de 33 barramentos. ....	270
Tabela B.8: Dados de barra, carregamento e injeção na rede de distribuição de 33 barramentos. ....	271

## SIMBOLOGIA

$z$  – Vetor de medidas analógicas.

$\tilde{z}$  – Vetor de medidas analógicas com adição de ruído.

$x$  – Vetor das variáveis de estado.

$V_i$  – Valor da magnitudes de tensão na barra  $i$ .

$\theta_i$  - Valor do ângulo de tensão na barra  $i$ .

$h(x)$  – Vetor das funções não lineares que representa o modelo matemático das medidas analógicas (medidas reais).

$e$  – Vetor do erro das medidas analógicas.

$\mathcal{G}$  - Ruído aleatório adicionado a uma medida.

$nb$  – Número de barramentos do sistema.

$nm$  – Número de medidas;

$R$  – Matriz de covariância do erro das medidas analógicas.

$Q$  – Matriz de ponderações do inverso das covariâncias do erro das medidas analógicas.

$W_i$  – Inverso da covariância do erro de medição  $i$ .

$\sigma_i$  – Desvio padrão da medida analógica  $i$ .

$J(x)$  – Função objetivo do problema de estimação de estado.

$r$  – Vetor resíduo de estimação.

$s$  - Vetor resíduo de estimação.

$\Delta z$  – Vetor do resíduo de estimação no problema de estimação dos Mínimos Valores Absolutos Ponderados dos Resíduos.

$g(x)$  – Restrição operativa de igualdade para o problema de Mínimos quadrados Ponderados.

$c(x)$  – Restrição operativa de desigualdade para o problema de Mínimos quadrados Ponderados.

$H$  – Matriz Jacobiana das medidas analógicas.

$G$  – Matriz de Ganho do problema de Mínimos quadrados Ponderados.

$mg$  – Número de medidas analógicas com erro grosseiro.

$b^{mg}$  – Desvio máximo do estado do sistema com  $mg$  medidas com erro grosseiro.

$\rho$  – Função objetivo para estimadores de estado baseado no critério de máxima verossimilhança.

$a$  - Ponto de quebra a partir do qual a função objetivo para um estimador de estado baseado no critério de máxima verossimilhança deixa de ser quadrática.

$\zeta_i$  – Valor de satisfação da função objetivo.

$\ell$  - Variável de folga não negativa.

$k$  – Variável de folga não negativa.

$u$  - Variável de folga não negativa à direita para o problema de estimação dos Mínimos Valores Absolutos Ponderados dos Resíduos.

$v$  - variável de folga não negativa à esquerda para o problema de estimação dos Mínimos Valores Absolutos Ponderados dos Resíduos.

$x^u$  – Vetor das variáveis de estado à direita para o problema de estimação dos Mínimos Valores Absolutos Ponderados dos Resíduos.

$x^v$  - Vetor das variáveis de estado à esquerda para o problema de estimação dos Mínimos Valores Absolutos Ponderados dos Resíduos.

$c^T$  – Vetor transposto de ponderações do inverso das covariâncias dos erros de medição.

$\Omega$  - Matriz de covariância dos resíduos de estimação.

$\chi^2$  - Distribuição Qui-Quadrado.

$r_N$  - Vetor do resíduo de estimação normalizado.

$\gamma$  - Valor limite do resíduo normalizado para o teste de detecção de erros grosseiros.

$\lambda$  - Variável adicional inserida ao problema de estimação de estado considerando restrições Fuzzy.

$\gamma$  - Valor de pertinência da função de pertinência da pseudo-medida Fuzzy.

$\mu_i$  - Função de pertinência de uma pseudo-medida Fuzzy  $i$ .

$\mu_G$  - Função de pertinência da função objetivo de um problema de estimação de estado convencional.

$f(x)$  - Vetor das funções não lineares que representa o modelo matemático das pseudo-medidas Fuzzy.

$z_{Fuzzy}$  - Valor da pseudo-medida Fuzzy definido de acordo com o intervalo de pertinência.

$F$  - Matriz Jacobiana das pseudo-medidas Fuzzy.

$B$  - Vetor do conjunto de restrições de desigualdade no problema de estimação de estado considerando restrições Fuzzy.

$d$  - Valor central da função de pertinência da pseudo-medida Fuzzy.

$p$  - Valor do incremento aplicado à restrição de desigualdade no problema de estimação de estado considerando restrições Fuzzy ou a função de pertinência.

$f_{ob}$  - Valor convergido para a função objetivo de um problema de estimação de estado.

$p_{fob}$  - Valor do incremento aplicado ao valor convergido da função objetivo de um problema de estimação de estado.

$M$  - Matriz do conjunto de equações linearizadas das grandezas submetidas a restrições de desigualdade.

$S$  - Matriz de sensibilidade dos resíduos de estimação.

$I$  - Matriz de Identidade.

$EA_{Vi}$  - Erro absoluto do estado estimado em relação ao estado verdadeiro para o módulo da tensão na barra  $i$ , em porcentagem;

$EA_{\Theta i}$  - Erro absoluto do estado estimado em relação ao estado verdadeiro para o ângulo da tensão na barra  $i$ , em porcentagem;

$EMQ_V$  - Erro médio quadrático do estado estimado em relação ao estado verdadeiro para o módulo das tensões no sistema, em porcentagem;

$EMQ_{\Theta}$  - Erro médio quadrático do estado estimado em relação ao estado verdadeiro para o ângulo das tensões sistema, em porcentagem;

$EA_{P_i}$  - Erro absoluto entre o valor calculado a partir do estado estimado e o valor calculado a partir do estado verdadeiro, para a injeção de potência ativa na barra  $i$ , em porcentagem;

$EA_{Q_i}$  - Erro absoluto entre o valor calculado a partir do estado estimado e o valor calculado a partir do estado verdadeiro, para a injeção de potência reativa na barra  $i$ , em porcentagem;

$EMQ_P$  - Erro médio quadrático entre o valor calculado a partir do estado estimado e o valor calculado a partir do estado verdadeiro, para as injeções de potência ativa nas barras do sistema, em porcentagem;

$EMQ_Q$  - Erro médio quadrático entre o valor calculado a partir do estado estimado e o valor calculado a partir do estado verdadeiro, para as injeções de potência reativa nas barras do sistema, em porcentagem;

$EA_{P_{f_{ij}}}$  - Erro absoluto entre o valor calculado a partir do estado estimado e o valor calculado a partir do estado verdadeiro, para o fluxo de potência ativa entre as barra  $i$  e  $j$ , em porcentagem;

$EA_{Q_{f_{ij}}}$  - Erro absoluto entre o valor calculado a partir do estado estimado e o valor calculado a partir do estado verdadeiro, para o fluxo de potência reativa entre as barra  $i$  e  $j$ , em porcentagem;

$EMQ_{Pf}$  - Erro médio quadrático entre o valor calculado a partir do estado estimado e o valor calculado a partir do estado verdadeiro, para os fluxos de potência ativa entre as barras  $i$  e  $j$  do sistema, em porcentagem;

$EMQ_{Qf}$  - Erro médio quadrático entre o valor calculado a partir do estado estimado e o valor calculado a partir do estado verdadeiro, para os fluxos de potência reativa entre as barras  $i$  e  $j$  do sistema, em porcentagem;

---

---

# CAPÍTULO 1

---

## INTRODUÇÃO

---

---

### 1.1 CARACTERIZAÇÃO DO TRABALHO

Nas últimas décadas, os sistemas elétricos de potência (SEP) estão experimentando mudanças substanciais em sua organização, regulação e no aspecto tecnológico empregado para sua operação. Estas mudanças estão fortemente relacionadas à criação de um novo modelo para regulação do setor elétrico, tornando-o mais complexo e, tecnologicamente, dependente. A crescente complexidade, em grande parte, associa-se a diversos fatores, tais como: à escassez de recursos aplicados no setor elétrico, às restrições ambientais, à crescente demanda por alta confiabilidade e qualidade da energia e, em vários países, à introdução de um ambiente de competição entre os diversos agentes, esta aliada a uma interligação cada vez mais acentuada entre os sistemas elétricos de um mesmo país, ou entre países vizinhos.

O surgimento de novas oportunidades de negócio no setor elétrico, paralelo ao aumento dos riscos operacionais, estão sendo balanceados pela ênfase dada à qualidade dos serviços prestados, exigindo do prestador de serviços monitoramento e controle, não somente das redes de transmissão de energia elétrica, mas também das redes de distribuição de eletricidade.

Os crescentes incentivos verificados em alguns países, para instalação de plantas de geração distribuída, através de fontes renováveis de energia, proporcionou o surgimento de

um elevado número de plantas de geração de eletricidade nas redes de distribuição. Desta forma, como o verificado nos sistemas de transmissão de energia elétrica, este crescente número de plantas de geração de eletricidade nas redes de distribuição, tradicionalmente caracterizadas por um baixo nível de automatização; requer um sistema de monitoração eficiente e preciso, que atenda aos interesses econômicos das concessionárias de distribuição de eletricidade. Desta forma, as mesmas se sentem obrigadas a investir na automação e na instalação da primeira geração de sistemas SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) em suas redes.

O sistema SCADA permite aos operadores ter uma visão gráfica da rede elétrica em tempo real, visualizando as medições de grandezas elétricas avaliáveis. Através das informações fornecidas pelo sistema SCADA, ações de controle em tempo real, podem ser processadas pelos Centros de Operação do Sistema (COS), como chaveamento de aparelhos, atuação em transformadores, ou modificação do valor de *setpoints* de geradores. As informações do sistema SCADA também constituem a base de dados para as ferramentas computacionais de avaliação da segurança operativa do sistema, como programas de fluxo de potência, análise de contingências, configuradores de redes e estimadores de estado.

De acordo com a novas exigências dos sistemas de energia elétrica, as ferramentas computacionais para avaliação da segurança do sistema têm requerido a construção de modelos matemáticos cada vez mais precisos e, em muitas situações complexos. Um desafio, frequentemente encontrado na construção de modelos para tais sistemas, é a fraca base de dados disponibilizada em tempo real, muitas vezes, incompleta ou insuficiente, impedindo que modelos matemáticos precisos, ou pelo menos coerentes com a realidade de operação, possam ser construídos para modelagem em estimadores de estado, fluxos de potência, configuradores topológicos de rede, dentre outros. Contudo, existe uma enorme

disponibilidade de informações qualitativas, representadas pela experiência de operação acumulada ao longo dos anos pelo pessoal técnico e informações resultantes de estudos e pesquisas, que se bem aproveitadas e trabalhadas, possibilitariam a construção de modelos matemáticos mais verídicos para representação do estado de operação. Tal situação têm se verificado em redes de distribuição e nas redes elétricas externas em sistemas de transmissão de eletricidade. Mesmo que estes modelos não venham representar com exatidão as condições de operação, já forneceriam uma estimativa aproximada das mesmas, representando um ganho operacional, pois se parte do princípio que as condições de operação, em muitos casos, são quase totalmente desconhecidas.

Dentre todas as ferramentas computacionais para avaliação da segurança de operação do sistema elétrico, o programa de Análise de Redes, é o mais amplamente empregado. Porém, para utilização deste programa faz-se necessária a construção de um modelo para a rede elétrica, através do Configurador de Redes, e a conseqüente determinação do seu estado operacional (tensões complexas nas barras), por meio do Estimador de Estado.

A integração de avaliação subjetiva, caracterizada por informações oriundas da experiência acumulada pelo pessoal técnico, ou informações resultantes de estudos e pesquisas, não é uma singularidade em Estimadores de Estado; uma vez que pseudo-medidas, utilizadas na solução de problemas de observabilidade da rede elétrica a partir da configuração de medidores, podem ser construídas a partir do conhecimento destas informações. Devido a esta característica, a adoção de modelos híbridos para a estimação de estado em sistemas elétricos de potência, que combinam aproximações tradicionais com técnicas emergentes, pode possibilitar que redes de distribuição de energia elétrica ou redes elétricas externas em sistemas de transmissão possam ser mais adequadamente representadas, possibilitando que as funções de monitoração e segurança sejam completamente implementadas para estes casos.

Dentre as técnicas emergentes, caracterizadas por modelos inteligentes, podem-se destacar os conjuntos de natureza Fuzzy, as redes neurais artificiais e os algoritmos genéticos. Os conjuntos de natureza Fuzzy são frequentemente utilizados na solução de problemas com presença de informações de caráter qualitativo, caracterizadas por variáveis lingüísticas que reproduzem o conhecimento humano ou imprecisões sobre o problema de interesse, possibilitando assim, a construção de modelos para situações em que a formulação matemática tradicional não é suficiente. As redes neurais artificiais reproduzem, matematicamente, o funcionamento do neurônio humano e estão sendo aplicadas na solução de problemas de classificação, previsão e reconhecimento de padrões, enquanto os algoritmos genéticos têm sido aplicados na solução de problemas de otimização, envolvendo um ou vários objetivos no problema.

No contexto da construção de modelos híbridos de ferramentas para avaliação da segurança do sistema elétrico, e mais especificamente, para utilização em estimadores de estado, com aplicação em redes de distribuição de energia elétrica e redes elétricas externas em sistemas de transmissão, a aplicação da teoria dos conjuntos de natureza Fuzzy mostra-se adequada. Assim, é de todo interesse o desenvolvimento de um estimador de estado em um ambiente Fuzzy, para aplicações em tempo real, que integre as aproximações tradicionais de estimação de estado, com a representação que os conjuntos de natureza Fuzzy permitem para as informações qualitativas presentes nestas redes elétricas. Nesta modelagem de estimador de estado, sistemas elétricos dotados com baixo nível de monitoração, mas com alto grau de informação qualitativa, podem ser modelados e avaliados nos quesitos de segurança da operação de seu sistema.

## **1.2 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS DO TRABALHO**

Atualmente, verifica-se, para as redes de distribuição de energia elétrica e para as redes elétricas externas em sistemas de transmissão, uma elevada disponibilidade de

informações qualitativas, além de muitas imprecisões sobre as suas condições operacionais. Paralelamente, verifica-se um quase total desconhecimento das condições de operação destas redes em tempo real, o que dificulta o emprego de ferramentas para avaliação da segurança operacional das mesmas. Nas redes de distribuição de energia elétrica tem-se, geralmente, um nível de monitoramento muito baixo, com elevada insuficiência de pontos de medição em tempo real ao longo dos seus alimentadores. As redes elétricas externas, em sistemas de transmissão de eletricidade, apresentam-se bem monitoradas em relação ao seu centro de operação, contudo não disponibilizam os valores monitorados em tempo real para os centros de operação de sistemas elétricos vizinhos.

Dentro deste contexto, e uma vez que os Estimadores de Estado representam uma ferramenta de vital importância na análise da segurança operacional em sistemas elétricos de potência, e permitem a integração de informações subjetivas ao seu modelo; motivou-se, assim, o desenvolvimento de novos modelos matemáticos para a estimação de estado, com capacidade de representação de informações qualitativas e, principalmente, de suas imprecisões. Estes novos modelos matemáticos para estimação de estado são um aprimoramento dos modelos tradicionalmente utilizados, possuindo, dentre outras características, a capacidade de aliar a robustez e eficácia dos modelos tradicionais, com a capacidade de representação de informações subjetivas e imprecisões, possibilitando uma descrição mais rica do problema, além de impedirem que informações úteis, não sejam perdidas ou desprezadas.

A representação da informação qualitativa e das imprecisões acerca das mesmas e dos dados disponibilizados para estimação de estado é realizada empregando os conceitos de conjuntos de natureza Fuzzy, sendo modeladas como pseudo-medidas Fuzzy, que agora não são mais definidas por um único valor, mas sim por uma faixa de valores em um intervalo pré-definido, caracterizando toda imprecisão existente nas informações utilizadas

para modelagem das pseudo-medidas. As pseudo-medidas Fuzzy são inseridas no problema de estimação de estado como restrições de desigualdade, com aplicação da técnica de programação em um ambiente Fuzzy, para a modelagem do estimador de estado. A expressão Crisp será empregada para representar as grandezas não modeladas por conjuntos Fuzzy. A grande vantagem da modelagem da pseudo-medida, como Fuzzy, e não como Crisp, é a melhor representação da incerteza inerente à informação qualitativa, utilizada para sua modelagem, que os conjuntos Fuzzy possibilitam. Toda a imprecisão e pertinência da informação esta modelada na função de pertinência característica, através da faixa de valores em torno do valor central.

Neste trabalho de tese, são propostos estimadores de estado lineares e não-lineares em um ambiente Fuzzy, para o cálculo do vetor de estado do sistema, com as pseudo-medidas Fuzzy representadas por restrições de desigualdade ao problema. Os modelos de estimação de estado lineares, em ambiente Fuzzy, são construídos em função da modelagem do estimador de estado baseado na soma dos Mínimos Valores Absolutos Ponderados dos Resíduos (ABUR, 2004). O modelo do estimador de estado não-linear Fuzzy tem, como propósito, inserir nos tradicionais e amplamente empregados estimadores de estado, baseados no método dos Mínimos Quadrados Ponderados, a representação de imprecisões modeladas por conjuntos Fuzzy.

O principal objetivo dos estimadores de estado, considerando restrições Fuzzy, é o cálculo do vetor de estado em redes de distribuição de eletricidade e em redes elétricas externas em sistemas de transmissão de energia elétrica. A robustez, ou capacidade de rejeição à presença de uma grande variedade de erros grosseiros em medidas analógicas, ou mesmo na definição das próprias pseudo-medidas Fuzzy, representam outras características fundamentais exploradas nos modelos de estimadores de estado propostos.

Os modelos de estimadores de estado propostos mostraram-se robustos a uma grande variedade de erros grosseiros em medidas analógicas, tanto que não se considerou a aplicação de nenhuma ferramenta de pós-processamento aos mesmos. A capacidade de rejeição a uma grande variedade de erros grosseiros em medidas analógicas, procura preservar as vantagens verificadas nos estimadores de estado, baseados na soma dos Mínimos Valores Absolutos Ponderados dos Resíduos (ABUR, 2004).

A rejeição a erros grosseiros na definição das pseudo-medidas Fuzzy é um ponto de destaque nos estimadores de estado, considerando restrições Fuzzy, uma vez que estes tem a capacidade de tratar uma informação incoerente, levantada a partir de uma informação qualitativa e utilizada para modelar a pseudo-medida Fuzzy, impedindo que a mesma deteriore o estado estimado para o sistema. Deve-se destacar, que quanto mais precisa for a informação qualitativa disponível, mais concisa com a realidade será a modelagem da pseudo-medida Fuzzy, resultando em uma estimação de estado mais confiável e próxima da realidade. Neste trabalho, a modelagem das pseudo-medidas Fuzzy tem caráter subjetivo, uma vez que o propósito é avaliar os modelos de estimadores de estado, considerando restrições Fuzzy, no cálculo do vetor de estado e no atendimento a características como a robustez.

Outras características, como a representação de pseudo-medidas Fuzzy como críticas e/ou redundantes, também são exploradas. A representação das pseudo-medidas Fuzzy, como críticas, possibilita a solução dos problemas de observabilidade verificados em redes de distribuição de eletricidade e na rede externa em sistemas de transmissão. As pseudo-medidas Fuzzy, representadas como críticas, são, nesta situação, dotadas de incertezas, ao contrário das medidas críticas, que por natureza devem ser precisas.

Vale ressaltar, que o ponto fundamental deste trabalho de tese está na obtenção de uma solução aceitável para o estado estimado para a rede de distribuição de eletricidade e

para a rede elétrica externa em um sistema de transmissão, uma vez que o estado operacional destas redes é desconhecido e sem referência de comparação. A determinação destas estimativas aceitáveis está associada à escolha e representação das informações qualitativas.

### **1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO**

O trabalho é dividido em cinco capítulos e três apêndices. No segundo capítulo é abordado o problema de estimação de estado em sistemas elétricos de potência, sendo realizada uma revisão bibliográfica de todas as etapas envolvidas no problema, destacando-se o cálculo do vetor de estado, análise topológica do sistema elétrico e seleção do vetor de medidas, observabilidade do sistema elétrico e detecção e identificação de medidas portadoras de erros grosseiros. Uma discussão sobre o processo de estimação de estado em redes de distribuição de energia elétrica e o problema da modelagem da rede externa em sistemas de transmissão de eletricidade, também são apresentados em tópicos específicos neste capítulo.

No terceiro capítulo é apresentada a metodologia desenvolvida, neste trabalho, para a representação de informações qualitativas em um problema de estimação de estado em sistemas elétricos, através do emprego dos conjuntos Fuzzy. Inicialmente é realizada uma revisão bibliográfica dos trabalhos que abordam o problema da aplicação de técnicas inteligentes em sistemas elétricos, com maior destaque para os trabalhos que consideram a utilização de conjuntos Fuzzy no problema de estimação de estado. Todos os modelos matemáticos desenvolvidos para a representação de restrições Fuzzy no problema de estimação de estado são apresentados em seqüência. No final do capítulo, é descrito um exemplo de caráter didático, para auxiliar futuros leitores na implementação dos estimadores de estado propostos neste trabalho.

Os resultados obtidos pela avaliação dos estimadores de estado considerando restrições Fuzzy são apresentados no Capítulo 4. Os resultados alcançados são comparados com aqueles fornecidos pelo fluxo de potência e estimadores de estado convencionais. O conjunto de simulações tem o propósito de ilustrar a modelagem de informações qualitativas por meio de conjuntos Fuzzy no problema de estimação de estado, e o cálculo do vetor de estado em uma rede de distribuição de eletricidade e no problema de modelagem da rede elétrica externa em sistemas de transmissão de eletricidade. As simulações também avaliam a robustez dos modelos de estimadores de estado desenvolvidos, frente a uma variedade de erros grosseiros verificados em medidas analógicas ou na definição da pseudo-medida Fuzzy. Os sistemas teste de 14, 30 e 118 barras do IEEE, e uma rede de distribuição de 33 barramentos foram adotados no conjunto de simulações.

O capítulo cinco apresenta as principais conclusões dos resultados alcançados, bem como idéias para futuros trabalhos.

Os três tópicos finais deste trabalho são os Apêndices A, B, C. No Apêndice A, são descritos os modelos de otimização Fuzzy, aplicando programação linear e quadrática Fuzzy. O Apêndice B descreve os dados da rede elétrica de todos os sistemas teste avaliados, além dos valores da tensão complexa, fluxos e injeções de potência nestes sistemas, sendo estes considerados na construção do conjunto de medidas analógicas processadas pelos estimadores de estado avaliados. O Apêndice C mostra as expressões gerais utilizadas para modelagem do problema de estimação de estado.

---

---

## CAPÍTULO 2

---

# REVISÃO DO PROBLEMA DE ESTIMAÇÃO DE ESTADO EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

---

---

### 2.1 ASPECTOS GERAIS DO PROBLEMA DE ESTIMAÇÃO DE ESTADO

Este capítulo tem o propósito de realizar uma revisão bibliográfica do processo de estimação de estado em sistemas de energia elétrica, descrevendo todas as funções associadas aos estimadores de estado, assim como proceder a revisão do estado da arte da estimação de estado em sistemas de distribuição de eletricidade e da modelagem da rede externa em sistemas de transmissão de eletricidade. Toda atenção deste trabalho é voltada para os modelos de estimação de estado estática e suas aplicações

Desde que a estimação de estado em sistemas elétricos de potência foi introduzida por Fred Schweppe, (SCHWEPPE, 1970a) e (SCHWEPPE, 1970b), esta passou a representar um elemento de fundamental importância nos modernos centros de gerenciamento de energia elétrica, EMS (*Energy Management System*), fornecendo uma base completa de dados, consistente e confiável para as outras funções essenciais do sistema EMS, tal como o monitoramento da segurança de operação em tempo real, fluxo de potência ótimo, análise de segurança, estudos de fluxo de potência em tempo real, controle supervisorio, controle automático da tensão e despacho econômico (DY LIACCO, 1978).

Em função da desregulação verificada na indústria de energia elétrica, a partir da década de 80, o processo de estimação de estado passou a ser considerado como um elemento fundamental nos modernos centros de controle e operação dos sistemas de energia elétrica. Muitas aplicações comerciais críticas nos sistemas elétricos, como a gerência dos corredores congestionados de transmissão de eletricidade, necessitam ser fundamentadas e justificadas através da utilização de um modelo preciso do sistema elétrico, o qual é derivado do processo de estimação de estado. Daí, a necessidade da melhoria do estimador de estado de forma a conseguir um modelo mais exato e com maior confiabilidade para análise do sistema de energia elétrica.

Nos modernos sistemas gestores de energia (EMS), o programa de estimação de estado processa um conjunto redundante de medidas e dados da rede elétrica, fornecendo, em tempo real, uma solução para o problema de fluxo de potência, o qual é a base para a execução de todas as funções que monitoram a segurança do sistema e fazem seu controle em tempo real. A estimação de estado é baseada em relações matemáticas entre as variáveis de estado do sistema, ângulos e magnitudes da tensão nos barramentos e as medidas. Um conjunto redundante de medidas em tempo real, incluindo medidas de magnitude de tensão nas barras, fluxo e injeção de potência ativa e reativa em circuitos e barramentos, e em algumas situações, magnitudes de corrente nos circuitos, são coletados da rede elétrica através do sistema supervisorio de controle e a aquisição de dados, SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*). O conjunto de medidas obtidas em tempo real, em geral, apresenta-se corrompido por diferentes tipos de erros, cabendo aos estimadores de estado detectar, identificar e remover estes erros através de análises estatísticas do problema.

O processo de estimação de estado revela-se complexo, uma vez que muitas fontes de erros ou imprecisões podem estar presentes nos dados processados pelo estimador de estado, dentre as quais destacam-se:

- Erro inerente ao processo de medição, causado pela precisão finita dos aparelhos de aquisição de medidas (ruído);

- Avaria do equipamento de medição ou tele-transmissão;

- Má calibração da aparelhagem de medição;

- Parâmetros imprecisos do sistema elétrico;

- Erros na configuração topológica do sistema elétrico em virtude de informação incorreta sobre o estado operacional das chaves seccionadoras e disjuntores (aberto ou fechado);

- Incoerência no modelo matemático;

- Medições realizadas durante a ocorrência de fenômenos transitórios;

- Diferenças de sincronismo na aquisição das medidas.

O estimador de estado atua como um filtro para suavizar erros estatisticamente pequenos, corriqueiros, inerentes à medição, bem como para suprimir erros grosseiros eventuais, causados por funcionamento inadequado do sistema de aquisição de dados. A implementação da função de estimação de estado nos centros de operação permite ainda ao operador realizar as seguintes tarefas:

- Determinar a configuração atual da rede elétrica e a observabilidade do plano de medição, para fins de estimação do estado de todo o sistema elétrico;

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

– Determinar todas as grandezas de interesse para a operação do sistema, como valores de fluxo e injeção de potência ativa e reativa, e tensões complexas, mesmo para regiões não monitoradas do sistema;

– Descobrir possíveis anomalias no sistema elétrico, devido a incidentes como curto-circuito, ou avarias em equipamentos de medida ou transmissão de dados.

Além das informações muito úteis, disponibilizadas aos operadores de sistemas elétricos, a estimação de estado também pode ser utilizada na etapa de planejamento da supervisão do sistema, auxiliando na tomada de decisões mais coerentes para os problemas que se apresentam. Destas, podemos destacar:

- Escolha dos melhores locais para instalação de aparelhos de medição;
- Seleção das grandezas a serem medidas;
- Verificação dos parâmetros das linhas de transmissão;
- Definição da classe de precisão e calibração dos aparelhos de medição;
- Determinação de possíveis pontos de reforço à operação do sistema.

Embora o papel de um estimador do estado esteja bem definido, existe muita liberdade na escolha da sua implementação prática. A principal opção de implementação baseia-se no emprego de metodologias estatísticas para tratamento dos dados medidos em tempo real. Neste contexto, o método com maior popularidade, dentre os vários métodos propostos a partir do trabalho inicial de Schweppe, é o algoritmo dos Mínimos Quadrados Ponderados (MQP). Como este algoritmo pode ser resolvido por técnicas numéricas eficientes, o estimador do estado baseado na aproximação dos MQP veio a ser instalado em quase todos os sistemas EMS pelo mundo inteiro. Entretanto, o método dos MQP é altamente sensível à presença de erros grosseiros nas medidas obtidas em tempo real. A fim de minimizar este problema, formulações alternativas do problema de estimação de estado foram propostas, como os algoritmos baseados na aplicação do critério da máxima

verossimilhança (MILI, 1990). Estes algoritmos vieram propor o conceito de robustez estatística ao processo de estimação de estado, conforme será discutido em uma próxima seção deste capítulo. Dentre estas novas propostas de algoritmos para estimação de estado, os métodos do Mínimo Valor Absoluto Ponderado dos Resíduos (IRVING, 1978) e o método do Mínimo Quadrado da Mediana do Resíduo (MILI, 1990) representam boas técnicas de solução. Contudo, estes algoritmos demandam de uma carga computacional mais elevada para a solução do problema de estimação de estado, se comparados aos estimadores MQP.

Quando o modelo considerado para solução do problema de estimação de estado não produz estimativas dentro de um grau de exatidão compatível com os desvios padrões das quantidades estimadas, conclui-se que as quantidades medidas contêm dados espúrios ou que o modelo é inadequado para representar as mesmas. O procedimento para identificar e resolver o primeiro problema é chamado de análise de erros grosseiros (MONTICELLI, 1999), enquanto a solução do segundo problema é realizada pela detecção/identificação de erros topológicos. Muitas técnicas para solução de ambos os problemas comentados têm sido propostas e utilizadas com sucesso, conforme será descrito em uma próxima seção deste capítulo.

Em geral, muitas suposições são feitas na adoção do tratamento estatístico convencional do problema de estimação de estado em um sistema de eletricidade, podendo ser assim enumeradas:

- 1) A rede trifásica do sistema elétrico é equilibrada. Assim, um circuito monofásico equivalente é empregado para modelar o sistema.
- 2) O sistema opera em regime constante, ou seja, os modelos são, em sua grande maioria, estáticos.
- 3) Os parâmetros da rede elétrica são conhecidos e precisos.

4) A topologia, em tempo real da rede elétrica, é conhecida perfeitamente.

5) Todas as medidas são coletadas no mesmo instante e representam o estado verdadeiro do sistema.

6) Os erros nas medidas adquiridas, em tempo real, são modelados como variáveis aleatórias independentes, com distribuição Gaussiana e média zero.

7) As variâncias ( $\sigma^2$ ) dos erros de medição são conhecidos.

Contudo, em um sistema de eletricidade real, algumas destas suposições não podem sempre ser aplicadas, resultando em estimativas errôneas para o estado vigente do sistema. Estas suposições foram sugeridas inicialmente para a estimação de estado em sistemas de transmissão de eletricidade, onde o carregamento por fase do sistema é, geralmente, equilibrado. Porém, com o desenvolvimento de algoritmos de estimação de estado para redes de distribuição de eletricidade, caracterizadas por um forte desequilíbrio da carga entre as três fases, parte das suposições passaram a ser desconsideradas, pois as mesmas vêm introduzir erros na estimativa do estimador de estado, uma vez que se supõem o sistema como inteiramente simétrico. Os algoritmos para estimação de estado, em redes de distribuição de eletricidade, em sua enorme maioria, consideram as mesmas formulações adotadas para os algoritmos aplicados em sistemas de transmissão porém, levando em conta as características peculiares destas redes. No tópico (2.4), deste capítulo, é apresentada uma revisão bibliográfica dos principais algoritmos de estimação de estado para redes de distribuição de eletricidade.

Atualmente, tem se verificado um crescente número de trabalhos voltados para o desenvolvimento de algoritmos híbridos para estimação de estado, tanto em redes de distribuição de energia elétrica como para modelagem de interconexões das redes de transmissão de eletricidade. Estes algoritmos combinam aproximações tradicionais com técnicas emergentes, sendo que a aplicação de técnicas inteligentes tem recebido destaque.

O desenvolvimento de algoritmos dinâmicos para estimação de estado, baseados no emprego dos filtros de Kalman Bucy (LEITE DA SILVA, 1987), também receberam destaque a partir de meados da década de 90, porém, em virtude da complexidade associada à estimação dinâmica, diversas simplificações são adotadas, tornando os modelos descritos, na literatura, pouco usuais em termos práticos. Aliado a estas novas tendências de estimação de estado em sistemas elétricos, algoritmos e métodos para melhoria ou adequação das técnicas tradicionais continuam a ser desenvolvidos, uma vez que os estimadores de estado presentes em grande parte dos centros de controle da operação empregam, em sua formulação, técnicas tradicionais, como a técnica dos Mínimos Quadrados Ponderados proposta por Schweppe em 1970.

Uma completa bibliografia sobre estimação de estado em sistemas elétricos de potência, ao longo de duas décadas (1968-1989), é apresentada em (DO COUTTO FILHO, 1990). Nesta referência, estão listados os trabalhos mais importantes neste período, desde o trabalho inicial de Schweppe até o desenvolvimento de técnicas de estimação de estado mais complexas como a modelagem de estimadores de estado dinâmicos. Também são enumerados trabalhos sobre os diferentes problemas envolvidos no processo de estimação de estado.

## **2.2 ETAPAS ASSOCIADAS AO PROCESSO DE ESTIMAÇÃO DE ESTADO**

O processo de estimação de estado em sistemas de energia elétrica é tradicionalmente dividido em quatro etapas:

1º) Obtenção da topologia do sistema, no modelo barra – ramo, através da aplicação do Configurador de Redes;

2º) Análise e restauração da observabilidade do sistema;

3º) Cálculo do vetor de estado do sistema aplicando o Estimador de Estado;

4º) Processamento de erros grosseiros presentes em medidas analógicas.

Na Figura 2.1 é mostrado um fluxograma apresentando todas as etapas envolvidas no processo de estimação de estado.

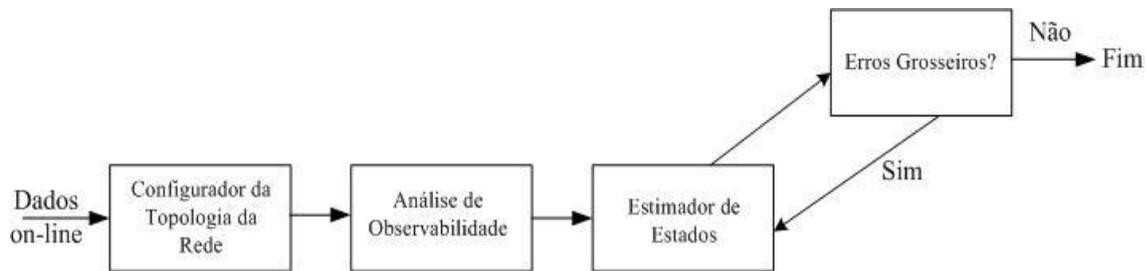


Figura 2.1: Etapas básicas do processo de estimação de estado.

Na 1ª etapa, é executado o Configurador da Topologia da Rede que determina, a partir do conjunto de medidas lógicas disponíveis e de informações sobre a localização e o tipo de medidores instalados no sistema, a topologia vigente da rede elétrica e a correspondente configuração de medidores. Para tanto, este utiliza um modelo barra – ramo, que corresponde ao diagrama unifilar da rede elétrica.

Na segunda etapa, denominada Análise de Observabilidade, avalia-se para o conjunto de medidas disponíveis em um dado instante de tempo, se a estimação de estado é possível para todo o sistema elétrico. Caso não seja possível observar a rede elétrica como um todo, procurar-se-á identificar as ilhas observáveis e os prováveis pontos para instalação de medidas fictícias, denominadas pseudo-medidas, que venham a tornar o sistema completamente observável.

A determinação da estimativa do estado de operação do sistema elétrico é efetivamente realizada no Estimador de Estado, processando um conjunto de grandezas medidas e a configuração topológica da rede elétrica.

Ao final do processo de estimação de estado é realizada a detecção, identificação e tratamento das medidas portadoras de erros grosseiros processadas pelo Estimador de Estado, através da realização de testes estatísticos.

Nas próximas subseções deste tópico, no presente capítulo, são descritas, através de uma revisão bibliográfica objetiva, todas as etapas envolvidas no processo de estimação de estado. Maior ênfase será dada a etapa de cálculo do vetor de estado pelo Estimador de Estado, uma vez que o objetivo principal deste trabalho de tese é o desenvolvimento de algoritmos para o cálculo do vetor de estado, porém considerando a presença de informações qualitativas e imprecisões no problema.

### **2.2.1 Cálculo do Vetor de Estado**

O cálculo do vetor de estado constitui a etapa central do processo de estimação de estado, sendo, por isto, primeiramente descrito.

O vetor de variáveis de estado do sistema elétrico é comumente representado pelas magnitudes e ângulos de fase das tensões complexas nos barramentos. Entretanto, em algumas aplicações menos frequentes, grandezas como razão de transformação em transformadores em fase,  $t_{km}$ , e ângulo de fase dos transformadores defasadores,  $\varphi_{km}$ , também podem ser incorporadas ao vetor de estado do sistema. O fluxo de potência ativa e reativa nos circuitos também pode ser representado como variável de estado adicional ao problema de estimação de estado, conforme descrito em (MONTICELLI, 2000). Isto se verifica em situações onde a aplicação da Lei de Ohm não é viável em um circuito, como linhas com impedância nula ou desconhecida, ou chaves abertas, impossibilitando o cálculo do fluxo de potência através das variáveis de estado convencionais.

As principais abordagens consideradas para o cálculo do vetor de estado são o Método dos Mínimos Quadrados Ponderados (MQP), e a utilização de algoritmos baseados no critério de Máxima Verossimilhança, em que o algoritmo baseado na Soma dos Valores Absolutos Ponderados dos Resíduos (VAPR) representa a formulação com maior abordagem na literatura técnica especializada.

Em qualquer uma das abordagens, define-se  $x$  como sendo o vetor das variáveis de estados, com dimensão  $2nb-1$ , e um barramento utilizado como referência para os ângulos de fase das tensões complexas. Define-se, também, o vetor  $z$  como sendo o vetor do conjunto de medidas analógicas presentes no sistema, com dimensão definida por  $nm$ .

As medidas analógicas obtidas em tempo real e transmitidas aos centros de operação e controle, mais frequentemente processadas pelo estimador de estado, são: fluxos de potência ativa e reativa, injeções de potência ativa e reativa, magnitudes de tensão nos barramentos e magnitude da corrente nas linhas ou circuitos. A partir da década de 80, têm-se proposto também a utilização de medição fasorial sincronizada (PMU), caracterizada pela medição dos fasores de tensão nas barras e corrente nas linhas de transmissão. Nos trabalhos de (EHRENSPERGER, 2004) e (MARINI, 2005) são descritos o estado da arte em medição fasorial sincronizada, assim como aplicações no monitoramento de sistemas de energia elétrica, (EHRENSPERGER, 2004), e melhoria das condições de estabilidade de sistemas elétricos de potência, (MARINI, 2005). Em (PEREIRA, 2008) é apresentada uma descrição da utilização de medição fasorial nos estimadores de estado não-linear e linear para sistemas de potência, apresentando as formulações matemáticas associadas. Uma descrição da situação atual de medição fasorial no Brasil é descrito em (DECKER, 2006). Neste trabalho, o autor apresenta o sistema de medição fasorial e sincronização, desenvolvido na região Sul do Brasil, assim como alguns resultados obtidos por monitoração. Contudo, estas informações ainda não estão disponibilizadas para processamento em estimadores de estado.

Outros tipos de medidas processadas pelos estimadores de estado, não mensuradas em tempo real, referem-se às medidas virtuais e pseudo-medidas. O conceito de medida virtual está associado à injeção de potência nula nas barras de passagem do sistema (ABUR, 2004) e (LIN, 1996). A representação de medidas virtuais no problema de estimação de

estado resulta em elevados valores de ponderação para as mesmas, em razão da precisão da informação. Uma alternativa para evitar a utilização de ponderações elevadas para modelar as medidas virtuais e, com isso, reduzir o mau condicionamento da matriz de solução, é modelar estas medidas como restrições de igualdade (ASCHMONEIT, 1977). O conceito de pseudo-medida será utilizado para denotar medidas fictícias criadas no algoritmo de estimação de estado com o propósito de tornar o sistema elétrico observável. Neste trabalho, utilizaremos o conceito de medida virtual para denotar as medidas fictícias de injeção nula nas barras de passagem, enquanto pseudo-medidas referir-se-ão a medidas fictícias criadas a partir de informações qualitativas disponibilizadas acerca do estado operativo do sistema elétrico.

O modelo de estimação de estado estática, que relaciona as magnitudes e fases das tensões complexas nos barramentos, com as medidas analógicas obtidas em tempo real, é assim formulado:

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

Onde,  $h(x)$  é o vetor das equações representativas das medições não lineares em função do vetor de variáveis de estado,  $x$ , com dimensão  $nm \times 1$ .

Os componentes do vetor  $e$ , com dimensão definida pelo número de medidas analógicas, é normalmente assumido como sendo uma variável aleatória, possuindo distribuição Normal com média zero e matriz de covariância  $R$ . Ou seja:

$$e \approx N(0,R) \quad (2.2)$$

$$R = E[ee^T] \quad (2.3)$$

Para esta expressão tem-se:

- $N(0,R)$  representa a função de distribuição Normal com média zero e covariância  $R$ ;
- $E[.]$  representa a função do valor esperado;

- R é a matriz quadrada de covariância dos erros de medição, com dimensão  $nm \times nm$ .

Considerando que todos os erros que afetam as medidas são independentes entre si, a matriz R pode ser definida por uma matriz diagonal.

$$R = \begin{bmatrix} 1/\sigma_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 1/\sigma_{nm}^2 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Nesta expressão,  $\sigma_i^2$  representa a variância de uma medida analógica  $i$ ;  $i = 1, \dots, nm$ .

### 2.2.1.1 Método dos Mínimos Quadrados Ponderados (MQP)

O método dos Mínimos Quadrados Ponderados (MQP), proposto por Schweppe, em 1970, (SCHWEPPE, 1970a) e (SCHWEPPE, 1970b), representa a formulação com maior aceitação, tanto nos programas de estimação de estado em uso prático nos sistemas elétricos, quanto no meio acadêmico. A partir da idéia inicial de Schweppe, inúmeros trabalhos foram propostos, procurando aprimorar e adequar o método às novas necessidades dos sistemas elétricos. Muitas variantes do algoritmo MQP podem ser encontradas na literatura especializada, ilustrando aplicações deste para estimação de estado em sistemas de transmissão ou em redes de distribuição de eletricidade.

No decorrer deste tópico, será apresentada uma revisão das variantes e melhorias aplicadas ao método dos Mínimos Quadrados Ponderados, assim como a aproximação padrão utilizada em sua modelagem, denominada Equações Normais, proposta em (SCHWEPPE, 1970a). O método das Equações Normais foi implementado no estimador de estado baseado no método dos Mínimos Quadrados Ponderados desenvolvido neste trabalho de tese e avaliado no Capítulo 4.

### 2.2.1.1.1 Revisão do Problema de Mínimos Quadrados Ponderados na Estimação de Estado em Sistemas de Energia Elétrica

O processo de estimação de estado, baseado no método dos Mínimos Quadrados Ponderados (MQP), calcula o vetor de estado  $\mathbf{x}$ , que minimiza a soma ponderada dos quadrados dos erros de medição, considerando restrições operativas de igualdade e desigualdade. Ou seja, resolve-se o seguinte problema de otimização definido em (SCHWEPPE, 1970a) e assim formulado, (WOOD, 1996):

$$\begin{aligned} \min imizar \quad & J(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{nm} r_i^2 / \sigma_i^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{nm} [z_i - h_i(x)]^2 / \sigma_i^2 \\ \text{sujeito a} \quad & g(x) = 0; \\ & c(x) \leq 0; \end{aligned} \tag{2.5}$$

Onde:

$r_i$  é o resíduo de estimação para uma medida  $i$  qualquer;  $r_i = z_i - h_i(x)$ .

$g(\cdot)$  e  $c(\cdot)$  são restrições operativas de igualdade e desigualdade, respectivamente, sendo normalmente utilizadas para representar valores objetivos e limites operacionais de partes não-observáveis do sistema elétrico, (MONTICELLI, 2000).

Restrições de igualdade são inclusas em estimadores de estado, aplicando-se o método dos Mínimos Quadrados Ponderados, com o objetivo de representar medidas de injeção nula, com elevadas ponderações, ou pseudo-medidas, (MONTICELLI, 2000). As restrições de desigualdade são representadas pelos limites operacionais de equipamentos, sendo utilizado com o propósito de melhorar a representação de partes não-observáveis da rede. (MONTICELLI, 2000) menciona que as restrições de desigualdade podem ser tratadas nos estimadores de estado como é realizado no problema de fluxo de potência e no problema de fluxo de potência ótimo. As restrições são inicialmente relaxadas, e com a violação de alguma restrição, o valor da variável violada torna-se igual ao correspondente limite violado. O algoritmo de pontos interiores tem encontrado grande aplicação neste

campo, sendo referenciado em (GRANVILLE, 1994) e (WEI, 1996). As restrições de desigualdade mais comumente utilizadas são as seguintes, (MONTICELLI, 2000):

- a) Limites de geração de potência reativa,  $Q_k^{\text{lim}}$ ;
- b) Limite da posição de tapas de transformadores em fase,  $t_k^{\text{lim}}$ ;
- c) Limite de mudança de fase em transformadores defasadores,  $\varphi_k^{\text{lim}}$ .

A partir do problema de Mínimos Quadrados Ponderados formulado na equação (2.5), vários trabalhos foram propostos, procurando melhorar o desempenho computacional, a robustez numérica e a representação de restrições ao problema.

Uma variante dos algoritmos MQP para estimação de estado, com destaque na década de 70 e início da década de 80, está ilustrada em (GARCIA, 1979) e (ALLEMONG, 1982). Tais algoritmos propunham o desacoplamento rápido entre as potências ativa e reativa no processo de estimação de estado, assim como realizado no fluxo de potência, (MONTICELLI, 1983). O objetivo do desacoplamento era propiciar melhorias no processamento computacional. Entretanto, com a elevada capacidade de processamento dos computadores atuais, a técnica de desacoplamento das potências ativa e reativa nos algoritmos MQP perdeu a importância, uma vez que o tempo de processamento e a capacidade de armazenamento deixaram de ser grandes empecilhos à utilização de algoritmos acoplados, como proposto em (SCHWEPPE, 1970a) e (SCHWEPPE, 1970b). Variações do algoritmo de desacoplamento vieram ainda a ser apresentadas, como em (MONTICELLI, 1990), propondo o desacoplamento da matriz de ganho do estimador MQP; e em (LIU, 1992) que propõe a solução do desacoplamento em duas etapas, sem desconsiderar o acoplamento das submatrizes PV e Q $\theta$  no Jacobiano do problema. Todas estas alternativas de desacoplamento enfatizam a melhoria da carga computacional, porém não propiciam ganhos significativos no resultado da estimação de estado.

Outros trabalhos procuram adequar o estimador de estado MQP, de forma que seu modelo incorpore algumas características do sistema elétrico, como a existência de restrições operacionais e peculiaridades das linhas de transmissão.

A incorporação de restrições de igualdade no problema original de estimação de estado foi inicialmente apresentada em (ASCHMONEIT, 1977), abrindo campo para publicação de outros trabalhos. (ALVARADO, 1990) propõe a utilização de uma matriz blocada aumentada de modo a eliminar as restrições, enquanto (CLEMENTS, 1990) propõe um método para resolver problemas com restrições de igualdade, em alternativa aos multiplicadores de Lagrange, valendo-se da estrutura esparsa da matriz de rede do sistema elétrico. (CLEMENTS, 1995) propõe também um tratamento das restrições de desigualdade, aplicando o método de pontos interiores, baseado no conceito de barreira logarítmica, onde as partes não observáveis da rede elétrica são modeladas através do próprio estimador de estado, utilizando restrições de desigualdade relativas a limites operacionais em barras de geração ou transformadores com variação automática de *taps*. A representação de trechos de circuitos com impedância nula foi originalmente proposta em (MONTICELLI, 1991), sendo estas representadas através de restrições de igualdade no método das Equações Normais modificado. (SANTOS FILHO, 2006) propõe ainda a incorporação de restrições de desigualdade de *taps* de transformadores no problema de estimação de estado MQP, com algoritmo de solução utilizando o método de pontos interiores com barreira logarítmica.

Técnicas diferenciadas para solução do problema de Mínimos Quadrados Ponderados foram propostas procurando contornar os problemas verificados no Método Iterativo das Equações Normais sugerido em (SCHWEPPE, 1970a) e (SCHWEPPE, 1970b). Dificuldade numérica em alguns problemas especiais de estimação de estado, caracterizadas principalmente pela singularidade da matriz de ganho do sistema,

representava o principal desafio a ser superado, (MONTICELLI, 2000). Desta forma, métodos alternativos para a solução dos estimadores de estado MQP passaram a ser referenciados. Nesta linha, podemos destacar os métodos Ortogonais, desenvolvido em (SIMÕES-COSTA, 1981) e aprofundado para representação de restrições de igualdade através da técnica de rotações de Givens, em (GOUVÊA, 1998), e aplicação da teoria de robustez estatística para formulação de um estimador de estado não quadrático com implementação ortogonal pelas Rotações de Givens, (PIRES, 1999). Um método baseado em programação não-linear e no emprego de multiplicadores de Lagrange para representação de restrições no problema de estimação de estado, é proposto em (ASCHMONEIT, 1977). O método do Tableau Esperso, baseado no uso de matrizes blocadas para representação de restrições nos multiplicadores de Lagrange, considerando uma formulação esparsa para o problema, é descrito em (GJELSVIK, 1985). O método híbrido, conhecido como método das Equações Semi-Normais, proposto em (MONTICELLI, 1985d), que considera a aplicação de transformação ortogonal a matriz do problema de estimação de estado, e cálculo dos incrementos das variáveis de estado através da solução de um sistema de equações linearizadas.

Alguns destes métodos, como os Ortogonais e o método das Equações Semi-Normais, encontraram grande aceitação, pois se mostraram mais eficientes computacionalmente, contornando, em muitas situações, problemas de condicionamento numérico, tradicionalmente verificado em relação às ponderações das medidas e pseudo-medidas processadas pelo estimador de estado; além de superar problemas associados ao emprego de elevado número de medidas de injeção de potência e a representação de trechos de circuitos caracterizados por baixas impedâncias, os quais são conectados a circuitos com impedâncias regulares. A representação de pseudo-medidas com ponderações

relativamente altas, fato de grande dificuldade no método das Equações Normais, é outro ponto favorável destes métodos.

#### 2.2.1.1.2 Método das Equações Normais

O método iterativo das Equações Normais é a aproximação padrão para a solução do estimador de estado por Mínimos Quadrados Ponderados.

Aplicando a condição de otimalidade de primeira ordem de Karush-Tucker (KKT), à função objetivo  $J(x)$  do problema de minimização formulado em (2.5), obtém-se o seguinte sistema matricial de equações não lineares a ser resolvido:

$$\frac{\partial J(x)}{\partial x} = -\sum_{i=1}^{nm} \frac{r_i}{\sigma_i^2} \frac{\partial h_i(x)}{\partial x} = -H' R_z^{-1} r = 0 \quad (2.6)$$

Onde,  $(\partial h_i(x)/\partial x)'$  é a  $i$ th linha da matriz Jacobiana  $H$ , das derivadas das equações de cada medição em relação às variáveis de estado do problema.

Escrevendo a relação da equação (2.6) em formulação matricial, e substituindo  $R$  pela relação mostrada na equação (2.4), tem-se:

$$\nabla_x J(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial J(x)}{\partial x_1} \\ \frac{\partial J(x)}{\partial x_2} \\ \vdots \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial x_1} & \frac{\partial h_2}{\partial x_1} & \dots \\ \frac{\partial h_1}{\partial x_2} & \frac{\partial h_2}{\partial x_2} & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_1^2} & 0 & \dots \\ 0 & \frac{1}{\sigma_2^2} & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} [z_1 - h_1(x)] \\ [z_2 - h_2(x)] \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$[H] = \frac{\partial h(x)}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial x_1} & \frac{\partial h_2}{\partial x_1} & \frac{\partial h_3}{\partial x_1} & \dots \\ \frac{\partial h_1}{\partial x_2} & \frac{\partial h_2}{\partial x_2} & \frac{\partial h_3}{\partial x_2} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Expandindo o sistema de equações de (2.7) pela série de Taylor e ignorando os termos de ordem superior à primeira ordem, o sistema resultante pode ser resolvido através de um

algoritmo iterativo, conhecido como Gauss-Newton. Desta forma, obtemos a matriz Hessiana relativa às derivadas de segunda ordem da função objetivo do problema.

$$\frac{\partial^2 J(x)}{\partial x^2} = \sum_{i=1}^{nm} \sigma_i^{-2} \frac{\partial h_i(x)}{\partial x} \left( \frac{\partial h_i(x)}{\partial x} \right)' - \sum_{i=1}^{nm} \frac{r_i}{\sigma_i^2} \frac{\partial^2 h_i(x)}{\partial x^2} \quad (2.9)$$

Reescrevendo o problema mostrado em (2.9) em formulação matricial, tem-se a equação que permite determinar os incrementos  $\Delta x$  para as variáveis de estado.

$$\Delta x = \left[ [H]' [R]_z^{-1} [H] \right]^{-1} \left\{ \left[ [H]' [R]_z^{-1} \begin{bmatrix} z_1 - h_1(x) \\ z_2 - h_2(x) \\ \vdots \end{bmatrix} \right] \right\} \quad (2.10)$$

A equação definida em (2.10) pode ser reescrita em função da matriz de ganho do problema de MQP, como mostrado nas equações (2.11) e (2.12).

$$\Delta x = [G^{-1}] \left\{ [H]' [R]_z^{-1} \begin{bmatrix} z_1 - h_1(x) \\ z_2 - h_2(x) \\ \vdots \end{bmatrix} \right\} \quad (2.11)$$

$$[G] = [H]' [R]_z^{-1} [H] \quad (2.12)$$

A atualização das variáveis de estado, a cada iteração do processo de solução, é realizada por meio da igualdade definida em (2.13).

$$\frac{\partial J}{\partial x} \Big|_{(x+\Delta x)} \cong \frac{\partial J}{\partial x} \Big|_{(x)} + \frac{\partial^2 J}{\partial x^2} \Big|_{(x)} \Delta x \quad (2.13)$$

As equações definidas em (2.12) são conhecidas como Equações Normais.

As principais fontes de mau condicionamento nos estimadores de estado com resolução dos MQP pelo método das Equações Normais, são as seguintes (ABUR *et al.*, 2004):

- Valores muito elevados de ponderações na matriz  $R^{-1}$ , utilizados para modelar as medidas virtuais consideradas no problema;

- Circuitos com valores excessivamente grandes e pequenos de reatância conectados na mesma barra. A presença de uma medida neste ponto pode resultar em um ponto de alavancagem, conforme discutido em (MILI, 1990) e (ABUR, 2004);

- Grande número de medidas de injeção de potência no sistema.

O emprego de algum dos métodos alternativos de solução do problema de MQP, descritos no tópico anterior, tem o propósito de reduzir ou contornar o mau condicionamento verificado na matriz de solução do método das Equações Normais.

### **2.2.1.2 Estimadores de Estado baseados no critério da Máxima Verossimilhança**

O desenvolvimento de estimadores de estado, baseado no critério de máxima verossimilhança, tem o propósito de aprimorar o conceito de robustez estatística no processo de estimação de estado, quando comparados aos estimadores MQP. Entende-se por robustez estatística a capacidade que um estimador de estado apresenta em manter-se insensível a um número limitado de erros grosseiros adicionados ao conjunto de medidas presentes na rede elétrica.

O conceito de robustez estatística foi adequadamente discutido em (MILI, 1990). De acordo com (MILI, 1990) a robustez de um estimador de estado pode ser avaliada através do ponto de colapso (*Breakdown Point*) do mesmo. Esse conceito pode ser descrito da seguinte forma: considere um conjunto de medidas  $z = \{z_1, z_2, \dots, z_{nm}\}$  para o qual um estimador específico fornece a seguinte estimação de estado  $\hat{x}$ . Se uma ou mais medidas forem substituídas por erros grosseiros, o estado estimado será alterado gerando um novo estado,  $\hat{x}^{mg}$ . O valor do desvio máximo, que ocorre no estado do sistema, a partir de vários conjuntos de medição diferentes, pode ser calculado a partir da equação (2.14).

$$b_{mg} = \max_i \left| \hat{x}_i - \hat{x}_i^{mg} \right|; i = 1, \dots, 2nb - 1 \quad (2.14)$$

Onde:

$b_{mg}$  é o desvio máximo do estado, considerando os vários conjuntos de medição.

O ponto de colapso do estimador de estado,  $\xi$ , é determinado pela relação abaixo:

$$\xi = \frac{mg}{nm} \quad (2.15)$$

Onde:

$mg$  é o número de medidas do conjunto  $z$  que podem ser substituídas por erros grosseiros sem que o valor de  $b_{mg}$  se torne ilimitado;

$nm$  é o número de medidas do conjunto  $z$ .

Quanto maior o valor de  $\xi$ , mais robusto será o estimador de estado. O valor máximo de  $\xi$ , contudo, é limitado pela redundância do sistema de medição.

Algumas medidas específicas apresentam influência muito grande na estimação de estado, apresentando resíduos de estimação muito pequenos na ausência de erros grosseiros. Contudo, caso estas medidas contenham erros grosseiros, a sua identificação torna-se bastante complicada pela simples análise dos resíduos de estimação. Estas medidas foram denominadas pontos de alavancagem (*leverage point*), correspondendo a pontos longe da média (*outliers*), no espaço de regressão formado pelas linhas da matriz  $H(x)$ , podendo ocorrer de forma isolada ou em grupos (ABUR, 2004). Para medidas representando pontos de alavancagem, as linhas da matriz Jacobiana, neste caso, passam a apresentar valores muito diferentes, quando comparados com os valores das outras linhas da matriz.

A presença de erros grosseiros nas medidas caracterizadas por pontos de alavancagem é de difícil tratamento durante o processo de estimação de estado para todos os tipos de

estimadores, contudo os pontos de alavancagem não são sempre maléficos (ABUR, 2004). Quando estes estão associados a medidas boas, os mesmos são benéficos para a estimação de estado. Os pontos de alavancagem normalmente ocorrem nas seguintes situações (ABUR, 2004):

- Medida de injeção de potência em nós, cujos circuitos incidentes, apresentam impedâncias muito diferentes;
- Medida de fluxo de potência em circuitos de baixa impedância, eletricamente vizinhos de circuitos com impedâncias regulares;
- Ponderação muito elevada para uma medida específica.

Nesta seção, é realizada uma descrição dos estimadores de estado baseados no critério de máxima verossimilhança e mais frequentemente referenciados na literatura especializada. O mesmo ocorre com o estimador de estado, baseado na Soma dos Valores Absolutos Ponderados dos Resíduos (VAPR), avaliado neste trabalho de tese, no Capítulo 4, e que serviu de base para a construção dos estimadores de estado lineares, considerando restrições Fuzzy, propostos no Capítulo 3.

#### 2.2.1.2.1 Formulação de Estimadores de Estado pelo Critério de Máxima Verossimilhança

Ao contrário dos estimadores de estado MQP, os estimadores baseados no critério da máxima verossimilhança, conhecidos como estimadores de estado  $M$ , assumem que a função densidade de probabilidade ( $PDF$ ) dos erros de medição aleatórios, é conhecida (WOOD, 1984). A função objetivo destes estimadores é definida pela minimização dos resíduos de estimação,  $\rho(r)$ , sujeito às restrições definidas pelas equações de medição.

O problema de otimização dos estimadores de estado, baseados no critério da máxima verossimilhança é assim definido:

$$\text{minimizar } \sum_{i=1}^{nm} \rho(r_i) \quad (2.16)$$

$$\text{sujeito a: } z = h(x) + e$$

$\rho(r)$  representa a função dos resíduos de medição, sendo que vários tipos de função podem ser utilizados. A Tabela 2.1 ilustra as principais funções consideradas. O parâmetro  $a$  representa o ponto de quebra a partir do qual a função objetivo deixa de ser quadrática.

Tabela 2.1: Funções resíduos de medição.

Estimador de Estado	$\rho(r_i)$
<i>Quadrático – Constante (QC)</i>	$= \begin{cases} r_i^2 / \sigma_i^2 & \text{se }  r_i^2 / \sigma_i^2  \leq a \\ a^2 / \sigma_i^2 & \text{se }  r_i^2 / \sigma_i^2  > a \end{cases}$
<i>Quadrático – Linear (QL)</i>	$= \begin{cases} r_i^2 / \sigma_i^2 & \text{se }  r_i^2 / \sigma_i^2  \leq a \\ 2a \cdot \sigma_i^2 \cdot  r_i  - a^2 \cdot \sigma_i^2 & \text{se }  r_i^2 / \sigma_i^2  > a \end{cases}$
<i>Quadrático-Raiz Quadrada (QRQ)</i>	$= \begin{cases} r_i^2 / \sigma_i^2 & \text{se }  r_i^2 / \sigma_i^2  \leq a \\ 4a^{3/2} \cdot \sqrt{ r_i  / \sigma_i} - 3 \cdot a^2 & \text{se }  r_i^2 / \sigma_i^2  > a \end{cases}$
<i>Schweppe – Huber Generalized – M (SHGM)</i>	$= \begin{cases} 0.5 r_i^2 / \sigma_i^2 & \text{se }  r_i^2 / \sigma_i^2  \leq a \cdot w_i \\ a \cdot w_i \cdot  r_i^2 / \sigma_i^2  - 1/2 \cdot a^2 \cdot w_i^2 & \text{se }  r_i^2 / \sigma_i^2  > a \cdot w_i \end{cases}$
<i>Menor Valor Absoluto dos Resíduos (VAR)</i>	$=  r_i $

Os estimadores de estado baseados no critério da máxima verossimilhança têm por objetivo identificar, de forma automática, as medidas que apresentam um rápido crescimento do resíduo de estimação durante o processo iterativo, e reduzir assim a sua influência sobre as estimativas do estado do sistema (PEREIRA, 2008).

Conforme descrito em (PEREIRA, 2008), a função objetivo  $\rho(r)$  deve apresentar as seguintes características:

- Contínua e diferenciável ao longo de todo o domínio que define o problema;
- $\rho(r) = 0$ , para  $r = 0$ ;
- Monotonicamente crescente nas direções  $r$  e  $-r$ , ou seja,  $\rho(r) \geq 0$ ;
- Simétrica em torno do eixo das ordenadas, ou seja,  $\rho(r) = \rho(-r)$ ;
- Comportamento quadrático para pequenos valores de  $r$  e comportamento linear ou constante para valores elevados de  $r$ .

Nos trabalhos de (PEREIRA, 2008) e (BALDICK, 1997) são analisadas diferentes funções objetivo não quadráticas, contínuas e diferenciáveis, que procuram aproveitar os benefícios dos estimadores de estado baseados no critério da máxima verossimilhança. O tratamento aplicado as medidas portadoras de erros grosseiros é consequência da forma da função objetivo considerada no problema de estimação de estado. No trabalho de (PEREIRA, 2008) foram pesquisadas funções que tivessem um comportamento quadrático para valores pequenos do resíduo de estimação e um comportamento linear ou constante para valores de resíduos elevados. O tratamento adequado dos erros grosseiros iterativos representou o principal desafio do trabalho. (BALDICK, 1997) por sua vez, avalia os estimadores de estado  $QL$  e  $QC$ , em comparação ao estimador MQP, para medidas contendo múltiplos erros grosseiros.

Na literatura técnica especializada também são propostos outros métodos que utilizam o conceito de robustez estatística, porém considerando uma técnica complementamente diferente daquela desenvolvida nos estimadores de estado baseados no critério da máxima verossimilhança. Nos trabalhos de Mili, (MILI, 1990), (MILI, 1991) e (MILI, 1996), é proposto um estimador de estado baseado no Mínimo Quadrado da Mediana do Resíduo de estimação, denominados estimadores *LMS (Least Median of Squares)*. No estimador de

estado *LMS*, a função objetivo baseia-se na escolha de um único resíduo que apresenta o menor valor para a mediana do quadrado ponderado do resíduo, considerando todos os estados estimados possíveis. Em (MILI, 1991), o autor continua a discutir o problema de robustez estatística e pontos de alavancagem no processo de estimação de estado para os estimadores *LMS*, enquanto em (MILI, 1996) é proposto um estimador computado a partir do estimador MQP com re-ponderação, baseado em projeções estatísticas de cada ponto, e comparado a um valor estatístico de eliminação determinado pelo Método de Monte Carlo, para identificação de pontos de alavancagem.

#### 2.2.1.2.2 Estimadores de Estado baseados na Soma dos Valores Absolutos Ponderados dos Resíduos

O estimador de estado baseado na Soma dos Mínimos Valores Absolutos Ponderados dos Resíduos (VAPR) é um caso particular dos estimadores baseados no critério da Máxima Verossimilhança. O estimador de estado baseado na Soma dos Mínimos Valores Absolutos Ponderados dos Resíduos é modelado como um problema de programação linear. Este método foi inicialmente proposto por Irving, Owen e Sterling (IRVING, 1978), como um método robusto. Contudo, no trabalho de Falcão e Assis (FALCÃO, 1988) foi mostrado que estimador VAPR pode falhar na rejeição de erros de medição devido a certas configurações de medidas. Esta falha foi justificada pela existência de pontos de alavancagem no conjunto de medidas, conforme discutido em (MILI, 1990). (CELIK, 1992) também mostrou que erros grosseiros, em medidas caracterizadas por pontos de alavancagem, são exatamente satisfeitos pelo estimador de estado, contudo não são detectados.

Falcão e Abur têm publicado uma série de trabalhos sobre o estimador de estado baseado na Soma dos Mínimos Valores Absolutos Ponderados dos Resíduos. Nos trabalhos de (FALCÃO, 1982) e (FALCÃO, 1985) é desenvolvido um modelo de programação

linear para modelagem do estimador de estado VAPR, que calcula as estimativas do estado do sistema enquanto suprime simultaneamente o efeito de erros grosseiros nas medidas. Em outro trabalho, Falcão propõe uma técnica para identificação de medidas portadoras de erros grosseiros em um estimador de estado VAPR, abordando o problema de medidas caracterizadas como pontos de alavancagem (FALCÃO, 1988). A técnica proposta para a identificação de erros grosseiros segue um desenvolvimento similar àquela aplicada em estimadores de estado MQP, contudo a interpretação dos resultados deve ser realizada de forma diferenciada daquela realizada para estimadores MQP, pois o procedimento não permite uma computação à priori das propriedades estatísticas dos resíduos de medição. Uma evolução do modelo definido nos trabalhos anteriores, para estimação de estado e análise de observabilidade, considerando um modelo de medição linearizado para as potências ativa e reativa na forma Echelon é apresentada em (FALCÃO, 1994). O método é uma generalização da fatoração triangular de matrizes, para o caso de matrizes retangulares, proporcionando uma análise unificada no próprio algoritmo dos ruídos de medição, detecção e identificação de erros grosseiros e análise de observabilidade.

Uma série de trabalhos de Abur, propondo a aplicação da técnica da Soma dos Mínimos Valores Absolutos Ponderados dos Resíduos na solução de estimadores de estado, pode ser encontrada em (ABUR, 1990), (ABUR, 1991), (ABUR, 1993a), (ABUR, 1994) e (CELIK, 1992). Trabalhos propondo melhorias no algoritmo de estimação de estado VAPR, como decomposição da matriz  $H$  do problema (ABUR, 1991), e representação de restrições de igualdade e desigualdade (ABUR, 1993a), foram propostos pelo autor. O problema da identificação de medidas portadoras de erros grosseiros no estimador de estado VAPR foi discutida em (ABUR, 1990), enquanto que em (CELIK, 1992) é discutido o problema da presença de erros grosseiros em medidas caracterizadas como pontos de alavancagem. (ABUR, 1997) sugere um método para a eliminação de

medidas caracterizadas como pontos de alavancagem através da construção de uma matriz Jacobiana estendida. Uma proposta para a identificação de erros topológicos, baseada na habilidade de rejeição de medidas inconsistentes, é explorada em (ABUR, 1994). No livro referenciado em (ABUR, 2004) é encontrada uma compilação completa de todos os trabalhos deste autor, assim como uma abordagem aprofundada sobre o problema de estimação de estado em sistemas elétricos.

A modelagem para o estimador de estado VAPR, desenvolvida em (ABUR, 2004), foi implementada e avaliada neste trabalho de tese, com resultados mostrados no Capítulo 4. Este modelo também serviu de base para a construção dos estimadores de estado lineares, considerando restrições Fuzzy, proposto no Capítulo 3. No modelo de (ABUR, 2004) a função objetivo é do tipo modular, ou seja, linear por partes. A linearização da função objetivo é realizada, representando a função modular como o somatório de dois resíduos de medição, um resíduo à direita e outro à esquerda, relativos a cada trecho linear da função modular. Na Figura 2.2 é mostrada a representação gráfica da função objetivo modular.

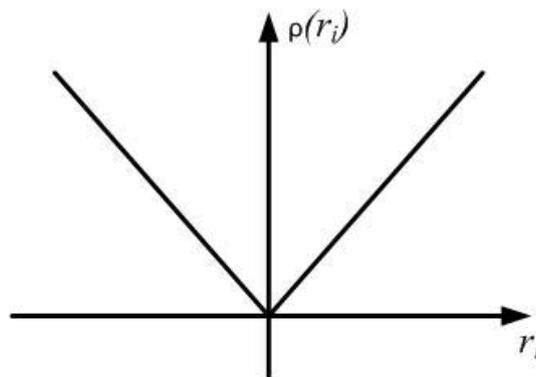


Figura 2.2: Função objetivo modular.

A partir da função objetivo do problema de estimação de estado VAPR definido na Tabela 2.1, o mesmo pode ser formulado como um problema de programação linear (ABUR, 2004).

$$\begin{aligned} \text{minimizar} \quad & \sum_{i=1}^{nm} |r_i| \\ \text{sujeito a} \quad & z_i = h_i(x) + r_i, \quad 1 \leq i \leq nm \end{aligned} \quad (2.17)$$

No ponto de convergência, pode-se admitir que a função objetivo do problema definido em (2.17) satisfaz um valor objetivo, dado por  $\zeta_i$ .

$$|r_i| \leq \zeta_i \quad (2.18)$$

Substituindo a inequação acima por duas igualdades através da introdução de duas variáveis de folga não negativas,  $\ell_i$  e  $k_i$ , referentes às partes lineares da função modular, tem-se:

$$r_i - \ell_i = -\zeta_i \quad (2.19)$$

$$r_i + k_i = \zeta_i \quad (2.20)$$

Definindo quatro novas variáveis não negativas,  $x_i^u, x_i^v, u_i$  e  $v_i$ , de forma que:

$$x_i = x_i^u - x_i^v \quad (2.21)$$

$$r_i = u_i - v_i \quad (2.22)$$

$$u_i = \frac{1}{2} \ell_i \quad (2.23)$$

$$v_i = \frac{1}{2} k_i \quad (2.24)$$

Reescrevendo estes termos na equação de regressão linear, mostrada em (2.25), que modela as medidas em função dos estados, chega-se a relação definida em (2.26).

$$z_i = A_i^T x + e_i \quad (2.25)$$

$$z_i = \left\{ \sum_{j=1}^{2nb-1} [A_{ij} x_j^u - A_{ij} x_j^v] \right\} + u_i - v_i, \quad 1 \leq i \leq nm \quad (2.26)$$

O termo  $|r_i|$  da função objetivo do problema de estimação VAPR, definido na Tabela 2.1, pode ser substituído por  $\zeta_i$ , em termos das novas variáveis de estado inclusas no problema.

$$\zeta_i = u_i + v_i \quad (2.27)$$

Desta forma, as estimativas de  $x$  para o estimador de estado VAPR podem ser obtidas a partir do seguinte problema de programação linear:

$$\begin{aligned} \min \text{imizar} \quad & \sum_{i=1}^{nm} [u_i + v_i] \\ \text{sujeito a} \quad & \sum_{j=1}^{2nb-1} A_{ij} (x_j^u - x_j^v) = -u_i + v_i + z_i, \quad 1 \leq i \leq nm \\ & x_j^u, x_j^v \geq 0; \quad 1 \leq j \leq 2nb - 1 \\ & u_i, v_i \geq 0; \quad 1 \leq i \leq nm \end{aligned} \quad (2.28)$$

Assumindo uma solução inicial  $x^0$  para o vetor de estado do sistema e considerando uma linearização de primeira ordem ao redor de  $x^0$  para  $h_i(x)$ , definida na equação (2.17), e de acordo com o modelo descrito em (2.28), constroe-se o problema de estimação de estado baseado na Soma dos Mínimos Valores Absolutos Ponderados dos Resíduos (ABUR, 2004).

$$\begin{aligned} \min \text{imizar} \quad & \sum_{i=1}^{nm} c^T [u_i + v_i] \\ \text{sujeito a} \quad & H \cdot \Delta x_u - H \cdot \Delta x_v + u - v = \Delta z \\ & \Delta x_u, \Delta x_v, u, v \geq 0 \end{aligned} \quad (2.29)$$

Onde:

$\Delta z$  é o resíduo de estimação, calculado como:

$$\Delta z = z - h(x^0) \quad (2.30)$$

$c^T = [W_1, W_2, \dots, W_{nm}]$  é o vetor de ponderações do inverso das covariâncias dos erros de medição definidos em  $R$ , com dimensão  $nm \times 1$ .

$$W_i = 1/R_i \quad (2.31)$$

O problema de programação linear da equação (2.29) tem  $(2nb + 2nm)$  variáveis para  $nm$  medições, e é solucionado através de uma seqüência de problemas de programação

linear, até que o critério de convergência seja atendido. A solução do problema equivalente de programação linear pode ser obtida pelo método Simplex ou pelo método dos Pontos Interiores Primal Dual, (LINS, 2006) e (LUENBERGER, 1984). Exemplificações da aplicação do método Simplex na solução do problema de programação linear do estimador VAPR é encontrada em (IRVING, 1978), (FALCÃO, 1988) e (ABUR, 1990). Aplicação do método de Pontos Interiores é referenciada em (SINGH, 1997), enquanto (EL-KEID, 1992) propõe um modelo dual para a solução do problema, através de formulações acoplada e desacoplada.

### **2.2.2 Configurador da Topologia da Rede Elétrica**

A função do Configurador da Topologia da rede elétrica é determinar, em tempo real, a topologia atual da rede e a configuração de medidores, no modelo barra-ramo. Para isto, o configurador processa medidas lógicas, que são obtidas continuamente pelo sistema SCADA e que consistem em estados de chaves e disjuntores, bem como de dados armazenados em um banco de dados estático, o qual descreve as conexões dos equipamentos do sistema (geradores, transformadores, cargas, capacitores, indutores, transformadores de corrente e potencial, medidores, etc.) com correspondentes seções de barramento.

As informações disponibilizadas pelo configurador de redes são utilizadas principalmente pelo estimador de estado, mas outros aplicativos presentes em um sistema de gerenciamento de energia fazem uso destas informações, como análises de contingência, fluxos de potência para os operadores, fluxo de potência ótimo, previsão de carga por barra, dentre outros (MONTICELLI, 1999).

O configurador de redes tradicional baseia-se em algoritmos de busca em grafo e desenvolve-se normalmente em três fases (SASSON, 1973), (DY LIACCO, 1973). Na primeira fase, conhecida como Configuração de Subestação, as seções de barramento de

cada subestação são processadas, para determinar se estão conectadas por dispositivos seccionadores, chaves e/ou disjuntores. Desta forma, todas as seções de barramento envolvendo uma barra do sistema elétrico, conectadas por dispositivos seccionadores fechados, irão compor uma única barra no sistema no modelo barra-ramo. A segunda fase do processo recebe o nome de Configuração de Redes, através da qual se identificam possíveis ilhamentos no sistema elétrico de potência. Nesta fase, processam-se as barras do sistema determinadas na fase anterior, para verificar se as mesmas estão conectadas, através de seccionadores fechados, a equipamentos série. Estas conexões serão representadas como ramos do sistema elétrico, no modelo barra – ramo. A Tabulação dos Resultados é a fase final, e consiste da tabulação de todos os equipamentos conectados às barras do sistema elétrico, no modelo barra-ramo.

Quando o Configurador Topológico de Redes é utilizado para fins de estimação de estado, além da topologia da rede, o mesmo deve associar as medidas realizadas nas subestações e circuitos de transmissão de eletricidade aos devidos componentes no modelo barra – ramo. Em um configurador tradicional, o mecanismo utilizado para realizar esta tarefa pode ser interpretado como um processo de redução de rede, que é obtido realizando-se uma transformação na matriz Jacobiana, que representa o modelo do sistema elétrico em termos de seções de barramento e na matriz Jacobiana representando o modelo barra – ramo do sistema elétrico de potência, (MONTICELLI, 1999).

Depois da inicialização do Configurador de Topologia da Rede, este somente será executado novamente na ocorrência de mudança da posição dos dispositivos seccionadores.

No trabalho proposto por (ALVES DA SILVA, 1995) a identificação da modificação de topologia da rede elétrica é realizada através da aplicação de redes neurais artificiais, com um algoritmo de treinamento específico (algoritmo OET2). Neste trabalho, o autor

propõe também a aplicação das redes neurais artificiais para a solução de problemas caracterizados por incertezas a respeito da configuração topológica de determinadas áreas do sistema, ou o desconhecimento do estado de operação de chaves, podendo vir a caracterizar erros de topologia da rede para o estimador de estado. Neste intuito, a aplicação das redes neurais mostra-se mais eficiente se comparada a sistemas especialistas, uma vez que as regras processadas pelos sistemas especialistas são construídas a partir de informações locais, enquanto um classificador topológico, baseado em redes neurais artificiais, está apto a capturar relações locais e não locais entre medidas analógicas e topologias de rede, necessárias para solucionar este tipo de problema.

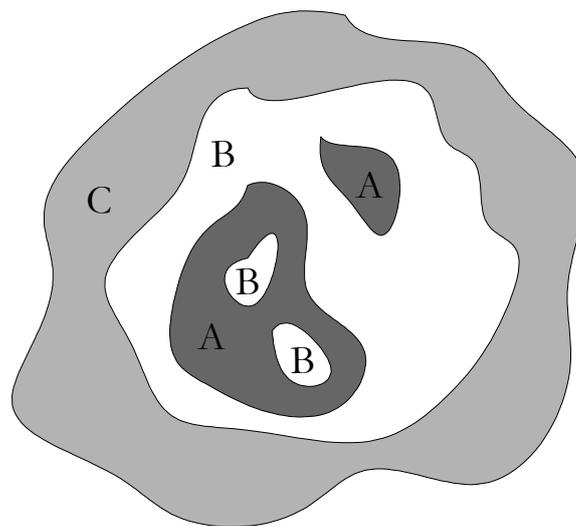
### **2.2.3 Análise de Observabilidade**

O estimador de estado tem como parte integrante uma ferramenta analítica para a análise da observabilidade do sistema elétrico, que permite determinar se um conjunto de dados obtidos em tempo real é suficiente o bastante para a realização da estimação de estado do sistema. Se o conjunto de medições é suficiente para realização da estimação de estado, diz-se que a rede elétrica é *observável*. Desta forma, observabilidade depende do número de medidores existentes na rede e de suas respectivas distribuições geográficas. Usualmente, uma rede é designada para ser observável em muitas condições de operação, entretanto, esta pode tornar-se temporariamente *não-observável*, devido à ocorrência de modificações não antecipadas na topologia da rede ou devido às falhas em equipamentos de medição e transmissão de dados para o sistema supervisor.

Uma conceituação para observabilidade do sistema elétrico pode ser assim enunciada (MONTICELLI, 2000):

“Diz-se que um sistema elétrico é observável, quando para uma determinada configuração topológica e um conjunto de medidas disponíveis, consegue-se determinar o fluxo de potência em todos os circuitos do sistema.”

A Figura 2.3 mostra uma parte de um sistema elétrico interconectado, onde são delimitadas as áreas observáveis e não-observáveis. A parte observável do sistema refere-se à área de controle de um determinado COS, embora este não seja sempre o caso, uma vez que partes do sistema podem estar, permanentemente ou temporariamente, não-observáveis. Por outro lado, partes do sistema fora da área de controle do COS são, normalmente, não-observáveis, podendo tornar-se observáveis através da medição direta de seu estado ou por meio da modelagem de pseudo-medidas para as mesmas.



- A** - Parte Observável da Rede de Interesse
- B** - Parte Não-Observável da Rede de Interesse
- C** - Resto do sistema interconectado

Figura 2.3: Observabilidade em um sistema elétrico interconectado.

A definição de pseudo-medidas para as partes não-observáveis do sistema elétrico é um ponto crucial no problema de estimação de estado, pois uma definição incorreta para as mesmas pode resultar em deterioração dos estados estimados para a rede observável. Em virtude da imprecisão existente na definição do valor das pseudo-medidas, associa-se baixas ponderações as mesmas durante o processo de estimação de estado (MONTICELLI, 2000). Pseudo-medidas são utilizadas como medidas fictícias em regiões do sistema elétrico que apresentam deficiência de pontos medição. São utilizadas também com o

intuito de elevar a redundância do conjunto de medidas, auxiliando na etapa de detecção e identificação de erros grosseiros.

Quando o sistema elétrico é classificado como não observável como um todo, mas apenas em partes deste, estas partes são denominadas ilhas observáveis. As duas regiões observáveis da Figura 2.3 representam duas ilhas de observabilidade independentes entre si. A inclusão de pseudo-medidas, em algumas partes do resto do sistema não-observável, com certo grau de redundância, pode resultar na criação de novas ilhas observáveis. Assim, pode-se dizer que o estimador de estado é utilizado para modelar a parte observável do sistema elétrico e, opcionalmente, adicionar o modelo da parte não-observável (MONTICELLI, 2000). Uma descrição aprofundada das técnicas mais frequentemente utilizadas na construção do modelo da parte não-observável do sistema é apresentado no item (2.4) deste capítulo.

Na literatura especializada, são propostas três formulações principais de algoritmos para análise de observabilidade do sistema elétrico: topológicos, numéricos e híbridos. Uma descrição destes algoritmos é apresentada em (MONTICELLI, 2000).

O problema de observabilidade topológica é tratado como um problema de configuração ou de topologia da rede, estando sujeito a problemas associados a modificações seguidas na topologia. Por envolver métodos combinatórios complexos e procedimentos lógicos, a análise topológica não é influenciada por problemas de condicionamento numérico. Clements, Krumpholz e Davis propuseram os fundamentos da teoria gráfica para análise de observabilidade em (KRUMPHOLZ, 1980), (CLEMENTS, 1981) e (CLEMENTS, 1983). De acordo com (KRUMPHOLZ, 1980), um sistema é observável, se uma árvore abrangendo todos os nós do grafo é constituída. A partir da proposta inicial de Clements, Krumpholz e Davis, diversos algoritmos para análise de observabilidade topológica foram desenvolvidos. Em (QUINTANA, 1982) e (JAIN, 2004)

é desenvolvido um algoritmo semelhante, que considera um modelo de procura da árvore de nós do grafo, de acordo com um simples gráfico de medidas. O algoritmo de (BARGIELA, 1986) é baseado na formulação original da determinação da observabilidade como um problema de fluxo na rede elétrica. O emprego da técnica de minimização da soma das ponderações, atribuídas aos ramos da árvore, que toca todos os nós de um grafo conexo, é descrito no trabalho de (BRETAS, 1996). A cada nó e ramo, com presença ou não de medidas, são associadas ponderações. Aplicações de Algoritmos Genéticos na solução do problema de observabilidade topológica são propostos em (VÁZQUES-RODRIGUEZ, 2003) e (MORI, 1991). A característica de imprecisão da função de adequação dos Algoritmos Genéticos, e a complexidade do espaço de procura em grandes sistemas de eletricidade motivaram a aplicação da referida técnica.

A análise numérica está inserida no próprio processo de estimação de estado. Embora o problema de fatoração triangular possa apresentar dificuldades numéricas, a implementação de algoritmos numéricos para observabilidade é muito mais simples, além da existência de sub-rotinas auxiliares a estes algoritmos no próprio ambiente para estimação de estado. Monticelli e Wu propuseram uma completa teoria para observabilidade numérica do sistema elétrico, baseado na fatoração triangular da matriz de ganho ( $G = H^T H$ ) do processo de estimação de estado utilizando o método de Mínimos Quadrados Ponderados, (MONTICELLI, 1985b) e (MONTICELLI, 1985c). De acordo com estes trabalhos, um sistema é observável se existe apenas um pivô nulo, na última linha e coluna da matriz de ganho com fatoração triangular, sendo que o pivô nulo associa-se à barra de referência angular do sistema. Caso se verifique a existência de mais de um pivô nulo, o sistema é dito não-observável. Isto equivale dizer, que um sistema é observável, se a matriz ganho for inversível, o que pode ser verificado durante sua fatoração pela ausência de pivôs nulos.

Muitos outros trabalhos foram apresentados a partir do trabalho inicial de Monticelli, como em (BRETAS, 1996) que propõe um algoritmo desenvolvido a partir do trabalho de Monticelli, para inclusão de um número mínimo de medidas ao sistema, de forma a torná-lo observável. A aplicação da técnica de programação linear para análise de observabilidade é descrita em (HABIBALLAH, 2001) e (FALCÃO, 1994). Na técnica proposta em (HABIBALLAH, 2001), é utilizada a matriz de conectividade da rede e a matriz Jacobiana das medições, representadas por restrições de igualdade, com toda a manipulação numérica realizada apenas com números inteiros. O trabalho de (FALCÃO, 1994) propõe uma metodologia para estimação de estado e análise de observabilidade baseada em um modelo de fatoração triangular da matriz de medições linearizada. De acordo com este trabalho, a rede é observável se nenhum pivô nulo é encontrado durante o processo de fatoração da matriz Jacobiana das medições. No citado trabalho, o autor ressalta o problema relativo ao tamanho numérico do pivô resultante da fatoração, destacando que pivôs diferentes de zero, e não muito próximos do mesmo, podem causar dificuldades numéricas no processo de estimação de estado, o que pode indicar que o sistema é não observável do ponto de vista numérico. No trabalho de (ABUR, 1993b), é realizado um estudo de observabilidade e detecção de erros grosseiros para medidas de corrente nos circuitos, propondo uma análise fasorial para determinação de topologias críticas de rede.

O algoritmo de *análise híbrida* explora as melhores características das aproximações topológicas e numéricas. Um algoritmo topológico básico é inicialmente utilizado para processar medições de fluxo e medições de injeção, para obtenção de uma ou mais ilhas observáveis, o mais extensas possível. A análise numérica é então aplicada nos sistemas reduzidos e nos nós de fronteira das ilhas observáveis determinadas pelo algoritmo topológico (MONTICELLI, 2000).

### 2.2.3.1 Determinação do Plano de Medição

A definição da área monitorada por meio de medições analógicas no sistema elétrico é um ponto de fundamental importância para a produção de boas estimativas por parte do estimador de estado. Este estudo é realizado anterior à execução do Configurador de Topologia da Rede, uma vez que as informações acerca do plano de medição são processadas no configurador de redes. O objetivo principal do planejamento do sistema de medição é determinar o número, a localização e os tipos de medidores a serem instalados, de modo que atenda as necessidades de processamento do estimador de estado, superando problemas de observabilidade, redundância e qualidade das medições.

Um ponto fundamental no processo de seleção e definição da configuração de medidores do sistema é a redundância global. A redundância do plano de medição é definida como a taxa entre o número de medidas existentes no sistema, pelo número de variáveis de estado do mesmo. Com adequada redundância, estimadores de estado podem eliminar o efeito de medições portadoras de erros grosseiros e permitir que a perda temporária de dados não afete significativamente a qualidade dos valores estimados. Problemas de detecção e eliminação de medidas portadoras de erros grosseiros são melhores solucionados em sistemas com elevada redundância. Em razão de restrições econômicas, associadas ao elevado custo para instalação de medidores para aumento da redundância, os sistemas de medição são, na prática, dotados de níveis de redundância não muito elevados.

Neste trabalho de tese não foi desenvolvida nenhuma técnica para a determinação do plano de medição, uma vez que os planos de medição considerados nas simulações realizadas, no Capítulo 4, foram extraídos de trabalhos técnicos que propõem técnicas para definição do plano de medição, ou construídos com auxílio de algum aplicativo para posicionamento de medidores e estudos de observabilidade.

O problema de construção do plano de medição de um sistema elétrico é, na verdade, um problema de otimização, que procura minimizar os custos de investimento, aliando-os a uma alocação ótima dos medidores no sistema, de forma que estes estejam, topologicamente, bem distribuídos, satisfazendo os requisitos de observabilidade. Trabalhos propondo a aplicação de técnicas tradicionais de otimização, para solução do problema de construção do plano de medição, são apresentados em (PHUA, 1977), (PARK, 1988) e (BARAN, 1995). A construção de algoritmos para seleção de medidas, através do estudo de sensibilidade das mesmas, de acordo com um critério de desempenho, é proposto em (KOGLIN, 1975), (AAM, 1983), (MAGNAGO, 1999) e (LONDON, 2001).

Uma tendência cada vez mais forte, na determinação do plano de medição da rede elétrica, está na aplicação de técnicas inteligentes. A utilização de Algoritmos Genéticos no planejamento de sistemas de medição é apresentada em (ROCHA, 2005), (DO COUTTO FILHO, 2005) e (SOUZA, 2005). A metodologia proposta, nestes trabalhos, caracteriza-se pela obtenção de uma distribuição de pontos de medição, considerando tipo, localização e número de medidores, através de um problema de otimização multi-objetivo, que incorpora requisitos de custo e redundância. No trabalho de (ROCHA, 2005), é proposta a aplicação desta técnica em redes de distribuição de eletricidade, enquanto em (DO COUTTO FILHO, 2005) é desenvolvido um método para identificação de medidas críticas com o propósito de minimizar a existência destas no plano de medição.

Aplicação de Redes Neurais Artificiais para determinação do plano de medição, considerando a adição ou eliminação sequencial de medidores, com o objetivo de minimizar o custo total de investimento, sujeito a restrições de precisão nas estimativas das variáveis de estado, é proposto em (ABBASY, 1996). Em (ANTONIO, 2001), é desenvolvido um método para posicionamento de medidores em um sistema elétrico de potência, método este baseado em uma aproximação meta-heurística. Uma simples função

objetivo é proposta, levando em conta os custos de instalação e distribuição de aparelhos de medição, com processo de minimização solucionado pela técnica *Simulated Annealing*. Outras aplicação de algoritmos heurísticos para determinação do plano de medição são propostas em (SHAFIU, 2005) e (RAKPENTHAI, 2005).

### **2.2.3.2 Medidas Críticas**

Com o propósito de garantir um monitoramento confiável e eficiente por parte do sistema de medição processado pelo estimador de estado, é de vital importância a identificação das medidas críticas associadas ao conjunto de medições. Uma medida crítica caracteriza-se por ser uma medida não redundante, cuja remoção torna o sistema não-observável. Desta forma, medidas críticas não devem ser portadoras de erros grosseiros, apesar destes também se manifestarem nestas medidas, conforme discutido em (DO COUTTO FILHO, 2001) e (DO COUTTO FILHO, 2007). O mesmo conceito de criticalidade individual de medida pode ser estendido para grupos de medidas. Conhecendo o tipo e a localização da medida crítica, é possível melhorar a confiança do conjunto de medições, adicionando outras medidas, eletricamente próximas, à medida crítica existente, transformando assim, a medida crítica em medida redundante.

O conceito de medida crítica em estimação de estado está fortemente relacionado à teoria de observabilidade do sistema. E, em consequência disto, os métodos para identificação de medidas críticas desenvolvidos, até agora, são baseados em teorias de análise de observabilidade. Um método para análise de observabilidade e identificação de medidas críticas, baseado na redução da matriz Jacobiana de medições, é apresentado em (SLUTSKER, 1987). Uma extensão do método de identificação de medidas críticas proposto em (SLUTSKER, 1987) é referenciado em (BRETAS, 1998). As vantagens levantadas nestes métodos referem-se à facilidade de implementação, baixa carga computacional e ausência de problemas combinatoriais. Em (LONDON, 2000) e

(LONDON, 2001), é proposto um algoritmo para identificação de medidas críticas e de conjuntos críticos de medidas, quando uma ou mais medidas são perdidas. O algoritmo é baseado nas relações de dependência linear das linhas da matriz Jacobiana triangular fatorada, sendo que a identificação das medidas críticas e pares críticos é realizada através da procura dos elementos não nulos, que aparecem nas colunas da matriz Jacobiana triangular fatorada. A aplicação dos conceitos de observabilidade topológica e localização de medidores para identificação de medidas críticas é proposto em (SIM, 1991).

#### **2.2.4 Tratamento de Erros Grosseiros em Medidas**

A capacidade de analisar possíveis erros nas medidas é uma das principais funções da estimação de estado. A qualidade dos resultados obtidos pela estimação de estado depende da qualidade da base de dados utilizada para processamento. A presença de medidas contendo erros grosseiros pode comprometer o processo de estimação de estado, tornando seus resultados não confiáveis. Desta forma, torna-se necessário implementar algoritmos capazes de detectar a presença de tais erros, identificar a medida portadora do erro, eliminá-la, ou, se possível, recuperá-la.

Os erros grosseiros podem ser classificados da seguinte forma (ABUR, 2004):

- Erro grosseiro único; presente em apenas uma medida de todo o conjunto de medições.

- Erros grosseiros múltiplos; presentes em mais de uma medida do conjunto de medições. Esse caso pode ser subdividido em (PEREIRA, 2008):

- Erros grosseiros não interativos: as medidas com erros grosseiros têm uma baixa correlação entre si.
- Erros grosseiros interativos e não conformativos: as medidas com erro grosseiro apresentam forte correlação. Entretanto, os erros das medidas não são consistentes entre si.

- Erros grosseiros interativos e conformativos: as medidas com erro grosseiro apresentam forte correlação e os erros são consistentes entre si. Este tipo de erro é o mais difícil de ser tratado.

No Capítulo 4, os estimadores de estado considerando restrições Fuzzy propostos neste trabalho de tese serão avaliados para situações de medidas com a presença de erros grosseiros não interativos e erros grosseiros interativos e não conformativos.

O tratamento de erros grosseiros depende do método de estimação de estado usado na implementação do estimador de estado, conforme discutido no tópico (2.2.1.2) deste capítulo. No método dos Mínimos Quadrados Ponderados, o tratamento das medidas portadoras de erro grosseiro é tradicionalmente realizado através de testes estatísticos. Para os estimadores de estado, baseados no critério de máxima verossimilhança, o tratamento de erros grosseiros é incorporado na própria etapa de cálculo do vetor de estado.

O tratamento de erros grosseiros é dividido em três fases: detecção, identificação e eliminação, ou, se possível, recuperação da medida portadora de erro grosseiro.

Na etapa de detecção de erros grosseiros no conjunto de medidas, é avaliada a influência do erro grosseiro no estado estimado. Um método com forte aceitação, proposto na literatura em (SCHWEPPE, 1970a) e (SCHWEPPE, 1970b), baseia-se no teste da distribuição  $\chi^2$  (Qui-Quadrado). Este método será discutido com maiores detalhes no próximo tópico, pois o mesmo foi implementado, neste trabalho de tese, para detecção de erros grosseiros no estimador de estado MQP. Uma alternativa para este método é o teste de detecção utilizando o resíduo normalizado, comumente empregado na identificação da medida portadora de erro grosseiro (MONTICELLI, 1999).

Após a detecção o próximo passo é a identificação da(s) medida(s) portadora(s) de erro grosseiro, e a remoção do seu efeito sobre o estado estimado do sistema. O método dos maiores resíduos normalizados têm encontrado grande aceitação, sendo formulado no

tópico (2.2.4.2). Assim como o teste da distribuição  $\chi^2$ , o teste dos maiores resíduos normalizados foi aplicado, neste trabalho de tese, para a identificação da medida portadora de erro grosseiro no estimador de estado MQP. Uma descrição completa deste método é realizada em (MONTICELLI, 1999) e (ABUR, 2004).

Uma vez detectadas e identificadas as medidas portadoras de erros grosseiros, torna-se necessária a eliminação ou recuperação destas medidas, de forma que o seu efeito seja eliminado durante o processo de estimação de estado. Vale lembrar que a eliminação de medidas pode provocar perda de observabilidade do sistema ou surgimento de medidas e conjuntos críticos, trazendo dificuldades ao estimador de estado. A recuperação do valor da medida é uma saída menos prejudicial ao processo de estimação de estado, contudo faz-se necessário o emprego de uma formulação matemática para esta finalidade. Em (PEREIRA, 2008) é mostrada a seguinte expressão para o cálculo do valor recuperado da medida.

$$z_i^{novo} = z_i^{velho} - \frac{R_{ii}}{\Omega_{ii}} r_i \quad (2.32)$$

Onde:

$z_i^{velho}$  é o valor original da medida  $i$ ;

$z_i^{novo}$  é o valor corrigido da medida  $i$ ;

$r$  é o vetor dos resíduos para o conjunto de medidas, definido por: ( $r=z-h(x)$ );

$\Omega$  é a matriz de covariância dos resíduos, com dimensão  $nm \times nm$ .

Após a remoção ou recuperação de alguma medida do conjunto total de medidas, torna-se necessário o recálculo da função de estimação de estado, para verificação da efetividade da ferramenta de pós-processamento. Isto resulta em uma diferente estimativa para o vetor de estado do sistema, ocasionando um diferente valor para a função objetivo  $J(x)$ . A função densidade de probabilidade Qui-Quadrado para  $J(x)$  deve ser também recalculada, assumindo a utilização do mesmo nível de significância do teste inicial. A

etapa de detecção é novamente processada e caso o valor de  $J(x)$  atenda o teste da distribuição  $\chi^2$ , pode-se afirmar que as medidas portadoras de erros grosseiros foram efetivamente detectadas, identificadas e removidas.

Conforme descrito em (ABUR, 2004), o critério para identificação de múltiplos erros grosseiros, considera a aplicação sucessiva do critério dos maiores resíduos normalizados, removendo uma medida portadora de erro grosseiro a cada etapa de execução do processo de eliminação de erros grosseiros. Contudo, algumas variantes deste método têm sido propostas, relacionadas principalmente ao método de solução do sistema de equações lineares que estiver sendo utilizado. A aplicação de um modelo reduzido para o processamento de múltiplos erros grosseiros, com base na decomposição da matriz Jacobiana do problema de estimação de estado, é proposto em (KORRES, 1991). Este método permite que os erros grosseiros sejam isolados em pequenas regiões do sistema, evitando uma procura por erros grosseiros no sistema elétrico por completo. (KOTIUGA, 1982), (FALCÃO, 1988) e (ABUR, 1990) detalham o tratamento de erros grosseiros no método do Menor Valor Absoluto Ponderado dos Resíduos. Em (ASADA, 2002) e (ASADA, 2004) é proposta uma metodologia para identificação de erros grosseiros baseada na Busca Tabu. Este método permite identificar erros múltiplos e conformativos, sendo estes tratados como um problema de otimização combinatória, a qual se aproxima da técnica de *branch and bound* (MONTICELLI, 1986), contudo com maior dinamismo e flexibilidade.

Um completo estudo comparativo entre diferentes métodos de tratamento de erros grosseiros, para todos os tipos de erros verificados em um processo de estimação de estado, e para modelos de estimadores de estado quadráticos e não quadráticos é apresentada em (HANDSCHIN, 1975). Outra análise comparativa das técnicas de identificação de erros grosseiros foi realizada por Mili em (MILI, 1985).

### 2.2.4.1 Método do Teste de Hipóteses baseado no Índice de Performance $J(x)$

Este método, utilizado para a detecção de medidas portadoras de erros grosseiros, baseia-se na análise da função objetivo  $J(x)$ , sendo esta definida de acordo com o modelo de estimação de estado considerado.

Na ausência de erros grosseiros, o índice de performance  $J(x)$ , definido na equação (2.5), é uma variável aleatória que pode ser aproximada por uma distribuição  $\chi^2$  (Qui-Quadrada). Na prática, a distribuição Qui-Quadrado pode ser aproximada pela distribuição Normal. O teste de hipóteses da função objetivo é assim definido.

$$J(x) > \chi_{nm - ne, \alpha}^2 \quad (2.33)$$

Onde:

$\alpha$  é a probabilidade de falso alarme, ou seja, é a probabilidade de indicar que existe erro grosseiro quando na realidade não existe.

$ne$  é o número de variáveis de estados do sistema.

$nm$  é o número de medidas.

A diferença  $nm - ne$  define o grau de liberdade da distribuição  $\chi^2$ .

Para realizar o teste  $J(x)$  as seguintes hipóteses são formuladas (MONTICELLI, 1999):

1) Se  $E\{J(x)\} = nm - ne$ , então, não existem medidas com erros grosseiros.

2) Se  $E\{J(x)\} > nm - ne$ , então, existem medidas com erros grosseiros.

Se  $J(x) > \chi_{nm - ne, \alpha}^2$ , a hipótese 2 deve ser aceita, considerando um risco  $\alpha$  de falso alarme. Caso contrário, a hipótese 1 deve ser aceita.

#### 2.2.4.2 Método dos Maiores Resíduos Normalizados

A técnica dos maiores resíduos normalizados, utilizada, principalmente, para a identificação de medidas portadoras de erros grosseiros é definida na equação (2.34). O resíduo normalizado,  $r_{N_i}$ , é definido para medidas não críticas, como sendo (ABUR, 2004):

$$r_{N_i} = |r_i| \sqrt{\Omega_{ii}^{-1}} \quad (2.34)$$

O termo  $\Omega$  é calculado a partir da relação abaixo. Vale ressaltar, que na expressão para o cálculo de  $r_{N_i}$ , o termo  $\Omega_{ii}$  representa a diagonal de  $\Omega$ .

$$\Omega = SR \quad (2.35)$$

Com cálculo de  $S$  definido por:

$$S = I - HG^{-1}H'R^{-1} \quad (2.36)$$

Onde:

$I$  é uma matriz identidade;

$H$  é a matriz Jacobiana do problema de estimação de estado;

$G$  é a matriz Ganho, calculada conforme definido na equação (2.12);

$R$  é a matriz de covariância dos erros de medição;

$S$  é a matriz de sensibilidade dos resíduos, com dimensão  $nm \times nm$ .

Em um conjunto de medidas, a medida portadora de erro grosseiro é aquela que apresenta o maior resíduo normalizado.

O emprego do resíduo normalizado  $r_N$  para a detecção da presença de erro grosseiro é formulado pela distribuição Qui-Quadrado. Calculado o vetor de resíduos normalizados, o mesmo é submetido ao seguinte teste de validação para detecção de erros grosseiros:

$$|r_N|_K > \gamma \quad (2.37)$$

Onde:

$\gamma$  é o nível limite de detecção de um falso alarme, definido por uma distribuição  $\chi^2$ .

Se o resíduo normalizado, de uma medida  $k$  qualquer, satisfizer a condição dada em (2.37), isto indicará a presença de erros grosseiros nesta medida.

### **2.2.4.3 Tratamento de Erros Topológicos**

A execução das etapas de cálculo do vetor de estado e análise de observabilidade baseiam-se na topologia da rede elétrica levantada à priori. Caso ocorra algum erro topológico que não tenha sido detectado pelo Configurador de Redes, este pode causar um aumento nos resíduos das medidas analógicas, localizadas nas vizinhanças dos elementos erroneamente configurados do sistema. Assim, as medidas com elevados resíduos são identificadas como portadoras de erros grosseiros. Desta forma, medidas analógicas serão eliminadas durante a etapa de pós-processamento, podendo reduzir o nível de redundância local no sistema. Logo, não será mais detectado erro grosseiro em medidas analógicas, mas o erro topológico continuará presente. Consequentemente, o modelo do sistema não representará corretamente a situação real de operação. O tratamento adequado dos erros de topologia ainda constituem um desafio na área de estimação de estado.

Os erros topológicos podem ser de dois tipos: simples e múltiplos. Erros topológicos do tipo simples ocorrem no caso de apenas um elemento mal configurado; já os erros múltiplos surgem quando mais de um elemento da rede elétrica constituem erros de configuração (LEÃO, 1990).

Erros topológicos do tipo simples são subdivididos em erros topológicos de inclusão e erros topológicos de exclusão. Nos erros topológicos de inclusão, o elemento não está em operação, mas é configurado na rede elétrica. Nos erros topológicos de exclusão, tem-se a situação oposta, ou seja, um elemento da rede elétrica está em operação, mas não é configurado.

Os erros topológicos do tipo múltiplos são caracterizados por uma combinação de erros de inclusão e exclusão. O erro topológico múltiplo resulta na exclusão (ou inclusão) de barras conectadas (ou desconectadas) ao sistema elétrico, alterando o número total de barras e, conseqüentemente, o número de variáveis de estado do problema de estimação de estado (LEÃO, 1990).

Uma série de métodos destinados à identificação de erros topológicos, baseados na análise dos resíduos de medição, têm sido propostos na literatura especializada, com a denominação de métodos de pós-processamento. Estes métodos permitem determinar as subestações suspeitas de estarem erroneamente configuradas. As subestações suspeitas são aquelas localizadas nas vizinhanças das medidas analógicas com elevados resíduos, sendo a estas atribuído um tratamento especial (WU, 1989). Pelo fato de dependerem de uma estimação de estado inicial, este método está fortemente atrelado à convergência do estimador de estado. Contudo, a convergência é ameaçada na presença de erros grosseiros em medidas, e, na presença de erros topológicos, esta torna-se ainda mais complicada. Além disto, mesmo com a convergência, a análise dos resíduos de estimação pode ser totalmente inviável, em virtude do efeito de espalhamento dos resíduos (MILI, 1985).

Com o intuito de contornar os problemas verificados nos métodos de pós-processamento, foram desenvolvidos métodos que não exigem uma estimação de estado inicial, denominados de métodos de pré-processamento. De acordo com esta linha de pesquisa, (BONANOMI, 1983) apresentou um método baseado em um procedimento de busca, através do grafo do sistema, enquanto (SINGH, 1991) propôs um método que utiliza um banco de informações sobre o sistema e que não depende das características deste, tentando assim reproduzir a análise que seria realizada por um operador do sistema elétrico. A aplicação de testes de hipótese para identificação de erros de topologia,

utilizando os multiplicadores de Lagrange normalizados, com aplicação em sistemas de distribuição de eletricidade, é apresentada em (PEREIRA, 2001b).

O desenvolvimento dos estimadores de estado generalizados, a partir do trabalho de Alsaç (ALSAÇ, 1998) e (MONTICELLI, 1999), permitiu a modelagem das subestações suspeitas de estarem com erros topológicos ao nível de seção de barramento. Para atender este objetivo, são adicionados ao vetor de estado convencional, formado pela magnitudes e ângulos da tensão complexa, novas variáveis de estado, caracterizadas pelo fluxo de potência ativa e reativa, através dos disjuntores e circuitos, cujos parâmetros serão estimados. Pseudo-medidas também podem ser introduzidas ao estimador generalizado, permitindo uma melhor discriminação entre erros grosseiros, topológicos e de parâmetros. Em virtude da grande quantidade de informações envolvidas no processo de estimação generalizada de estado, tal estimador pode se tornar inviável para aplicações em tempo real. Desta forma, sugere-se a sua utilização apenas em situações especiais, em que existe a suspeita de erros topológicos ou de parâmetros (ALSAÇ, 1998).

Vale ressaltar que o estimador de estado generalizado não substitui o Configurador de Redes, pois o objetivo deste estimador não é configurar a rede elétrica, mas sim corrigir possíveis erros de configuração topológica (VEMPATI, 2005).

Outros trabalhos foram publicados sobre os estimadores de estado generalizados, como em (ABUR, 1994) que modela um estimador de estado generalizado a partir de um problema de estimação de estado baseado no Menor Valor Absoluto Ponderado dos Resíduos. (GOMEZ-EXPÓSITO, 2001) propõe uma redução significativa no número de conectores que devem ser tratados como variáveis de estado através do emprego das leis de Kirchhoff, reduzindo assim o tamanho do problema e permitindo a representação de todas as subestações do sistema de uma só vez. Em (ASADA, 2004) é proposto um modelo de estimação de estado generalizada com representação explícita das subestações. Este

método é formulado como um problema de análise combinatória, através da meta heurística Busca Tabu, sendo utilizado para o tratamento de erros grosseiros e erros topológicos, além de permitir uma busca inteligente que resulta em uma redução da carga computacional.

### **2.3 MODELAGEM DA REDE ELÉTRICA EXTERNA EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE ELETRICIDADE**

Os resultados da aplicação de ferramentas, para avaliação da segurança em tempo real, em sistemas elétricos de potência, são altamente influenciados pelo modelo de fluxo de potência construído para o sistema elétrico de interesse. Em geral, os sistemas de transmissão são representados por uma rede interna, representada pela área de controle da empresa elétrica em questão, e por uma rede externa, representada pelo sistema elétrico das empresas vizinhas ou por regiões não monitoradas do próprio sistema. A rede interna representa a porção observável do sistema elétrico, enquanto as partes não observáveis são a rede externa. A Figura 2.4 ilustra esta situação, em que a área de controle de uma determinada empresa elétrica é definida pela Área 1, enquanto a Área 2 representa uma empresa vizinha interconectada com a mesma. A Área 1 é totalmente observável, com dados da rede elétrica definidos por  $x_I$ , conjunto de medidas por  $z_I$ , e com as suas medidas modeladas pela matriz  $H_I$ . A rede externa é, por sua vez, não observável, pois informações como medições na área externa  $z_E$  e parâmetros da rede  $x_E$  são, em sua grande maioria, desconhecidos para o centro de operação presente na Área 1. As barras ilustradas nas áreas 1 e 2 da Figura 2.4 constituem barras de fronteira entre áreas, sendo que  $x_F$ ,  $z_F$  e  $H_F$ , dividido em  $H_{FI}$  e  $H_{FE}$ , representam, respectivamente, os dados de rede para as barras de fronteira e linhas de interligação, o conjunto de medidas disponível na rede interna e externa para as suas barras e linhas de fronteira, e o modelo adotado para o conjunto de medidas presentes nesta região. A qualidade do modelo considerado para a rede externa é

fortemente influenciada pela exatidão das medidas de  $z_E$  e  $z_F$ . As informações contidas em  $z_E$  podem ser caracterizadas por algumas medições disponíveis na rede externa ou, principalmente, por pseudo-medidas com valor determinado a partir de informações qualitativas disponibilizadas acerca da rede externa.  $H_E$  representa o modelo das medidas ou pseudo-medidas consideradas para a rede externa.

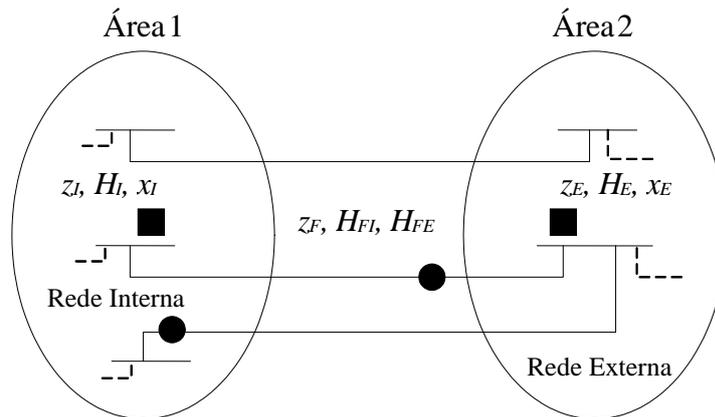


Figura 2.4: Decomposição de uma rede elétrica em sistema interno e externo.

Um sistema de potência, tipicamente, representa uma pequena parte de uma grande rede elétrica interconectada, com operação afetada pela ocorrência de contingências na área externa do sistema de potência ou devido às reações na área externa de suas próprias contingências. A qualidade do modelo, representando porções da rede elétrica, está relacionada diretamente com a utilidade e eficiência das funções de análise de segurança em tempo real. No propósito de se garantir uma análise de segurança em tempo real confiável, uma completa solução de ambos os modelos, da rede interna e externa, se faz necessária.

Tradicionalmente, a determinação do estado operacional da rede interna é feita através da execução de um estimador de estado, que processa, simultaneamente, informações de um conjunto redundante de medidas em tempo real, e de informações dos parâmetros elétricos do sistema. Por vários anos, a reação do sistema externo foi representada, exclusivamente, através dos chamados equivalentes externos, baseados em

modelos reduzidos do sistema externo e conectados às barras de fronteira entre os sistemas externo e interno (ALLEMONG, 1982). O primeiro equivalente considerado para representação do sistema externo foi o Equivalente de Ward, surgindo, a partir deste, variações ou novas metodologias, como o Equivalente de Ward Estendido ou Equivalente REI. Em (MONTICELLI, 1983) é apresentada a formulação teórica e matemática de todos os modelos de equivalentes de redes mencionados.

Com os avanços verificados no campo da informática e transmitidos aos COS's, viabilizou-se o uso das representações explícitas ou não reduzidas para o sistema externo, em lugar dos equivalentes externos. Atualmente, várias limitações são atribuídas aos equivalentes externos, como a sua incapacidade em representar adequadamente as mudanças nas condições de operação da rede externa, exigindo freqüentes atualizações do equivalente; além da impossibilidade de se utilizar dados oriundos do sistema de medição. Outra crítica recente está relacionada às dificuldades de modelar eventos importantes no sistema externo, por exemplo, saída de linhas, transformadores ou unidades geradoras, e assim poder avaliar o impacto destes eventos no sistema interno. Estes problemas, aliado aos avanços computacionais, levaram a crescente adoção de modelos não-reduzidos para o sistema externo.

Uma descrição de um modelo reduzido para a rede externa, que procura garantir um compromisso aceitável entre o equivalente e a rede externa não reduzida é apresentada em (WU, 1983) e (MONTICELLI, 1985a). O ponto principal deste trabalho é a divisão da rede externa em duas outras redes externas. Uma rede externa, eletricamente próxima à rede interna, cuja operação apresenta impacto significativo na rede interna, sendo tratada por um modelo não reduzido; e uma rede externa, cuja operação não tem efeito na rede interna, sendo modelada por uma rede equivalente, com o propósito de reduzir o impacto computacional. A definição das porções da rede externa a serem representadas por

modelos reduzidos ou não, podem ser estabelecidas através de estudos *off-line*, usando análises de fluxo de potência/contingências ou análise de sensibilidade.

Um modelo não reduzido ou explícito para o sistema externo nada mais é do que um modelo do fluxo de potência, definido pela topologia e parâmetros das linhas de transmissão e transformadores do sistema externo, levando em consideração dados oriundos de previsão de carga/geração, e valores definidos por estudos *off-line*. A grande vantagem da representação explícita da rede externa é a possibilidade de se modelar com fidelidade eventos importantes que ocorram no sistema externo e que podem ter grande impacto sobre o sistema interno. Em contrapartida, como desvantagens, podem-se destacar um maior requisito computacional, em virtude do aumento da dimensão do problema de estimação de estado, pela inclusão do sistema externo; e a necessidade de manutenção permanente do modelo externo, que requer um índice razoável de interação entre as empresas elétricas vizinhas. Para uma modelagem da rede externa, baseada na utilização de modelos não reduzidos, e conseqüente construção do modelo de fluxo de potência total da rede elétrica, rede interna mais rede externa, três aproximações principais têm sido propostas: 1) Método do Fluxo de Potência, (BOSE, 1984), (BOSE, 1986) e (BUNCH Jr., 1984); 2) Método da estimação de estado em um passo, (GEISLER, 1983), (GEISLER, 1985), (KIM, 1996) e (PATEL, 2006); 3) Método da estimação de estado em dois passos, (PATEL, 2006) , (LU, 1990) e (KORRES, 2002).

Pelo método do fluxo de potência resolve-se, para a rede externa, um fluxo de potência tratando as barras de vizinhança entre as redes como barras de referência, sendo que os valores das magnitudes e ângulos das tensões, considerados para estas barras, são obtidos a partir do resultado da estimação de estado para o sistema interno. Em (BUNCH Jr., 1984) é mencionado que os métodos de modelagem baseados no fluxo de potência mostram-se mais numericamente estáveis que os métodos baseados em estimadores de

estado MQP, especialmente para redes com elevadas representações externas. Porém, o método do fluxo de potência pode apresentar deficiências associadas aos elevados resíduos nas barras de fronteira entre as redes interna e externa, além de necessitar de re-execução para alcançar uma solução aceitável.

O método da estimação de estado em um passo executa um único estimador de estado para a rede externa e interna, em que pseudo-medidas de injeção são utilizadas para tornar a rede externa observável, sendo suas ponderações ajustadas com o propósito de dispersar erros sobre a rede externa. No método da estimação de estado em um passo, injeções nulas nos barramentos são representadas como restrições de igualdade e não como medidas de injeção nula. Dados de previsões de carga, gerações e tensões na parte não observável da rede são ajustados para refletir a condição real de operação da rede interna e modelados como pseudo-medidas. Alguns valores de medidas disponíveis na rede externa são efetivamente utilizados no processo de estimação de estado. Problemas nos ajustes das ponderações das pseudo-medidas e o uso excessivo de medidas de injeção podem ocasionar problemas numéricos ou demandar maior carga computacional. O uso excessivo de pseudo-medidas de injeção podem também resultar em matrizes mal condicionadas, ocasionando não convergência do estimador de estado em um passo, conforme descrito em (KATO, 1994). Instabilidade numérica pode ser reduzida usando algoritmos computacionais com maiores recursos, como os métodos Ortogonais (SIMÕES-COSTA, 1981) e método de Hachtel (GJELSVIK, 1985). No método da estimação de estado em um passo se considera a aplicação de ferramentas de pós-processamento para detecção, identificação e remoção de medidas portadoras de erros grosseiros, devendo se atentar a aplicação destas ferramentas, pois a remoção de medidas portadoras de erros grosseiros da rede externa afeta a exatidão da estimação de estado da rede interna.

O método da estimação de estado em dois passos procura evitar os problemas de convergência e tratamento de erros grosseiros verificados no método da estimação de estado em um passo. Neste método, resolve-se um estimador de estado, inicialmente, para a rede interna, considerando a aplicação de ferramentas de detecção e identificação de medidas portadoras de erros grosseiros. A solução para a parte não observável da rede elétrica é obtida em dois estágios. Primeiramente, os dados de previsão de carga/geração e tensões nas barras de geração são ajustados para a construção do conjunto de pseudo-medidas de injeção e tensão para a rede externa. Um problema de fluxo de potência é utilizado para calcular o fluxo de potência nas linhas da rede externa, considerando as barras de fronteira com a rede interna como barras de referência e o conjunto de pseudo-medidas de injeção e tensão nas barras de carga e/ou geração. No segundo estágio, os modelos interno e externo da rede elétrica são agrupados, considerando as magnitudes de tensão e os fluxos de potência estimados no primeiro estágio para a rede interna, o conjunto de pseudo-medidas construídas para as barras de fronteira; as injeções nulas de potência existentes na rede interna e redes externas; as possíveis medições existentes na rede externa e os fluxos de potência nas linhas da rede externa calculados previamente. Problemas numéricos em virtude do ajuste das ponderações das medidas da rede interna e externa e pseudo-medidas também são verificados neste método. Contudo, este problema é minimizado através da atribuição de diferentes ponderações para as informações oriundas da rede interna e externa.

Instabilidade numérica, ou mesmo divergência, tem sido verificada em todas as técnicas de modelagem da rede externa baseadas no método da estimação de estado. Este fato é verificado para situações em que o valor da pseudo-medida, empregada com o propósito de restaurar a observabilidade de uma rede elétrica, é incorretamente definido. Alternativas de representação das pseudo-medidas, considerando as incertezas existentes

na definição das mesmas, utilizando conjuntos Fuzzy, mostra-se uma boa solução para a atenuação ou eliminação deste problema.

Em (KATO, 1994) é realizada uma discussão sobre experiências práticas recentes em modelagem da rede externa para um número extenso de companhias de eletricidade, ilustrando a aplicação das três aproximações principais de modelagem. Um estudo comparativo entre os métodos de modelagem da rede externa, baseado na estimação de estado em um passo e em dois passos, é apresentada em (PATEL, 2006). Neste trabalho, o autor procura verificar o efeito da contaminação do estado estimado para a rede interna em função do modelo considerado para a representação da rede externa, sendo que os resultados mostraram um menor impacto no estado estimado para a rede interna, quando se considera o método de estimação de estado em dois passos, apesar deste demandar maior carga computacional. (GEISLER, 1983) também realiza um estudo comparativo entre as técnicas do fluxo de potência e da estimação de estado em um passo para a modelagem da rede elétrica externa. Inúmeras vantagens são listas para o método da estimação de estado, dentre elas flexibilidade na solução, habilidade na detecção de erros, sensibilidade e redução do erro nas barras de fronteira entre redes.

Uma metodologia para a modelagem da rede elétrica externa, baseada somente na utilização de um conjunto de medidas pré-selecionadas da rede externa, é proposta em (KIM, 1996). O autor propõe uma análise de sensibilidade baseada na seleção das medidas da rede externa, cuja mudança em seus valores altera, significativamente, o fluxo de potência nas linhas da rede interna. As medidas selecionadas da rede externa são disponibilizadas e atualizadas em tempo real para o processo de estimação de estado, sendo integradas às medidas da rede interna. Um único estimador de estado é solucionado, considerando as medidas da rede interna e externa simultaneamente. Os resíduos normalizados, calculados a partir do resultado da estimação de estado, são utilizados para a

construção de uma matriz de sensibilidade para as linhas e aplicados na detecção de erros topológicos na rede externa. A idéia central do trabalho de (KIM, 1996) é monitorar a rede externa vizinha a partir de uma fração de medições disponibilizadas em tempo real, contudo esta técnica tem se mostrado de difícil aplicação, pois a quantidade de medidas disponíveis na rede externa pode ser muito baixa, não garantindo um nível de observabilidade aceitável para a mesma. Caso as medições selecionadas da rede externa não sejam atualizadas em tempo real, a precisão da estimação de estado para o sistema interno irá se deteriorar.

Um método particionado para modelagem da rede externa em tempo real, considerando um modelo não-reduzido da rede externa e a utilização da estimação de estado em dois passos é proposto em (KORRES, 2002). O método é baseado no modelo desacoplado rápido entre as potências ativa e reativa, e na seleção de um conjunto de medidas críticas com o intuito de minimizar o efeito de dados incoerentes da rede externa para a rede interna, e os resíduos nas barras de fronteira entre redes. A adoção de medidas críticas parte do princípio de que a presença de um erro grosseiro, neste tipo de medida, não afeta o resultado da estimação de estado para as redes interna e externa. Desta forma, procura-se identificar o maior número possível de medidas críticas para representação das barras de fronteira entre a rede externa e interna. No trabalho de (LU, 1990) é apresentada uma aproximação para modelagem da rede externa que combina a utilização do fluxo de potência com a técnica de estimação de estado. O fluxo de potência fornece uma solução preliminar para a rede externa, sendo prosseguido pela execução de um estimador de estado com o propósito de refinar a solução obtida previamente. Os resíduos nas barras de fronteira são minimizados através do emprego de medições avaliadas na rede externa ou por meio pseudo-medidas construídas com base em informações tabeladas e computadas usando fatores de distribuição. Pseudo-medidas inclusas na rede não observável, na

segunda etapa, procuram manter a solução estável e melhorar a eficiência computacional, sendo estas pseudo-medidas construídas com base no resultado do problema de fluxo de potência executado anteriormente. Métodos para detecção de ilhas não observáveis, durante o processo de modelagem da rede externa, também são descritos. O emprego de pseudo-medidas de injeção de potência, nas barras eletricamente próximas às barras de fronteira, tem como objetivo dispersar os resíduos das barras de fronteira para a rede externa. Contudo, o método sugerido necessita de que o número de pseudo-medidas de injeção seja mantido no mínimo, de forma que se garanta a estabilidade numérica.

O trabalho de (RAHIMI, 1996) presta uma importante contribuição, pois endereça o problema de modelagem da rede externa de uma forma diferenciada, desenvolvendo um roteiro teórico para modelagem da rede externa e intercâmbio de dados entre empresas elétricas vizinhas, de acordo com os resultados de um projeto desenvolvido pelo EPRI, USA. A metodologia geral é desenvolvida a partir dos resultados verificados pela aplicação do conjunto de ferramentas que auxiliam a operação de sistemas elétricos, suplementada por análises subseqüentes e simulações. O roteiro ressalta o problema de identificação da topologia da rede externa, definição da quantidade de medidas analógicas, representação de pseudo-medidas na rede externa e pseudo-medidas de injeção em barras de fronteira, e o problema de intercâmbio de informações entre empresas elétricas vizinhas. Um roteiro para a construção, teste, implementação e atualização do modelo da rede externa também é apresentado.

Aplicações de técnicas inteligentes na modelagem da rede elétrica externa em sistemas de transmissão são referidos em (LU, 1994) e (PAVIC, 2001). A representação das incertezas no problema de modelagem da rede externa, utilizando conjuntos Fuzzy, é apresentada em (LU, 1994). Neste trabalho, são considerados os seguintes dados para a modelagem da rede externa: possíveis medidas analógicas avaliadas, fluxos de potência

nas linhas de fronteira entre redes e valores tabelados dos níveis de tensão e injeções de potência na rede externa, levantados por meio da aplicação de ferramentas computacionais de suporte a decisão ou através do conhecimento humano, sendo caracterizados por imprecisões modeladas por conjuntos Fuzzy. O processo de modelagem da rede externa começa pela determinação de injeções nos barramentos da rede externa, sendo que injeções em barramentos de carga são construídas a partir de grupos de carga e fatores de distribuição, enquanto as injeções em barras de geração são levantadas utilizando um algoritmo de despacho econômico. Um fluxo de potência é utilizado para a obtenção de uma solução inicial para a rede externa e barras de fronteira, considerando as barras de fronteira entre redes como barras de referência, os valores dos fluxos de potência nas linhas de fronteira e valores tabelados para as injeções de potência e tensões. Caso todos os intervalos de confiança para as injeções, fluxos de potência e tensões sejam atendidos, o processo de modelagem da rede externa é encerrado. Caso se verifique elevados resíduos, um problema de programação linear Fuzzy é aplicado com o propósito de ajustar as injeções de potência representadas por conjuntos Fuzzy, de forma que os intervalos de confiança sejam atendidos quando um problema de fluxo de potência é re-executado. No problema de programação linear Fuzzy as grandezas modeladas por conjuntos Fuzzy são representadas por restrições de desigualdade, com formulação para solução do problema de programação linear Fuzzy definido em (ZIMMERMAN, 1984). O ponto fundamental deste trabalho está na obtenção de uma solução aceitável para a rede externa, não a solução real, uma vez que o estado da rede externa é desconhecido e sem referência de comparação.

Uma aplicação das redes neurais artificiais na modelagem da rede elétrica externa é apresentada em (PAVIC, 2001). As redes neurais artificiais, com algoritmo de aprendizagem do tipo retro propagação dos erros, é utilizada para representação da rede externa, sendo alimentada por dados dos circuitos e dados de medição na rede interna e

linhas terminais, e dados básicos da característica do estado de operação da rede externa. Cuidado deve ser tomado na preparação dos dados para o processo de treinamento da rede neural. Diferentes redes neurais são construídas para a representação da rede externa sob diferentes condições de carregamento, evitando assim que o processo de treinamento seja muito prolongado.

O emprego da inovadora técnica de medição de fasores sincronizados para a modelagem da rede elétrica externa é descrita em (ZHAO, 2005). O método, proposto neste trabalho, assume que cada área tem o seu próprio estimador de estado, que processa o conjunto de medidas avaliadas localmente. Cada estimador de estado, localizado em cada área, pode usar diferentes algoritmos de solução, estruturas de dados e funções de pós-processamento para identificação e detecção de medidas portadoras de erros grosseiros. O estimador de estado de cada área é requerido para fornecer apenas o estado estimado de sua rede de cobertura para o coordenador central, operando independentemente, sem compartilhamento de dados com as redes elétricas vizinhas ou com o coordenador central. Não existe intercâmbio de informações entre áreas vizinhas. O coordenador central proposto é uma entidade na qual se acessa a solução da estimação de estado de cada área, as medições nas linhas de fronteira entre áreas e as medições fasoriais sincronizadas existentes em todas as áreas, com algoritmo de solução por mínimos quadrados ponderados (MQP). Isto permite a detecção, identificação e correção das medidas portadoras de erros grosseiros na área de fronteira entre redes. O emprego da medição fasorial sincronizada no estimador de estado localizado no coordenador central eleva a redundância do sistema de medição, assegurando uma melhoria significativa na confiança e exatidão dos estados estimados.

## **2.4 ESTIMAÇÃO DE ESTADO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Os sistemas de distribuição de eletricidade têm sofrido profundas modificações em sua estrutura e na forma como os serviços prestados são encarados. A necessidade de uma contínua melhoria na qualidade do serviço prestado, aliada ao surgimento de centros produtores ligados às redes de distribuição e o ambiente competitivo, determinou aumento de investimentos nas redes de distribuição de eletricidade e, notadamente, na automatização e desenvolvimento de sistemas de gestão da sua operação.

Os sistemas de distribuição de eletricidade começaram por se desenvolver a partir das redes de transmissão de energia elétrica. Várias características dos sistemas de transmissão foram preservadas nas redes de distribuição, entretanto, em virtude do desequilíbrio de carga verificado nestas redes, muitas peculiaridades surgiram.

As redes de distribuição de eletricidade são, em primeiro lugar, redes de grande dimensão, que se encontram diretamente ligadas a consumidores e, mais recentemente, a uma variedade de centros produtores, em geral, não controlados por um centro de controle da operação. Em segundo, trata-se de redes que são usualmente exploradas de forma radial, embora, a possibilidade de re-configuração seja elevada. Acresce que a topologia em operação é alterada com alguma frequência, ao contrário do que ocorre nos sistemas de transmissão, em que a estrutura topológica considerada, geralmente, é estabilizada. Por último, nas redes de distribuição existem poucas medições físicas das grandezas de interesse à operação, mesmo com a crescente automatização verificada nos últimos anos. Uma descrição detalhada das redes de distribuição de eletricidade e das diferentes metodologias empregadas para avaliação das mesmas é encontrada em (KAGAN, 2005).

Para uma melhor representação das redes de distribuição de eletricidade é requerido o desenvolvimento de novas metodologias que levem em conta características específicas

das mesmas. O emprego de ferramentas de auxílio à operação e mais, especificamente, a aplicação de estudos de estimação de estado, utilizando os modelos tradicionais, pode ficar comprometido em razão da insuficiência de pontos de medição analógica ao longo das redes de distribuição. Tipicamente, nas redes de distribuição de eletricidade são encontradas medidas analógicas apenas na subestação abaixadora, de conexão ao sistema de transmissão de eletricidade. Circuitos e cargas usualmente não são monitorados, ocorrendo o mesmo em muitas subestações em baixa tensão. Uma incerteza generalizada é verificada sobre a potência demandada e sobre o carregamento dos circuitos ao longo dos alimentadores das rede de distribuição.

A partir da década de 90, várias transformações passaram a ser verificadas nos centros de operação das redes de distribuição, como descrito em (HE, 2000) e (ROYTELMAN, 1993). Com a maior disponibilidade de informações de operação, seja por monitoramento dos circuitos de distribuição ou através de estudos *off-line*, tornou-se crescente a necessidade da implantação de novas tecnologias que atendam adequadamente aos requisitos de supervisão, automação e controle em tempo real. A implementação de estimadores de estado, em centros de controle de redes de distribuição de eletricidade, representa um ponto primordial no intuito de atender estes requisitos; contudo estes devem estar aptos a considerar as peculiaridades existentes nestas redes. Recentemente, alguns países europeus e os Estados Unidos adotaram esquemas de tarifação para remuneração das companhias de eletricidade, pelo uso de suas redes de distribuição, baseadas em valores de fluxo de energia ou em potências médias. Isto significa que estes valores devem ser medidos ou estimados de alguma forma, o que resulta em importância adicional para o desenvolvimento de modelos precisos de estimação de estado nas redes de distribuição de eletricidade, desde que os seus resultados possam influenciar, diretamente, no fluxo de dinheiro entre consumidores e fornecedores de serviços.

A migração de algoritmos de estimação de estado, tradicionalmente utilizados em sistemas de transmissão, para redes de distribuição de eletricidade, encontra diversos empecilhos, como enumerados em (PEREIRA, 2000), podendo ser assim listados:

- Nos sistemas de transmissão de eletricidade existe um elevado número de tele-medidas de tempo real, conduzindo a um nível aceitável de redundância para os algoritmos de estimação de estado. Nas redes de distribuição, verifica-se um baixo grau de automação, manifestado na insuficiência de tele-medidas disponibilizadas em tempo real aos centros de controle, dificultando a implementação de estimadores de estado nestas redes;

- Redes de distribuição de eletricidade são muito mais extensas que as redes de transmissão, impondo novos desafios de desempenho computacional aos módulos de software para aplicações em tempo real;

- Nas redes de distribuição existem, de forma mais freqüente que nas redes de transmissão, alterações da topologia da rede em operação. A ação dos aparelhos de chaveamento conduz a modificações topológicas que acarretam em incertezas nos centros de operação. Dependendo do nível de automação do centro de controle da rede de distribuição, o operador não será capaz de identificar a modificação topológica. Por esta razão, a topologia da rede de distribuição não pode ser considerada fixa para os estimadores de estado, sob pena dos valores estimados não representarem o estado da real topologia;

- Adiciona-se que, nas redes de distribuição, as medidas disponíveis se referem, em geral, à intensidades de corrente, às medidas nas saídas das subestações de redes primárias de distribuição; ao contrário do verificado nos sistemas de transmissão. Por esta razão, exige-se alguma adaptação nos algoritmos existentes de forma a integrar este tipo de medida;

- A qualidade e precisão dos aparelhos de medição e transmissão de dados, e das conseqüentes medidas disponíveis para estimação de estado, constitui outro desafio a ser contornado nos algoritmos.

Aliado a todos os fatores anteriormente mencionados, deve-se ainda citar os problemas de modelagem, tradicionalmente verificados, para as redes de distribuição de energia elétrica, como:

- Desequilíbrio de carga entre as fases dos condutores nas redes de distribuição, o que acarreta a exigência da utilização de modelos trifásicos da rede para representação destas;

- Diversidade das cargas a serem atendidas;

- Radialidade dos alimentadores de distribuição de eletricidade;

- Presença de redes subterrâneas com maior frequência que nos sistemas de transmissão.

Grande parte dos trabalhos, até então propostos para a estimação de estado em redes de distribuição, baseia-se no processamento de informações compostas por um conjunto de medidas analógicas, nem sempre disponíveis em tempo real nestas redes, e de um conjunto de pseudo-medidas inseridas com o propósito de tornar a rede observável. Pseudo-medidas são dependentes de modelos obtidos a partir de estudos *off-line*, como estudos de previsão de carga ou a partir do caso base do sistema. Em muitas situações estas não representam adequadamente as condições de operação verificadas em tempo-real.

Na literatura especializada, são encontrados trabalhos propondo a utilização de modelos monofásicos ou trifásicos para representação das redes de distribuição nos estudos de estimação de estado, representação de medidas de corrente no algoritmo de estimação de estado e utilização de dados estocásticos ou estimativas para modelagem das pseudo-medidas. Uma revisão dos principais trabalhos sobre estimação de estado em redes de distribuição de eletricidade, abordando as propostas acima mencionadas, será apresentado

a seguir. Em grande parte dos trabalhos, considera-se o emprego de algoritmo de estimação de estado baseado no Método dos Mínimos Quadrados Ponderados.

Uma metodologia para estimação de estado, em redes de distribuição de eletricidade, considerando a presença de um número mínimo de pontos remotos de medição, é descrita em (ROYTELMAN, 1993). A aproximação utilizada para representação da rede de distribuição baseia-se na Lei de Kirchoff das correntes, com valores de possíveis medições de potência convertidos em valores de corrente. Informação topológica da rede de distribuição é necessária para aplicação da metodologia desenvolvida, sendo esta determinada previamente ao processo de estimação de estado. Modelos estatísticos das condições de carregamento são representados no processo de estimação como pseudo-medidas, sendo construídos através de informações disponibilizadas pelos consumidores, como tipo de carga, potência nominal, energia consumida, distribuição de carga nos transformadores e periodicidades da carga. Um ponto negativo, neste algoritmo, está na elevada dependência da existência de medidas ou pseudo-medidas ao longo do alimentador, como medidas de fluxo de potência ativa e reativa em transformadores. Em aplicações práticas estas informações não são, geralmente, disponibilizadas.

Baran e Kelley, em (BARAN, 1994), apresenta o desenvolvimento de um método trifásico de estimação de estado para aumentar a exatidão dos dados obtidos a partir de um procedimento de previsão de carga, que são normalmente utilizados para monitoração em tempo real de alimentadores de distribuição. Esta idéia é aprofundada em (BARAN, 1995). O método considera o algoritmo de Mínimos Quadrados Ponderados, aplicado a uma formulação nodal trifásica. Os elementos da matriz Jacobiana são constantes durante o processo iterativo, em decorrência das linearizações inseridas no modelo. Algumas medições de magnitude de corrente nos ramos do alimentador também são consideradas no processo de estimação de estado. A principal dificuldade com medições de magnitude de

corrente nos ramos, alegada pelos autores, reside no fato dos termos correspondentes às mesmas, na matriz Jacobiana, não poderem ser aproximados por termos constantes. Um melhor tratamento para as medições de corrente em um algoritmo trifásico de estimação de estado é apresentado em (BARAN, 1995). Outro problema verificado no método proposto é a impossibilidade de linearização do modelo para alimentadores muito carregados.

Com o propósito de manter os elementos da matriz Jacobiana invariáveis com as iterações, (LU, 1995) apresentou uma formulação de um estimador de estado trifásico para redes de distribuição de eletricidade, utilizando uma modelagem baseada em injeção de corrente, em coordenadas retangulares. Neste caso, as medições de potência são transformadas em medições equivalentes de corrente. O método das Equações Normais, aplicado ao MQP, é empregado para a estimação dos estados em tempo real para o sistema de distribuição, modelados em função das coordenadas de fase *a-b-c*. Novamente, o algoritmo proposto mostra-se dependente de um número elevado de medições em tempo real ao longo do alimentador.

O tratamento adotado em (LI, 1996) requer um modelo estocástico das cargas, o qual é influenciado pelas condições temporais e climáticas. A formulação baseia-se em uma modelagem trifásica da rede de distribuição e das medições, e na utilização do método dos Mínimos Quadrados Ponderados. O trabalho realiza um estudo sobre a influência no estado estimado para o valor e posição das medidas disponibilizadas em tempo real, e para os erros na definição das pseudo-medidas. O autor ressalta que melhorias, na exatidão das estimativas do estimador de estado trifásico proposto, podem ser alcançadas com o emprego de modelos mais exatos para representação das cargas, em conjunto com uma localização ótima dos medidores e a substituição de medidas de magnitude de tensão por medidas de fluxo de potência nos ramos.

Em (MELIPOULOS, 1996), apresenta-se um algoritmo para cálculo trifásico de fluxo de carga e estimação de estado em redes de distribuição de eletricidade. Tanto no cálculo do fluxo de carga trifásico, quanto na estimação de estado, é demonstrada uma preocupação particular com as cargas distribuídas ao longo do alimentador. Assim como em (LU, 1995), as modelagens, para o fluxo de carga e para o estimador de estado, são baseadas em injeções de corrente trifásicas em coordenadas cartesianas, o que resulta em uma formulação linear para modelagem das medidas no estimador de estado e convergência em uma iteração no processo de solução. O algoritmo, proposto para estimação de estado, pressupõe a existência de um sistema de supervisão sincronizado, com várias medições fasoriais de tensão e corrente, disponibilizadas pelos relés localizados ao longo do alimentador. A sincronização das medições fasoriais é realizada com o auxílio de GPS (*Global Position System*).

Um algoritmo, para análise de fluxo de potência e estimação de estado, considerando a radialidade dos alimentadores de distribuição de eletricidade, é descrito em (ZHANG, 1997). O método proposto considera uma formulação monofásica para a rede, modificando o método de Newton para inclusão da radialidade, sem reduzir o tamanho do problema. A matriz Jacobiana é representada na forma  $UDU^T$ , onde  $U$  é uma matriz triangular superior, dependendo somente da topologia do sistema, e  $D$  uma matriz diagonal associada à estrutura radial e às propriedades especiais das redes de distribuição. A representação da matriz Jacobiana na forma  $UDU^T$  é realizada através de um algoritmo iterativo, em que as derivadas das equações de fluxo e injeções de potência não são usadas. Os termos da matriz Jacobiana são calculados a partir das leis de Kirchoff para corrente e tensão, aliviando problemas de mau condicionamento verificados na matriz Jacobiana e na fatoração LU.

Em (GHOSH, 1997), é proposta uma aproximação alternativa para estimação de estado em redes de distribuição de eletricidade, usando uma extensão probabilística do algoritmo de fluxo de potência radial, com medidas em tempo real modeladas como restrições. As estatísticas dos estados são calculadas, usando uma formulação probabilística para as equações que modelam as medidas e pseudo-medidas, em que as variáveis de estado são modeladas por números aleatórios. O algoritmo proposto, para a estimação de estado, pode ser separado em duas partes: uma seção determinística, na qual se calcula os valores esperados dos estados, e uma seção probabilística, que determina as variâncias dos estados estimados na seção determinística. Os resultados alcançados são comparados com os fornecidos por simulações aplicando o método de Monte Carlo.

Um algoritmo, baseado na técnica de soma de potências ao longo do alimentador, desenvolvido em (CESPEDES, 1990), para aplicação em redes de distribuição primárias, é apresentado em (MEDEIROS, 2002) e (MEDEIROS, 2003). Na primeira etapa deste algoritmo, são estimados a tensão, os fluxos de potência ativa e reativa injetados no barramento da subestação, e os fluxos de potência ativa e reativa nos circuitos terminais dos alimentadores. Na segunda etapa, define-se um alimentador dentro do conjunto total de alimentadores, e, a partir das grandezas já estimadas na primeira etapa e de pseudo-medidas de potência ativa e reativa modeladas para alguns barramentos, realiza-se a estimação de estado para todos os barramentos do alimentador. O algoritmo ilustrado em (MEDEIROS, 2002) apresenta uma deficiência em sua modelagem, pois considera um conjunto de hipóteses de linearização da rede, como cargas equilibradas nas três fases do alimentador.

Uma forte tendência, nos trabalhos mais recentes sobre estimação de estado em redes de distribuição de eletricidade, é o desenvolvimento de modelos híbridos, que combinam aproximações tradicionais com técnicas inteligentes. Neste sentido, Pereira e Miranda têm

apresentado uma série de trabalhos que propõem um novo modelo de estimação de estado para redes de distribuição de eletricidade, representando imprecisões e informações qualitativas das condições de potência da carga nos barramentos, utilizando para tanto os conceitos da teoria dos conjuntos Fuzzy. Nos trabalhos de (MIRANDA, 1995), (MIRANDA, 2000), (PEREIRA, 1995), (PEREIRA, 1999), (PEREIRA, 2000) e (PEREIRA, 2001a) esta idéia é desenvolvida e aprimorada, incluindo ao modelo as ferramentas de processamento da topologia da rede e detecção e identificação de medidas portadoras de erros grosseiros. O algoritmo de cálculo do vetor de estado, com presença de medidas imprecisas, aplicado nos trabalhos acima mencionados, resolve o problema de estimação em duas etapas. Inicialmente, na primeira fase do método, resolve-se um problema de cálculo do vetor de estado através da utilização de um algoritmo de cálculo determinístico, aplicando o método das Equações Normais, baseado no método dos Mínimos Quadrados Ponderados. Nesta fase, cada uma das medidas imprecisas é substituída por medidas reais, definidas pelo valor central de cada número impreciso. Na segunda fase do algoritmo, são calculadas as faixas de imprecisão das variáveis de estado estimadas na primeira fase, considerando a álgebra Fuzzy no cálculo dos desvios das estimativas.

O trabalho de (PEREIRA, 2001a) apresenta a versão mais aprimorada do estimador de estado descrito nos trabalhos mencionados no parágrafo anterior, pois além de permitir o cálculo do vetor de estado, possibilita também a identificação da topologia de operação da rede. As incertezas na topologia são tratadas considerando variáveis contínuas que, no entanto, se encontram restringidas aos valores binários de 0 e 1. Para este efeito, incluem-se restrições no modelo que forçam as variáveis contínuas a assumir este comportamento. Estas restrições conduzem a perturbações no modelo, que são suavizadas com auxílio de

um sistema de inferência que, com base em informação de localização das variáveis, atribui uma ponderação a cada variável.

(SARIC, 2003) propõe também um estimador de estado e fluxo de potência, integrando lógica Fuzzy para aplicação em sistemas de distribuição de eletricidade. A influência de dados históricos e a participação das categorias de consumidores na curva de carga são descritas, usando notação Fuzzy, e com solução inicial de um estimador de carga Fuzzy, que fornece dados de carregamento para um problema de fluxo de potência Fuzzy para redes de distribuição. Através do fluxo de potência Fuzzy, são calculados os intervalos de confiança para as correntes de carga e fatores de potência, sendo estes, em geral, maiores que os intervalos de confiança obtidos, utilizando medidas reais das correntes nos circuitos. Para a redução da incerteza das correntes de carga nos circuitos, o autor propõe um estimador corretivo Fuzzy para a corrente de carga, sendo que a saída deste, pode ser Fuzzy, representada por um conjunto de pontos discretos para os diferentes intervalos de confiança, ou defuzzificada, através da regra do centróide (ZIMMERMAN, 1984).

Aplicações de algoritmos híbridos para solução de problemas envolvidos no processo de estimação de estado em redes de distribuição, considerando o emprego de outras técnicas inteligentes, podem ser encontradas em (ROCHA, 2005) e (ANTONIO, 2001). Ambos os trabalhos abordam o problema de alocação de pontos de medição para supervisão de redes de distribuição como sendo um problema de otimização. Em (ANTONIO, 2001) o problema de otimização é resolvido, empregando a técnica de Simulated Annealing, enquanto que em (ROCHA, 2005) se considera a utilização dos Algoritmos Genéticos.

---

---

# CAPÍTULO 3

---

## REPRESENTAÇÃO DE RESTRICÇÕES FUZZY NO PROBLEMA DE ESTIMAÇÃO DE ESTADO

---

### 3.1 INTRODUÇÃO

A lógica Fuzzy ou “difusa” foi originalmente desenvolvida por Lotfi Zadeh (ZIMMERMAN, 1984). Esta pode ser definida como uma técnica inteligente com objetivo de modelar o modo aproximado de raciocínio, reproduzindo a habilidade humana de tomar decisões em um ambiente de incerteza e imprecisão, permitindo que informações imprecisas, descritas em linguagem natural, sejam convertidas para um formato numérico.

Muitos problemas em sistemas de potência, caracterizados pela presença de dados incertos, vagos ou que levam em conta aspectos qualitativos, têm encontrado uma modelagem mais realista na teoria dos conjuntos de natureza Fuzzy. Um elevado número de publicações indica a grande aplicabilidade que a teoria Fuzzy tem encontrado na solução de problemas de controle, operação, manejo e planejamento de sistemas elétricos de potência. Aplicações da teoria Fuzzy, em sistemas de potência, podem ser encontradas em (HIYAMA, 1999) e (EL-HAWARY, 1998) onde é descrito o estado corrente das aplicações Fuzzy, assim como, exemplos práticos de aplicação em algumas áreas da engenharia de potência, tais como: monitoramento e diagnóstico das condições de equipamentos, chaveamento de aparelhos FACTS, estabilizadores de sistemas de potência,

otimização da geração, comissionamento de unidades, tomada de decisões em mercados de energia a curto prazo, previsão de carga, planejamento de sistemas de potência a longo e médio prazo, avaliação da segurança dinâmica e modelagem da rede elétrica por meio de fluxos de potência ou estimadores de estado.

Em (HENRIQUES, 2003) é proposta uma técnica para a redução de perdas técnicas e comerciais em redes de distribuição de eletricidade utilizando técnicas inteligentes. Uma metodologia baseada em redes neurais artificiais e conjuntos Fuzzy é aplicada para a estimação e localização de perdas comerciais, com o objetivo da identificação de fraudes, erros de cadastro, etc. Para a reconfiguração ótima da rede de distribuição, visando a redução das perdas técnicas, são aplicados algoritmos genéticos. A estimação da demanda, em (HENRIQUES, 2003), é realizada através do emprego de programação linear Fuzzy, em que não se considera um modelo explícito para a rede, e as incertezas existentes nos dados de previsão são consideradas como números Fuzzy. Outras aplicações de conjuntos Fuzzy, na estimação de estado em redes de distribuição de eletricidade, são apresentados em (SARIC, 2003), (LU, 1994) e nos trabalhos de Miranda e Pereira. Uma análise detalhada destes trabalhos foi realizada no item (2.4) do Capítulo 2.

Aplicações da teoria Fuzzy, em sistemas de potência, podem ser ainda encontradas na solução de problemas de fluxo de potência ótimo, utilizando a técnica de programação linear, (MIRANDA, 1992); controle de tensão e fluxo de potência reativa (TOMSOVIC, 1992); modelagem de fluxos de potência Fuzzy para aplicação em redes de distribuição de eletricidade, (MIRANDA, 1989), identificação de faltas shunt em sistemas de potência para proteção digital a longa distância (DAS, 2005), entre outras. Uma completa revisão bibliográfica das aplicações práticas de conjuntos Fuzzy em sistemas elétricos de potência, no período compreendido entre 1994 e 2001, ilustrando as aplicações acima mencionadas e outras mais, é realizada em (BANSAL, 2003).

Alguns autores têm proposto a solução de um problema com presença de grandezas Fuzzy através da aplicação de técnicas de regressão linear. Usualmente, modelos de regressão referem-se a um conjunto de métodos nos quais as estimativas são feitas para os parâmetros do modelo, a partir de um conjunto de dados de entrada – saída, procurando encontrar um modelo matemático apropriado que permita determinar o melhor ajuste para os coeficientes do modelo envolvendo o conjunto de dados fornecidos. Nos métodos convencionais de regressão, desvios entre os valores observados e estimados são devido a erros de observação. A representação de grandezas Fuzzy, no problema de regressão, admite que os desvios entre os valores observados e estimados são devido a imprecisões ou lacunas na estrutura do sistema. Em (TANAKA, 1982), é proposto um método para representação de informações de natureza vaga ou imprecisa, aplicando funções lineares Fuzzy ao modelo de regressão linear, com parâmetros Fuzzy modelados por funções de pertinência triangulares e com aplicação em diferentes campos da engenharia. Outra alternativa para o problema de regressão Fuzzy, considerando modelos lineares Fuzzy com funções de pertinência triangulares, simétricas ou não, é formulado em (SABYASACHI, 1997). Neste trabalho, o objetivo da regressão linear Fuzzy é encontrar a saída para todo o conjunto de dados.

### **3.2 REPRESENTAÇÃO DE CONJUNTOS FUZZY NO PROBLEMA DE ESTIMAÇÃO DE ESTADO EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA**

O emprego da teoria dos conjuntos de natureza Fuzzy, na solução de um problema de estimação de estado, permite que medições com elevado grau de imprecisão ou pseudo-medidas sejam definidas a partir do conhecimento qualitativo do comportamento do sistema elétrico. Muitos sistemas caracterizam-se pela quase total ausência de medições ao longo da sua rede, como sistemas de distribuição de energia elétrica e redes externas a

sistemas de transmissão. Contudo, em inúmeras situações, informações qualitativas ou de conhecimento de valores típicos de operação, que permitiriam a adoção de uma modelagem de natureza Fuzzy para o problema de estimação de estado nestes sistemas, é disponibilizada. Assim, informações qualitativas sobre a rede elétrica são utilizadas como dados para o problema de cálculo do vetor de estado, juntamente com os dados da rede elétrica e as medidas analógicas.

A informação qualitativa, convertida em número impreciso, em conjunção com os valores analógicos das medidas e informações topológicas da rede, constituem-se nos dados disponíveis para a estimação de estado, em que a técnica de solução empregada para o cálculo do vetor de estado varia de acordo com a formulação adotada. (PEREIRA, 1995) propõe um estimador de estado Fuzzy solucionado em duas etapas, sendo a primeira etapa resolvida como um problema de MQP convencional, enquanto na segunda etapa é realizada uma fuzzyficação do resultado da primeira etapa de acordo com funções de pertinência pré-definidas. Em (MIRANDA, 2000) é proposto um estimador de estado Fuzzy, para solução do problema de alocação de carga em um sistema de distribuição, com as cargas modeladas como números imprecisos e o estimador solucionado de acordo com a técnica proposta em (PEREIRA, 1995). Uma extensão do modelo proposto em (PEREIRA, 1995) para aplicação em redes de distribuição de eletricidade, integrando informações topológicas no problema de estimação de estado, descritas pelo estado das chaves, é apresentada em (PEREIRA, 1997) e (PEREIRA, 1999). (PEREIRA, 2001a) propõe um estimador de estado MQP com presença de números imprecisos, conjugado ao emprego de sistemas de inferência Fuzzy para tratamento de erros topológicos.

(LABUDDA, 1994) propõe uma aproximação para a estimação de estado em sistemas de potência, utilizando conjuntos Fuzzy e otimização multi-objetivo, através de programação linear Fuzzy. Ao contrário das técnicas de estimação de estado existentes, o

método proposto trata os resíduos de medição como múltiplas funções objetivo competitivas. Funções de pertinência lineares são construídas representando o grau de satisfação com relação a cada medição; e a estimação global é expressa em termos da maximização da soma das funções de pertinência lineares individuais. A seleção dos parâmetros das funções de pertinência é acompanhada pela adaptação de algumas técnicas de otimização com restrições ao problema de estimação de estado. Os resultados alcançados mostram uma robustez no estimador Fuzzy linear, se comparado aos estimadores de estado VAPR, quando na presença de erros grosseiros em medidas caracterizadas por pontos de alavancagem. A principal limitação do estimador de estado Fuzzy linear proposto está no elevado esforço computacional envolvido na determinação dos limites de cada resíduo, para cada função de pertinência, sendo necessária a execução de um número elevado de problemas de programação linear, de acordo com o número de medições consideradas no sistema.

Uma seqüência ao trabalho de (LABUDDA, 1994) é apresentada em (SHAHIDEHPOUR, 2004), contudo, neste trabalho, o autor propõe a aplicação de um estimador de estado baseado no Mínimo Quadrado da Mediana do Resíduo (*LMS*) para a determinação dos limites dos resíduos de estimação relativos as imprecisões das medidas, seguida da solução do problema de estimação de estado através da aplicação de um estimador Fuzzy, baseado na soma dos Valores Absolutos dos Resíduos (*VAR*), para a eliminação de medidas portadoras de erros grosseiros. O valor dos limites dos resíduos para o estimador Fuzzy *VAR* são determinados a partir do conjunto de resíduos modulares do estimador *LMS*. O objetivo do estimador de estado Fuzzy *LMS* + *VAR* é melhorar a precisão do estimador *LMS*, uma vez que estes estimadores apresentam exatidão reduzida para um número limitado de amostras e na presença de erros grosseiros em medidas. Possíveis erros de estimação, devido a erros nos limites dos resíduos obtidos na primeira

etapa, são tratados pelo estimador Fuzzy VAR. Em relação ao estimador proposto em (LABUDDA, 1994), o estimador Fuzzy LMS + VAR demanda de menor esforço computacional para a solução do problema de estimação de estado, pois os valores dos estados iniciais para o estimador Fuzzy VAR já estão próximos aos valores verdadeiros, consequência da solução do estimador LMS. Robustez à presença de erros grosseiros em medidas caracterizadas por pontos de alavancagem também é verificada no estimador de estado proposto neste trabalho, sendo este um ponto forte do mesmo.

Um método para a análise de incertezas no processo de estimação de estado, associada à precisão dos medidores, é proposto em (AL-OTHMAN, 2005a) e (AL-OTHMAN, 2005b). Nestes trabalhos, o autor propõe a determinação dos intervalos de incerteza das variáveis de estado do problema, ângulos e magnitudes de tensão, através da solução de dois problemas de otimização, sendo que o intervalo inferior da incerteza é obtido solucionando um problema de minimização, enquanto que o intervalo superior é obtido solucionando um problema de maximização. Em (AL-OTHMAN, 2005a), o autor propõe uma linearização para as equações das medidas, conforme realizado no método de Newton Raphson, sendo que os intervalos de incerteza das variáveis de estado são determinados, resolvendo-se uma seqüência de problemas de programação linear. Em (AL-OTHMAN, 2005b), é proposto uma técnica semelhante para a determinação dos intervalos de incerteza das variáveis de estado, porém considerando um modelo não linearizado para as medidas, o que resulta em um problema de programação não linear, solucionado através da técnica de programação seqüencial quadrática. Nestes dois trabalhos, a incerteza das medidas associada à precisão dos aparelhos de medição, é modelada como restrições de canalização, da forma:  $Z_{inf} \leq H(x) \leq Z_{sup}$ . O valor central ou estimado da variável de estado é obtido através da solução de um estimador de estado MQP. As técnicas propostas para a determinação dos intervalos de incerteza em (AL-OTHMAN, 2005a) e (AL-

OTHMAN, 2005b) apresentam o inconveniente de necessitar da solução de dois problemas de otimização, em separado, para estimação dos intervalos inferiores e superiores das variáveis de estado. Estas técnicas de estimação dos intervalos de incerteza também se mostram altamente sensíveis à presença de erros grosseiros no conjunto de medições, uma vez que a presença de algum erro grosseiro torna o problema de estimação das incertezas insensível. O autor propõe que se realize, anteriormente à determinação dos intervalos de incerteza, uma detecção e eliminação das medidas portadoras de erros grosseiros. Outras técnicas para a determinação de incertezas associadas ao problema de estimação de estado são descritas em (BARGIELA, 2003), sendo que, neste trabalho, o autor propõe uma aproximação mais realística para a representação dos ruídos de medição no problema de estimação de estado. (BARGIELA, 2003) descreve uma técnica não linear para a estimação do intervalo de incerteza, técnica esta baseada no método de Monte Carlo e três técnicas lineares, baseadas em Programação Linear, Fronteira Elipsoidal e Matriz de Sensibilidade, aplicadas a um modelo de sistema linearizado. A técnica de Monte Carlo mostra-se, computacionalmente, ineficiente, apesar de ser a mais precisa e não necessitar de simplificações no modelo. As técnicas lineares, apesar das simplificações adotadas, conduzem para estimativas do intervalo de incerteza das variáveis de estado bastante aceitáveis, sendo que a melhor situação, com relação a precisão da estimação e a eficiência computacional, são verificadas no método da Matriz de Sensibilidade. Dentre as técnicas lineares, a técnica baseada em Programação Linear produz as melhores estimativas para os intervalos de incerteza das variáveis de estado, contudo demanda de um maior esforço computacional para a solução do problema. A técnica da Fronteira Elipsoidal, apesar de demandar uma baixa carga computacional, produz estimativas conservadoras para os limites de incerteza, além de mostrar-se sensível à ordem de processamento das restrições.

Em (LAYNE, 1996), é apresentado um estimador de estado Fuzzy dinâmico, com solução de um sistema linear, com funções de pertinência de formato Gaussiano, o que resulta em um estimador com características análogas àqueles que utilizam filtro de Kalman. Aplicações de conjuntos Fuzzy para identificação da topologia da rede elétrica e processamento de más medições, no problema de estimação de estado, é descrita em (SINGH, 2005). Neste trabalho, o autor propõe um técnica de reconhecimento de padrões Fuzzy para identificação da topologia da rede elétrica e a conseqüente configuração de medidas analógicas para o processo de estimação de estado, e identificação de más medições. A identificação da topologia e das medidas portadoras de erros grosseiros é realizada através da diferença entre o vetor de padrões Fuzzy e os dados de medidas analógicas. Os erros grosseiros e erros topológicos são corrigidos pelo vetor de padrões Fuzzy, melhorando a exatidão e performance dos convencionais estimadores de estado, baseados no método dos mínimos quadrados ponderados (MQP). Exemplificações e proposições sobre o processo de estimação de estado com presença de conjuntos Fuzzy podem ser ainda encontradas em (MIRANDA, 1995), (PEREIRA, 2000) e (SHABANI, 1996).

### **3.3 REPRESENTAÇÃO DE INFORMAÇÕES QUALITATIVAS POR CONJUNTOS FUZZY**

A representação de informações qualitativas no problema de estimação de estado, em inúmeras situações, é de fundamental importância para o processo de estimação de estado, em um sistema de energia elétrica, como se observa em situações caracterizadas por: ocorrência de indisponibilidade de unidades terminais remotas de medição, perda de dados no sistema de transmissão de informações, elevada eliminação de dados através de processos de detecção, identificação e filtragem de erros grosseiros; ou mesmo

simplesmente para enriquecer o processo de estimação de estado com informações adicionais.

Consideremos a rede elétrica ilustrada na Figura 3.1. A não existência de medidas nos consumidores dos barramentos 5, 6 e 7 torna a rede não observável, impossibilitando a estimação do vetor de estado de todo o sistema. A disponibilidade de informações adicionais sobre os barramentos 5, 6 e 7, representada sob a forma de informações qualitativas ou valores típicos de operação, possibilitaria a construção de funções de pertinência, representando pseudo-medidas Fuzzy, que inseridas no problema de estimação de estado, tornariam a rede elétrica totalmente observável.

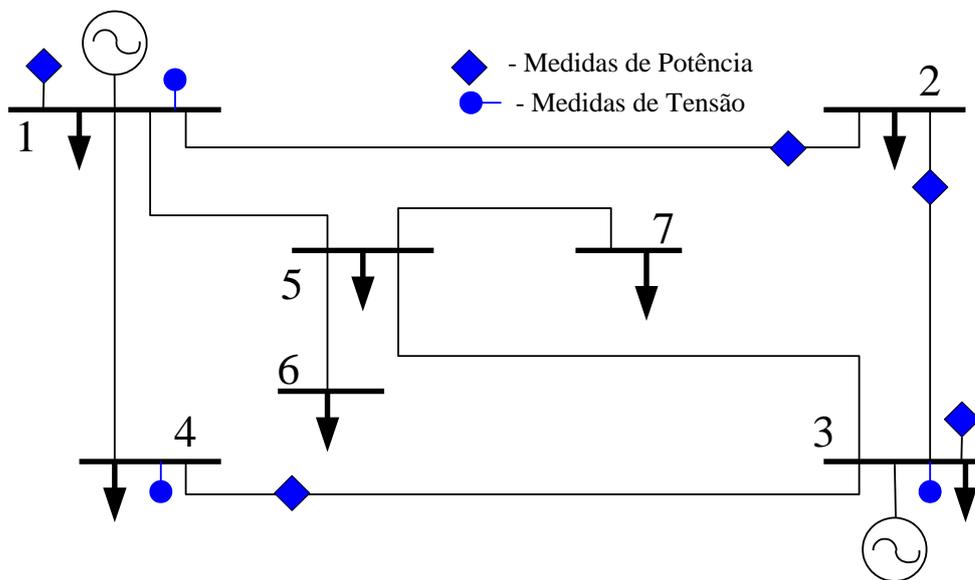


Figura 3.1: Rede elétrica com sistema de medição.

Informações qualitativas ou valores típicos de operação podem ser assim exemplificados:

“O carregamento previsto para a barra 7 é, aproximadamente, 20 MW”;

“O fluxo de potência ativa na linha entre os barramentos 5 e 6 varia de 12 MW a 17 MW, de acordo com o regime de carregamento, sendo que em situação normal de operação vale 14 MW”;

“O valor ideal para a tensão nos barramentos 5, 6 e 7 seria de 1.01 p.u., 1.0 p.u. e 1.0 p.u., respectivamente, porém tais valores apresentam uma faixa de variação de 0.05 p.u. de acordo com o regime de carregamento”.

A partir destas informações qualitativas, números Fuzzy, representados por funções de pertinência, podem ser construídos. A Figura 3.2 ilustra a construção de funções de pertinência com formatos trapezoidais para a representação das informações qualitativas acima. Nesta figura, o primeiro gráfico refere-se à primeira afirmação, o segundo gráfico à segunda afirmação, e o terceiro e o quarto gráficos à terceira afirmação. As funções de pertinência podem ser simétricas ou não em relação ao valor central, sendo seu formato definido pela informação qualitativa associada.

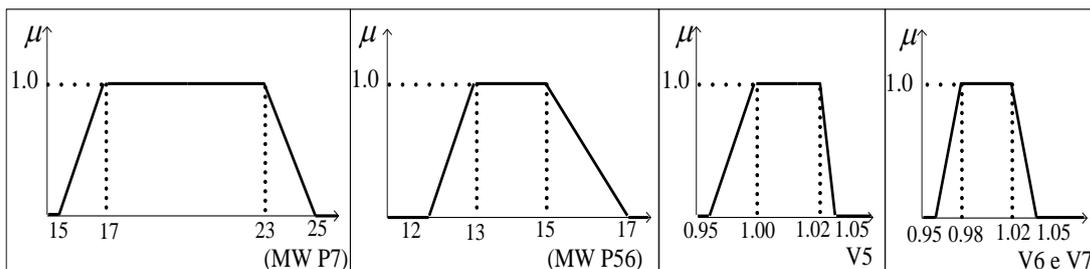


Figura 3.2: Funções de pertinência para as três informações qualitativas acima descritas.

Ao contrário do processo usual verificado na literatura especializada, as pseudo-medidas Fuzzy podem ser inseridas no problema de estimação como restrições Fuzzy de desigualdade, com problema do cálculo do vetor de estado resolvido como um problema de programação Fuzzy. De acordo com o tipo de algoritmo de programação Fuzzy resolvido no cálculo do vetor de estado, diferentes estimadores de estado, considerando restrições Fuzzy, podem ser desenvolvidos. Independentemente do tipo de algoritmo de programação Fuzzy resolvido, a representação das restrições de desigualdade relativa às pseudo-medidas Fuzzy, no problema de estimação de estado, é sempre efetuada de forma semelhante. A

construção das funções de pertinência para as pseudo-medidas Fuzzy independem também do algoritmo de programação Fuzzy considerado.

A adoção da técnica de programação Fuzzy, para solução do problema do cálculo do vetor de estado em ambiente Fuzzy, mostra-se mais vantajosa e simples que a solução baseada em aritmética Fuzzy, podendo ser resolvida como um problema de programação linear ou não-linear convencional, com inserção de uma variável extra ao problema,  $\lambda$ .

Em (PEREIRA, 2000), é descrito um fluxo de potência, auxiliar a um estimador de cargas, que utiliza conjuntos Fuzzy e aplica aritmética Fuzzy para determinação do estado do sistema, sendo o mesmo utilizado para a solução do problema de reconfiguração de redes de distribuição de eletricidade. Tal técnica poderia ser expandida para o problema de estimação de estado, uma vez que o conjunto de equações trabalhadas em ambos os problemas são similares.

Os seguintes estimadores de estado foram desenvolvidos a partir dos algoritmos de programação Fuzzy:

- Estimadores de estado, considerando restrições Fuzzy e aplicando programação linear Fuzzy, com função objetivo simétrica;
- Estimadores de estado, considerando restrições Fuzzy e aplicando programação linear Fuzzy, com função objetivo não - simétrica;
- Estimadores de estado, considerando restrições Fuzzy e aplicando programação quadrática Fuzzy, com função objetivo não – simétrica.

### **3.4 ESTIMADORES DE ESTADO APLICANDO PROGRAMAÇÃO LINEAR FUZZY**

Os estimadores de estado, aplicando programação linear Fuzzy para o cálculo do vetor de estado, consideram grande parte da formulação do estimador de estado VAPR,

descrito no Capítulo 2 item (2.2.1.2.2), em sua modelagem. Desta forma, procuramos incorporar as vantagens dos estimadores de estado, baseados na soma dos Valores Absolutos Ponderados dos Resíduos (VAPR), como tratamento de erros grosseiros em muitas situações, durante o cálculo do vetor de estado, estabilidade e eficiência. Estas características foram levantadas em (FALCÃO, 1982), (FALCÃO, 1988), (ABUR, 1990), (ABUR, 1991) e (ABUR, 1993a), e apresentadas no tópico (2.2.1.2.2).

Os modelos de programação linear Fuzzy, com função objetivo simétrica ou não simétrica, considerados nos dois estimadores de estado Fuzzy lineares, são descritos no Apêndice A, item A.3.1 e A.3.2. Em ambos os modelos, a função objetivo do problema de estimação de estado Fuzzy e o conjunto de restrições de igualdade e desigualdade, são lineares. O cálculo do vetor de estado é obtido através da solução de uma seqüência de problemas de programação linear. Algoritmos SIMPLEX ou de Pontos Interiores Primal-Dual, conforme descrito em (LINS, 2006) podem ser utilizados para a solução do problema de programação linear.

Na formulação dos estimadores de estado aplicando programação linear Fuzzy, as seguintes premissas são adotadas:

- a) As equações das pseudo-medidas Fuzzy e a função objetivo do problema de estimação VAPR convencional são representadas por relações Fuzzy, sendo transformadas em restrições de desigualdade no problema;
- b) As equações das medidas analógicas e pseudo-medidas Crisps são representadas por restrições de igualdade no problema;
- c) Restrição de desigualdade linear para a função objetivo do problema VAPR convencional.

### 3.4.1 Formulação Matemática do Estimadores de Estado Aplicando Programação Linear Fuzzy com Função Objetivo Simétrica

A partir da equação (2.26), descrita no Capítulo 2, item (2.2.1.2.2), constroeu-se a formulação matemática para o estimador de estado, aplicando programação linear Fuzzy, com função objetivo simétrica, PLFS. A equação (3.1) representa a formulação matemática matricial linearizada para este estimador de estado, em que o termo  $B$  representa a matriz do conjunto de restrições de desigualdade do problema; e  $x^k$  se refere ao conjunto de variáveis de estado do problema, na iteração  $k$ ,  $(V^k, \Theta^k, \lambda^k)$ . O valor do sinal matemático que precede o termo  $B$  é determinado de acordo com o formato da função de pertinência, sendo que a definição correta do sinal é descrita no item (3.6) deste capítulo. O parâmetro  $p$  é escolhido subjetivamente de forma a indicar um intervalo permissível de violação das restrições das grandezas Fuzzy ou da função objetivo do problema de estimação de estado VAPR fuzzificada. O parâmetro  $d$  representa o limite inferior do intervalo de tolerância da função de pertinência.

$$\begin{aligned} \max \text{ imizar } & \lambda & (3.1) \\ \text{sujeito a } & \Delta z = H(x^k) \Delta x^k + u - g \\ & \lambda p \pm B(x^k) \leq d + p \\ & 0 \leq \lambda \leq 1 \end{aligned}$$

A restrição de igualdade linearizada da equação (3.1) representa o conjunto de medidas e pseudo-medidas Crisp, sendo construída conforme o problema de estimação de estado VAPR convencional. O termo  $H(x)$  refere-se à matriz das derivadas das equações de cada medida ou pseudo-medida Crisp em relação as variáveis de estado do problema, como definido na equação (2.8), do item (2.2.1.1.2). Contudo, a matriz  $H(x)$  de (3.1) possui uma coluna adicional, relativa às derivadas do conjunto de medidas e/ou pseudo-medidas Crisp

em relação à variável de estado inserida no problema Fuzzy,  $\lambda$ ,  $\frac{\partial z}{\partial \lambda}$ . Este valor será nulo, independente do tipo de medida, pois não há relação entre medidas e  $\lambda$ .

Lembrando que o problema de estimação de estado é um problema de minimização, e separando as restrições de desigualdade presentes na matriz  $B$ , nos termos referentes à função objetivo do problema de estimação VAPR e às pseudo-medidas Fuzzy, dado por  $\begin{pmatrix} c^T(u+g) \\ F \end{pmatrix}$ , a formulação do estimador de estado, aplicando programação linear Fuzzy, com função objetivo simétrica, em sua versão linearizada, torna-se então:

$$\begin{aligned} \max \text{imizar } & \lambda & (3.2) \\ \text{sujeito a } & \Delta z = H(x^k)\Delta x^k + u - g \\ & \lambda p + c^T(u+g) \leq f_{ob} + p_{fob} \\ & \lambda p \pm F(x^k)\Delta x^k \leq \Delta z_{Fuzzy} \\ & 0 \leq \lambda \leq 1 \end{aligned}$$

A primeira restrição de desigualdade da equação (3.2) refere-se à função objetivo do problema de estimação VAPR convencional, enquanto que a segunda restrição de desigualdade refere-se às pseudo-medidas Fuzzy inseridas no problema de estimação de estado.  $u$ ,  $g$  são variáveis de folga não negativas associadas aos resíduos de medição e inseridas na formulação do estimador de estado VAPR, ilustrado no item (2.2.1.2.2).

$c^T(u+g)$ , é a função objetivo do problema de estimação de estado VAPR convencional, representada como uma restrição de desigualdade no novo problema de estimação definido na equação (3.2).  $f_{ob}$  representa o valor convergido para a função objetivo do problema de estimação de estado VAPR convencional, calculada previamente ao problema de programação linear Fuzzy, conforme descrito no Apêndice A, item A.3.1.  $p_{fob}$  representa o deslocamento aplicado ao valor convergido da função objetivo do problema de estimação de estado VAPR.

$F(x)$  é matriz Jacobiana das derivadas das equações de cada pseudo-medida Fuzzy em relação às variáveis de estado do problema, (ângulos e magnitudes das tensões, e  $\lambda$ ). Assim como a matriz  $H(x)$ ,  $F(x)$  possui uma coluna relativa às derivadas do conjunto de pseudo-medidas Fuzzy, em relação à variável de estado inserida no problema Fuzzy,  $\lambda$ ,  $\frac{\partial z_{Fuzzy}}{\partial \lambda}$ .

As matrizes Jacobianas  $H(x)$  e  $F(x)$  são construídas de forma similar.

$$[F] = \frac{\partial f(x)}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_3}{\partial x_1} & \dots \\ \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \frac{\partial f_3}{\partial x_2} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

O termo  $\Delta z_{Fuzzy}$  representa o resíduo da pseudo-medida Fuzzy, sendo calculado conforme a equação (3.4).

$$\Delta z_{Fuzzy} = (\pm z_{Fuzzy} + p) - f(x) \quad (3.4)$$

$f(x)$  representa a equação que modela a pseudo-medida Fuzzy em função das variáveis de estado, ângulos e magnitudes das tensões.

$z_{Fuzzy}$  representa o valor da pseudo-medida Fuzzy, definido de acordo com o intervalo de pertinência da função de pertinência característica. O valor do sinal matemático que precede o termo  $z_{Fuzzy}$  é definido no item (3.6) do presente capítulo

### 3.4.2 Formulação Matemática do Estimadores de Estado Aplicando Programação Linear Fuzzy com Função Objetivo Não - Simétrica

De acordo com o problema de programação linear Fuzzy, com função objetivo não simétrica, apresentado no Apêndice A, item A.3.2, constroe-se o problema de estimação de estado, aplicando programação linear Fuzzy com função objetivo não-simétrica, PLFNS.

Em virtude da não simetria da função objetivo do estimador de estado PLFNS, dois problemas de estimação de estado, aplicando programação linear Crisp, definidos em (3.5) e (3.6), são resolvidos anteriores ao problema de programação Fuzzy propriamente dito, uma vez que o objetivo destes é determinar os limites superior e inferior do conjunto Fuzzy de decisão, tornando o problema simétrico e permitindo a resolução pela aplicação da equação (3.1). Neste ponto da solução do problema de estimação de estado Fuzzy a desigualdade simplesmente representa um limite de variação de valores, e não um número Fuzzy. Em (3.5) e (3.6) são apresentadas as versões linearizadas dos dois problemas de programação linear Crisp a serem resolvidos.

$$\begin{aligned}
 f_0 = \min \text{ imizar} \quad & z = c^T(u + g) \\
 \text{sujeito a} \quad & H(x^k)\Delta x^k + s = \Delta z \\
 & M(x^k)\Delta x^k \leq \Delta z_0 \\
 & s \geq 0
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

$$\begin{aligned}
 f_0 = \min \text{ imizar} \quad & z = c^T(u + g) \\
 \text{sujeito a} \quad & H(x^k)\Delta x^k + s = \Delta z \\
 & M(x^k)\Delta x^k \leq \Delta z_1 \\
 & s \geq 0
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

O emprego do índice 0 e 1, no termo  $\Delta z$  da restrição de desigualdade dos dois problemas de programação linear Crisp, definidos em (3.5) e (3.6) tem o propósito de ilustrar os dois valores de limite considerados no problema. Os valores  $\Delta z_0$  e  $\Delta z_1$  são calculados conforme (3.7) e (3.8). O incremento  $p$  aplicado ao valor do limite da desigualdade é o mesmo considerado no problema de programação Fuzzy.

$$\Delta z_0 = z_0 - h(x) \tag{3.7}$$

$$\Delta z_1 = z_0 + p - h(x) \tag{3.8}$$

A matriz  $M(x)$  representa o conjunto de equações linearizadas das grandezas submetidas a restrições de desigualdade. Na matriz  $M(x)$  estão representadas as pseudo-medidas Fuzzy e possíveis medidas analógicas sujeitas a limites em seus valores. Vale

ressaltar que as pseudo-medidas Fuzzy são representadas nos problemas definidos em (3.5) e (3.6) somente através da matriz  $M(x)$ .

Obtida a solução para os dois problemas de programação linear Crisp, armazena-se o valor da função objetivo de cada um deles,  $f_0$  e  $f_1$ , e constroe-se o problema de estimação de estado, utilizando programação linear Fuzzy com função objetivo não simétrica, definido em (3.9). Deve ser destacado que o problema de estimação de estado é um problema de minimização, enquanto o problema de programação linear Fuzzy é um problema de maximização. A versão linearizada do problema PLFNS é assim definida:

$$\begin{aligned}
 \max \text{ imizar} \quad & \lambda \\
 \text{sujeito a} \quad & H(x^k)\Delta x^k + s = \Delta z \\
 & \lambda(f_1 - f_0) + c^T(u + g) \leq f_1 \\
 & \lambda p \pm F(x^k)\Delta x^k \leq \Delta z_{Fuzzy} \\
 & 0 \leq \lambda \leq 1 \\
 & s \geq 0
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

No problema descrito em (3.9), pode existir mais de uma restrição de desigualdade de natureza Fuzzy, porém a restrição de desigualdade referente à função objetivo do problema de programação linear Crisp é única.

A matriz  $H(x)$  de (3.9) apresenta uma coluna adicional, relativa às derivadas do conjunto de medidas em relação à variável de estado inserida no problema Fuzzy,  $\lambda, \frac{\partial z}{\partial \lambda}$ . Este valor será nulo, independente do tipo de medida, pois não existe relação entre medidas e  $\lambda$ . A matriz  $F(x)$  é construída conforme a equação (3.3), enquanto o termo  $\Delta z_{Fuzzy}$  é calculado conforme definido na equação (3.4).

### 3.5 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO ESTIMADOR DE ESTADO APLICANDO PROGRAMAÇÃO QUADRÁTICA FUZZY COM FUNÇÃO OBJETIVO NÃO - SIMÉTRICA

Em virtude da crescente necessidade de representação de incertezas em um problema de estimação de estado, em sistemas elétricos de energia, e da enorme maioria dos programas para estimação de estado, em utilização, se basearem no método dos Mínimos Quadrados Ponderados (MQP), procurou-se desenvolver uma metodologia que permitisse representar este problema em adequação à técnica mais utilizada.

No problema de estimação de estado MQP, calcula-se o vetor de estado  $\mathbf{x}$  que minimiza a soma ponderada do quadrado dos erros de medição, considerando restrições operativas de igualdade e desigualdade. Ou seja, resolve-se o seguinte problema:

$$\begin{aligned} \text{minimizar} \quad & J(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{nm} \Delta z_i^2 / \sigma_i^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{nm} [z_i - h_i(x)]^2 / \sigma_i^2 \\ \text{sujeito a} \quad & g(x) = 0; \\ & c(x) \leq 0; \end{aligned} \tag{3.10}$$

Onde:

$\Delta z_i$  é o resíduo de estimação de uma medida  $i$  qualquer;  $\Delta z_i = z_i - h_i(x)$ .

$g(\cdot)$  e  $c(\cdot)$  são restrições operativas de igualdade e desigualdade, respectivamente, sendo normalmente empregadas para representar limites operacionais das partes não-observáveis da rede.

O método iterativo das Equações Normais representa a aproximação padrão para a solução do Estimador de Estado MQP, conforme descrito no item (2.2.1.1.2). Contudo, o problema dos mínimos quadrados ponderados pode ser resolvido pela solução de uma seqüência de problemas de programação quadrática, que possibilita a representação de incertezas no problema de estimação de estado MQP com maior facilidade.

Um algoritmo para a solução de um problema de otimização quadrática Fuzzy, considerando restrições Fuzzy e uma função objetivo Crisp é descrito em (GIOVE, 2006). Tal algoritmo procura satisfazer a função objetivo e as restrições Fuzzy, considerando uma função objetivo quadrática Crisp, semelhante ao método dos mínimos quadrados ponderados e restrições de desigualdade lineares, relativas as grandezas Fuzzy. A modelagem adotada por (GIOVE, 2006) difere daquela proposta, neste trabalho de tese. Tal modelagem pode apresentar o inconveniente de baixa satisfação das restrições, quando um elevado número de restrições Fuzzy são representadas.

De acordo com o problema de programação quadrática Fuzzy, apresentado no Apêndice A, item A.4, constroeu-se o problema de estimação de estado, aplicando programação quadrática Fuzzy com função objetivo não-simétrica.

Os problemas de estimação de estado, aplicando programação quadrática Crisp, definidos em (3.11) e (3.12), são resolvidos anterior ao problema de programação Fuzzy propriamente dito, uma vez que o objetivo destes é determinar os limites superior e inferior do conjunto Fuzzy de decisão. Neste ponto da solução do problema de estimação de estado, aplicando programação quadrática Fuzzy, a desigualdade, simplesmente, representa um limite de variação de valores, e não um número Fuzzy.

$$f_0 = \min imizar \quad z = \left( \frac{1}{2} s^T Q s \right) \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} \text{sujeito a} \quad & H(x^k) \Delta x^k + s = \Delta z \\ & M(x^k) \Delta x^k \leq \Delta z_0 \\ & s \geq 0 \end{aligned}$$

$$f_1 = \min imizar \quad z = \left( \frac{1}{2} s^T Q s \right) \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} \text{sujeito a} \quad & H(x^k) \Delta x^k + s = \Delta z \\ & M(x^k) \Delta x^k \leq \Delta z_1 \\ & s \geq 0 \end{aligned}$$

A utilização do índice 0 e 1 no termo  $\Delta z$  da restrição de desigualdade dos dois problemas de programação quadrática Crisp definidos em (3.11) e (3.12) tem o propósito de ilustrar os dois valores de limite considerados no problema. Os valores de  $\Delta z_0$  e  $\Delta z_1$  são calculados conforme as equações (3.7) e (3.8). A matriz  $M(x)$  representa o conjunto de equações linearizadas das grandezas submetidas a restrições de desigualdade, sendo construída como descrito no problema de programação linear Fuzzy com função objetivo não simétrica.

Obtida a solução para os dois problemas de programação quadrática Crisp, armazenase o valor da função objetivo convergida de cada um deles,  $f_0$  e  $f_1$ , e constroe-se o problema de estimação de estado, utilizando programação quadrática Fuzzy com função objetivo não simétrica, definido em (3.13). Deve ser destacado que o problema de estimação de estado é um problema de minimização, enquanto o problema de programação quadrática Fuzzy é um problema de maximização. Assim:

$$\begin{aligned}
 \max \text{ imizar} \quad & \lambda \\
 \text{sujeito a} \quad & H(x^k)\Delta x^k + s = \Delta z \\
 & \lambda(f_1 - f_0) + \frac{1}{2} s^T Q s \leq f_1 \\
 & \lambda p \pm F(x^k)\Delta x^k \leq \Delta z_{\text{Fuzzy}} \\
 & 0 \leq \lambda \leq 1 \\
 & s \geq 0
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

No problema descrito em (3.13), pode existir mais de uma restrição de desigualdade de natureza Fuzzy, porém a restrição de desigualdade referente à função objetivo do problema de programação quadrática Crisp é única.

A matriz  $H(x)$  de (3.13) apresenta uma coluna adicional, relativa às derivadas do conjunto de medidas em relação a variável de estado inserida no problema Fuzzy,  $\lambda, \frac{\partial z}{\partial \lambda}$ . Este valor será nulo, independente do tipo de medida, pois não existe relação entre medidas

e  $\lambda$ . A matriz  $F(x)$  é construída conforme a equação (3.3), enquanto o termo  $\Delta z_{Fuzzy}$  é calculado conforme definido na equação (3.4).

A formulação do problema de programação quadrática Fuzzy com função objetivo não simétrica difere do problema de programação linear Fuzzy apenas na restrição relativa a função objetivo do problema Crisp de otimização. No problema de programação quadrática Fuzzy, a restrição da função objetivo do problema Crisp, é representada por uma restrição não linear ao problema de otimização definido em (3.13), necessitando de algoritmos de programação não-linear para resolução da mesma.

### **3.6 REPRESENTAÇÃO DA FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA DE UMA PSEUDO-MEDIDA FUZZY NO PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO FUZZY**

A definição da função de pertinência representativa de uma pseudo-medida Fuzzy constitui um ponto fundamental no processo de solução dos estimadores de estado considerando restrições Fuzzy, uma vez que o conjunto de restrições a ser representado no problema de programação é extraído das mesmas. (ZIMMERMAN, 1984) afirma que, ao contrário da forma clássica de solução de um problema de programação, a solução em um ambiente Fuzzy permite variações diversas para o modelo de solução, dependendo das premissas ou características da situação real a ser modelada.

Tradicionalmente, a representação das informações qualitativas no problema de estimação de estado, caracterizadas por perfis de comportamento histórico, experiência dos operadores ou faixas de valores de grandezas elétricas, é realizada construindo pseudo-medidas, com natureza Crisp, cujo valor apesar de impreciso, é representado como um valor único, mas com elevado desvio padrão. A modelagem das pseudo-medidas para o problema de estimação de estado, em que as incertezas epistêmicas, associadas à determinação do valor numérico das mesmas, são mais adequadamente representadas,

reside no emprego da teoria dos conjuntos de natureza Fuzzy. Desta forma, a obtenção de uma solução que represente, com maior fidelidade, as condições operacionais da rede elétrica está relacionada a uma boa definição dos valores pertencentes à função de pertinência.

Em (BARBOZA, 1999), são reunidos, de forma sistematizada, os métodos de fusão de dados qualitativos e quantitativos descritos na literatura especializada, além de propor uma taxionomia em quatro níveis, que leva em conta a natureza e redundância dos dados processados. No referido trabalho, é apresentada uma descrição completa dos tipos de incertezas verificadas em problemas estocásticos, e uma descrição aprofundada das incertezas epistêmicas, subjetivas, relativa à falta de dados experimentais que caracterizem novos métodos ou processos. Também é descrito um conjunto de métodos de manipulação de dados quantitativos, precisos; e qualitativos, imprecisos ou Fuzzy, provenientes de diferentes fontes de informação, com o objetivo de agregá-los de forma a obter uma maior credibilidade na informação final requisitada, para aplicação na estimação de estado em sistemas de potência. Nos métodos apresentados em (BARBOZA, 1999), é proposta uma representação da informação vinculada aos vários tipos de incertezas presentes em um problema, comumente, por não se saber como tratá-las matematicamente, de um modo natural e com sentido lógico, tornando a integração de dados de diferentes naturezas coerente e otimizada. Uma síntese das idéias apresentadas em (BARBOZA, 1999) é encontrada em (DO COUTTO FILHO, 2007), porém com um tratamento genérico para a fusão de dados qualitativos e quantitativos. Os métodos e as idéias apresentadas em (BARBOZA, 1999) e (DO COUTTO FILHO, 2007) auxiliaram na construção das funções de pertinência das pseudo-medidas Fuzzy utilizadas neste trabalho de tese, principalmente, no que diz respeito à fusão de dados qualitativos em um problema de estimação de estado.

Funções de pertinência podem ser definidas a partir da experiência e da perspectiva do usuário, mas é comum fazer-se uso de funções de pertinência padrão, como, por exemplo: funções com formato triangular, trapezoidal e Gaussiana. Funções de pertinência trapezoidais ou triangulares facilitam o processo de construção do conjunto de restrições de desigualdade associadas ao problema, além de aliviarem o desempenho computacional requerido. Neste trabalho, serão consideradas funções de pertinência triangulares e trapezoidais para representação de grandezas Fuzzy.

A Figura 3.3 ilustra uma função de pertinência trapezoidal, que será empregada para exemplificar a construção das restrições de desigualdade a serem inseridas no problema de programação dos três estimadores de estado, considerando restrições Fuzzy, anteriormente descritos. A função de pertinência trapezoidal, mostrada na Figura 3.3, representará uma pseudo-medida Fuzzy de potência. De acordo com a precisão da informação qualitativa disponível, o valor central da função de pertinência da pseudo-medida Fuzzy,  $d$ , deve ser mais próximo do valor verdadeiro. O ajuste da precisão da informação qualitativa é realizada pelo parâmetro  $p$ . Os parâmetros  $d_0$  e  $d_1$  representam a faixa de variação aceitável em relação ao valor central, com pertinência unitária. O acréscimo/decrécimo de pertinência é realizado pelo parâmetro  $p$ .

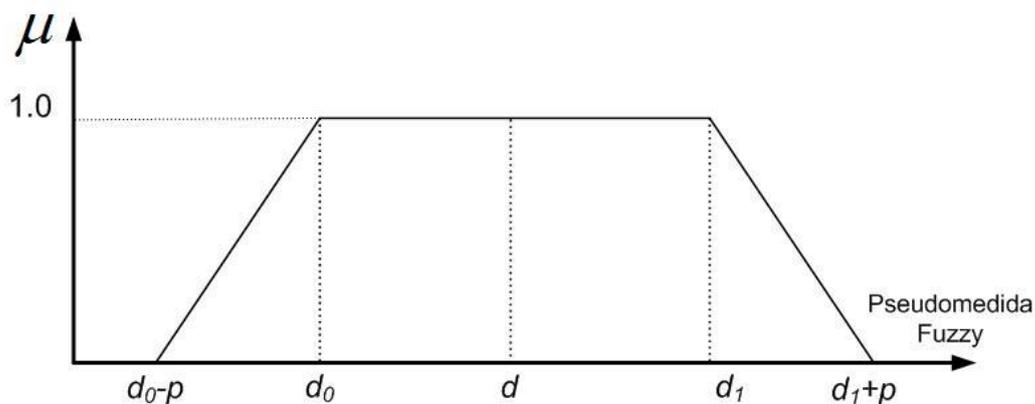


Figura 3.3: Função de pertinência trapezoidal para uma grandeza Fuzzy.

Devido ao formato da função de pertinência trapezoidal, a mesma não pode ser representada pela relação de pertinência descrita no Apêndice A, itens (A.3) e (A.4). Contudo, separando a Figura 3.3 no ponto de corte, determinado pela linha tracejada que atravessa o valor central, obtêm-se duas funções de pertinência semi-trapezoidais, que nos permitem aplicar a relação de pertinência, construindo assim as restrições de desigualdade associadas. A Figura 3.4 mostra as duas funções de pertinência resultantes do corte da Figura 3.3.

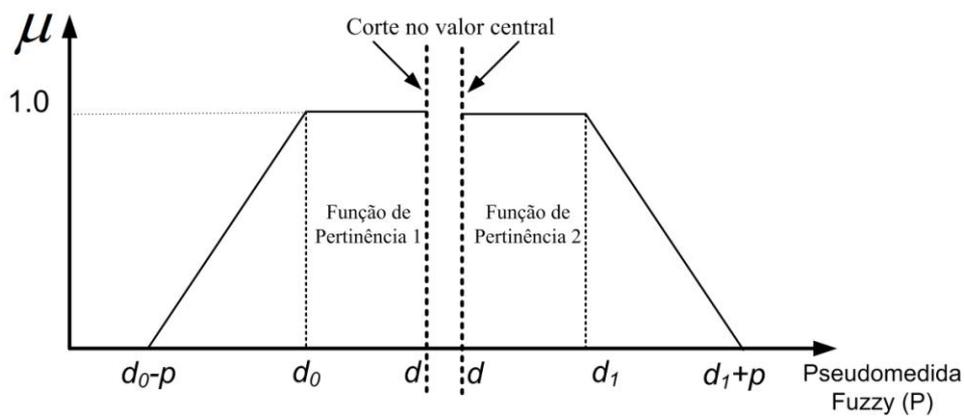


Figura 3.4: Funções de pertinência resultantes do corte da Figura 3.3.

A partir da relação descrita na equação (A.9), do Apêndice A, item (A.3.1), pode-se construir dois conjuntos de restrições de desigualdade, relativa a cada uma das funções de pertinência representadas na Figura 3.4.

$$d_0 - p \leq d \leq d_1 + p \quad (3.14)$$

Para a função de pertinência 1, da Figura 3.4, tem-se a seguinte relação:

$$\Delta P = d_0; \mu = 1; \quad (3.15)$$

$$\Delta P = d_0 - p; \mu = 0; \quad (3.16)$$

A expressão da reta pode ser representada da seguinte maneira:

$$\mu = a\Delta P + b; \quad (3.17)$$

$$1 = a(d_0) + b; \quad (3.18)$$

$$0 = a(d_0 - p) + b; \quad (3.19)$$

Igualando (3.18) e (3.19):

$$1 = a(d_0) + a(-d_0 + p); \quad (3.20)$$

Desta forma:

$$a = 1/p; \quad (3.21)$$

$$b = -(d_0 - p)/p; \quad (3.22)$$

Reescrevendo a expressão da reta, tem-se:

$$\mu = \Delta P/p - (d_0 - p)/p; \quad (3.23)$$

Rearrmando a expressão (3.23), substituindo  $\mu$  pela variável de interesse  $\lambda$ , e obedecendo a relação ilustrada em (A.9), obtém-se a restrição de desigualdade relativa à função de pertinência 1 da Figura 3.4.

$$-\Delta P + p\mu = -d_0 + p; \quad (3.24)$$

$$-\Delta P + p\lambda \leq -d_0 + p; \quad (3.25)$$

A restrição de desigualdade que define a função de pertinência 2 da Figura 3.4, é obtida através do seguinte equacionamento:

$$\Delta P = d_1; \mu = 1; \quad (3.26)$$

$$\Delta P = d_1 + p; \mu = 0; \quad (3.27)$$

A expressão da reta pode ser, novamente, representada da seguinte maneira:

$$\mu = a\Delta P + b; \quad (3.28)$$

$$1 = a(d_1) + b; \quad (3.29)$$

$$0 = a(d_1 + p) + b; \quad (3.30)$$

Igualando (3.29) e (3.30):

$$1 = a(d_1) - a(d_1 + p); \quad (3.31)$$

Desta forma:

$$a = -1/p; \quad (3.32)$$

$$b = (d_1 + p)/p; \quad (3.33)$$

Reescrevendo a expressão da reta:

$$\mu = -\Delta P/p + (d_1 + p)/p; \quad (3.34)$$

Rearrmando a expressão (3.34) e novamente substituindo  $\mu$  por  $\lambda$ , e obedecendo a relação ilustrada em (A.9), obtém-se a restrição de desigualdade relativa a função de pertinência 2 da Figura 3.4.

$$\Delta P + p\mu = d_1 + p; \quad (3.35)$$

$$\Delta P + p\lambda \leq d_1 + p; \quad (3.36)$$

Funções de pertinência triangulares, como ilustrado na Figura 3.5, constituem um caso particular das funções de pertinência trapezoidais, em que não se admite uma faixa de valores com pertinência unitária, mas sim, um único valor,  $d$ . Assim, os termos  $d_1$  e  $d_0$  são nulos. O decréscimo de pertinência é definido por  $p$ .

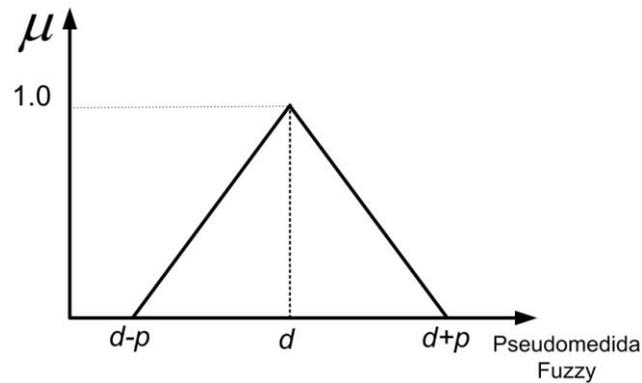


Figura 3.5: Função de pertinência triangular de uma grandeza Fuzzy hipotética.

Para um corte no valor central da Figura 3.5, ilustrado pela linha em tracejado, constroem-se as seguintes restrições de desigualdade para as duas funções de pertinência resultantes.

$$-\Delta P + p\lambda \leq -d + p; \quad (3.37)$$

$$\Delta P + p\lambda \leq d + p; \quad (3.38)$$

### 3.7 EXEMPLIFICAÇÃO DA METODOLOGIA

O sistema de 3 barras e 3 circuitos, mostrado na Figura 3.6 e proposto em (ABUR, 2004), com um ponto de medição de injeção de potência ativa e reativa, dois pontos de medição de fluxo de potência ativa e reativa e dois pontos de medição de tensão, é utilizado para ilustrar a metodologia do estimador de estado considerando restrições Fuzzy. Neste sistema, é incluída uma grandeza Fuzzy, representativa de uma pseudo-medida Fuzzy de fluxo de potência ativa entre as barras 2 e 3. O modelo do estimador de estado, aplicando programação quadrática Fuzzy com função objetivo não simétrica, foi utilizado para exemplificar a aplicação dos estimadores de estado considerando restrições Fuzzy. A partir da exemplificação do estimador de estado, aplicando programação quadrática Fuzzy com função objetivo não simétrica, podem-se construir os estimadores de estado, aplicando programação linear Fuzzy, uma vez que a formulação destes se assemelha à formulação do estimador exemplificado, conforme descrito nos itens (3.2) e (3.3) deste capítulo.

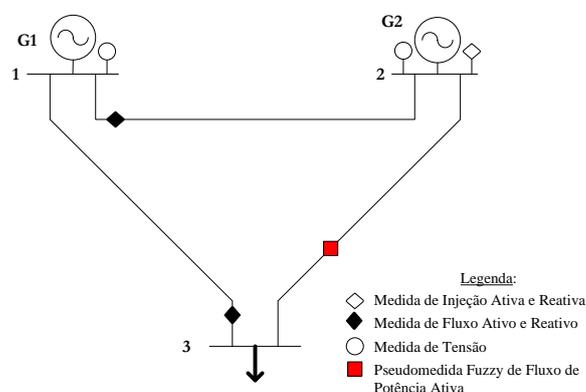


Figura 3.6: Sistema de 3 barras e 3 circuitos com conjunto de medições e pseudo-medida Fuzzy.

A Tabela 3.1 apresenta os valores dos parâmetros do sistema de três barras, enquanto a Tabela 3.2 ilustra os valores considerados para o conjunto de medições e a variância associada a cada medida, definida em  $R$ . Neste exemplo, não será considerada a adição de

rúídos aleatórios no conjunto de medidas, pois o objetivo é ilustrar a metodologia desenvolvida.

Tabela 3.1: Parâmetros do sistema de 3 barras e 3 circuitos.

Linha	Barra De – Para	R (p.u.)	X (p.u.)	B (p.u.)
1	1 – 2	0.01	0.03	0.0
2	1 – 3	0.02	0.05	0.0
3	2 – 3	0.03	0.08	0.0

Tabela 3.2: Conjunto de medidas.

Conjunto de Medidas	Valor (pu)	R (pu)
P <sub>12</sub> - Fluxo ativo da barra 1 para 2	0.888	0.008
P <sub>13</sub> - Fluxo ativo da barra 1 para 3	1.173	0.008
P <sub>2</sub> - Injeção ativa na barra 2	-0.501	0.010
Q <sub>12</sub> - Fluxo reativo da barra 1 para 2	0.568	0.008
Q <sub>13</sub> - Fluxo reativo da barra 1 para 3	0.663	0.008
Q <sub>2</sub> - Injeção reativa na barra 2	-0.286	0.010
V <sub>1</sub> - Magnitude da tensão na barra 1	1.006	0.004
V <sub>2</sub> - Magnitude da tensão na barra 2	0.968	0.004

O vetor de estado  $\mathbf{x}$  para o sistema é o seguinte:  $\mathbf{x}^T = [\theta_2, \theta_3, V_1, V_2, V_3]$ . A referência angular do sistema é a barra 1 ( $\theta_1 = 0$ ).

A pseudo-medida Fuzzy de fluxo de potência ativa entre as barras 2 e 3 é descrita pela função de pertinência semi trapezoidal mostrada na Figura 3.7. O valor de  $P_{23\text{Fuzzy}}$  é 0.40 p.u., sendo definido a partir do resultado de um problema de fluxo de potência. Para construção da função de pertinência característica da pseudo-medida Fuzzy, a seguinte informação qualitativa foi disponibilizada.

“O fluxo de potência ativa entre as barras 2 e 3, em situações normais de operação, é 0.40 p.u, com faixa aceitável de tolerância, caracterizando normalidade na operação, de até 10% deste valor. Valores acima de 20% de variação em relação ao valor de 0.40 p.u representam pontos de operação não satisfatórios, sendo que o decréscimo de pertinência

do fluxo de potência ativa entre as barras 2 e 3 é verificado para valores acima de 10% do valor em condições normais de operação.”

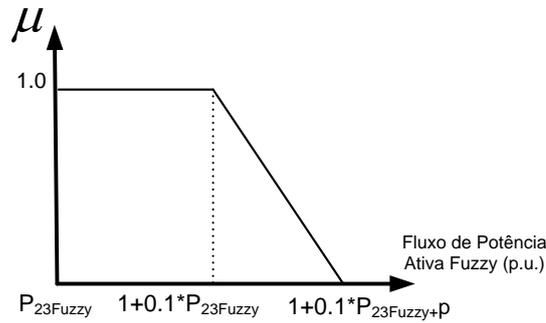


Figura 3.7: Função de pertinência para a pseudo-medida Fuzzy de fluxo de potência ativa entre as barras 2 e 3.

Considerando a faixa de pertinência unitária, o seu valor limite é definido por  $(1+0.1*P_{23Fuzzy} = 0.44 \text{ p.u.})$ . O valor do incremento  $p$  é igual a 10%, de acordo com a informação qualitativa disponibilizada, sendo igual a 0.04 p.u.

A condição inicial das variáveis de estado do sistema são ângulos das tensões nulos e magnitudes das tensões iguais a 1.0 p.u.

A matriz de admitância nodal complexa,  $Y$ , para o sistema exemplo é:

$$Y = \begin{bmatrix} 16.8966 - 47.2414i & -10.0000 + 30.0000i & -6.8966 + 17.2414i \\ -10.0000 + 30.0000i & 14.1096 - 40.9589i & -4.1096 + 10.9589i \\ -6.8966 + 17.2414i & -4.1096 + 10.9589i & 11.0061 - 28.2003i \end{bmatrix}$$

A matriz quadrada  $Q$ , do inverso dos erros de covariância das medidas, definida nas equações (3.11) a (3.13), é assim calculada:

$$Q = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_{v12}^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{v13}^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{R_{v2}^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R_{v12}^2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R_{v13}^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R_{v2}^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R_{v1}^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R_{v2}^2} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 15625 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 15625 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 15625 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 15625 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 62500 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 62500 \end{bmatrix}^T$$

Conforme descrito no item 3.3 deste capítulo, o estimador de estado, aplicando programação quadrática Fuzzy com função objetivo não simétrica, é solucionado em dois estágios. No estágio inicial, resolvem-se dois subproblemas de programação quadrática Crisp, de acordo com as equações (3.11) e (3.12), para a determinação dos limites da função de pertinência da função objetivo do problema de programação quadrática,  $f_0$  e  $f_1$ . A única diferença entre estes subproblemas é o valor do limite da grandeza submetida a uma restrição de desigualdade. No segundo subproblema de programação quadrática Crisp, o limite é deslocado pelo valor  $p$ , em relação ao limite do primeiro subproblema, como representado na Figura 3.7. No segundo estágio de solução, resolve-se um problema de programação Fuzzy não-linear, de acordo com a equação (3.13).

### Primeiro Estágio

Para o primeiro estágio do estimador de estado, aplicando programação quadrática Fuzzy com função objetivo não simétrica, a única grandeza limitada e representada por uma restrição de desigualdade é o fluxo de potência ativa entre as barra 2 e 3 ( $P_{23}$ ). No segundo estágio de solução deste estimador de estado,  $P_{23}$  será modelada como uma pseudo-medida Fuzzy.

Como nos estimadores de estado MQP ou VAPR, descritos no Capítulo 2, faz-se necessária a construção da matriz das derivadas das equações das medidas em relação as variáveis de estado,  $H(x)$ . As equações para o cálculo das medidas de injeção e fluxo de potência ativa e reativa no sistema, assim como as suas versões linearizadas, necessárias à construção da matriz  $H(x)$ , são apresentadas no Apêndice C.

A matriz  $H(x)$  e o vetor  $\Delta z$  são calculados como no estimador de estados MQP. A matriz  $H(x)$  e o vetor  $\Delta z$  para a este sistema, na primeira iteração, são definidos abaixo. As duas primeiras linhas de  $H(x)$  e de  $\Delta z$  referem-se às medidas de fluxo de potência ativa; a terceira linha refere-se à medida de injeção de potência ativa, as linhas de número quatro e

cinco referem-se às medidas de fluxo de potência reativa, enquanto a sexta linha refere-se à medida de injeção de potência reativa. As duas últimas linhas da matriz  $H(x)$  e de  $\Delta z$  referem-se às medidas de magnitude de tensão.

$$H(x) = \begin{bmatrix} -30.0000 & 0 & 10.0000 & -10.0000 & 0 \\ 0 & -17.2414 & 6.8966 & 0 & -6.8966 \\ 40.9589 & -10.9589 & -10.0000 & 14.1096 & -4.1096 \\ 10.0000 & 0 & 30.0000 & -30.0000 & 0 \\ 0 & 6.8966 & 17.2414 & 0 & -17.2414 \\ -14.1096 & 4.1096 & -30.0000 & 40.9589 & -10.9589 \\ 0 & 0 & 1.0000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0000 & 0 \end{bmatrix} \quad z = \begin{bmatrix} 0.8880 \\ 1.1730 \\ -0.5010 \\ 0.5680 \\ 0.6630 \\ -0.2860 \\ 0.0060 \\ -0.0320 \end{bmatrix}$$

A matriz  $M(x)$ , definida nas equações (3.11) e (3.12), é construída semelhante à matriz  $H(x)$ , sendo composta pelas equações linearizadas das expressões das grandezas submetidas a restrições de desigualdade, em relação as variáveis de estado do sistema.

$$M_{P_{23}}(x) = \frac{\partial P_{23}(x)}{\partial x} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\partial P_{23}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_{23}}{\partial \theta_3} & 0 & \frac{\partial P_{23}}{\partial V_2} & \frac{\partial P_{23}}{\partial V_3} & \frac{\partial P_{23}}{\partial \lambda} \end{bmatrix}$$

$$M_{P_{23}}(x) = \frac{\partial h_{P_{23}}(x)}{\partial x} = [0 \quad 10.95 \quad -10.95 \quad 0 \quad 4.11 \quad -4.11 \quad 0]$$

Os termos  $\Delta z_{P_{230}}, \Delta z_{P_{231}}$  são calculados como em (3.39). Na primeira iteração,  $h_{P_{23}}(x)$  é nulo.

$$\begin{aligned} \Delta z_{P_{230}} &= z_{P_{230}} - h_{P_{23}}(x) \\ \Delta z_{P_{231}} &= (z_{P_{231}} + p) - h_{P_{23}}(x) \end{aligned} \quad (3.39)$$

Os termos  $z_{P_{230}}$  e  $z_{P_{231}}$  assumem, respectivamente, os seguintes valores para o primeiro e segundo subproblemas de programação quadrática Crisp, com os seguintes valores para  $\Delta z_{P_{230}}, \Delta z_{P_{231}}$  na primeira iteração.

$$\begin{aligned} z_{P_{230}} = 0.44 &\Rightarrow \Delta z_{P_{230}} = 0.44; \\ z_{P_{231}} = 0.44 + 0.04 = 0.48 &\Rightarrow \Delta z_{P_{231}} = 0.48; \end{aligned}$$

A função objetivo do problema de programação quadrática Crisp é construída a partir de  $s = \Delta z - H(x)\Delta x$ , como mostrado abaixo.  $\Delta x$  representa o vetor dos resíduos das variáveis de estado.

$$z = \frac{1}{2} [(\Delta z_1 - H_1(x)\Delta x)^2 Q_{11} + (\Delta z_2 - H_2(x)\Delta x)^2 Q_{22} + (\Delta z_3 - H_3(x)\Delta x)^2 Q_{33} + (\Delta z_4 - H_4(x)\Delta x)^2 Q_{44} + (\Delta z_5 - H_5(x)\Delta x)^2 Q_{55} + (\Delta z_6 - H_6(x)\Delta x)^2 Q_{66} + (\Delta z_7 - H_7(x)\Delta x)^2 Q_{77} + (\Delta z_8 - H_8(x)\Delta x)^2 Q_{88}]$$

As equações (3.40a) e (3.40b) representam a formulação geral para a solução dos dois subproblemas de programação quadrática Crisp, na primeira iteração. Ambos os problemas definidos em (3.40) são resolvidos como uma seqüência de problemas de programação quadrática. Para solução deste problema aplicou-se a função QUADPROG do Matlab, (MATLAB, 2005).

$$\begin{array}{ll} f_0 = \text{minimizar } z & f_1 = \text{minimizar } z \\ \text{a) sujeito a } H(x^0)\Delta x^0 + s = \Delta z & \text{b) sujeito a } H(x^0)\Delta x^0 + s = \Delta z \\ M_{P23}(x^0)\Delta x^0 \leq \Delta z_{P23_0} & M_{P23}(x^0)\Delta x^0 \leq \Delta z_{P23_1} \\ s \geq 0 & s \geq 0 \end{array} \quad (3.40)$$

Para ambas as expressões mostradas em (3.40a) e (3.40b), o problema de programação quadrática Crisp convergiu para a mesma solução na primeira iteração. A solução dos problemas de programação quadrática acima e o valor das variáveis de estado para a próxima iteração são, respectivamente:

$$\Delta x = \begin{bmatrix} \Delta \theta_2 \\ \Delta \theta_3 \\ \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0213 \\ -0.0451 \\ -0.0003 \\ -0.0257 \\ -0.0574 \end{bmatrix}; \quad x^1 = x^0 + \Delta x^1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.0213 \\ -0.0451 \\ -0.0003 \\ -0.0257 \\ -0.0574 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0213 \\ -0.0451 \\ 0.9997 \\ 0.9743 \\ 0.9426 \end{bmatrix}$$

Ao final do processo iterativo, ambos os subproblemas de programação quadrática Crisp convergem em três iterações, para o mesmo ponto de solução, mostrado a seguir:

$$x = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.00 \\ -1.2476 \\ -2.7456 \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.9996 \\ 0.9742 \\ 0.9438 \end{bmatrix}$$

Os valores das funções objetivo convergidas, dos dois problemas de programação quadrática Crisp,  $f_0$  e  $f_1$ , são os valores que realmente interessam para a modelagem da restrição relativa a função objetivo, para o problema de programação Fuzzy a ser resolvido na segunda etapa de solução. Os valores de  $f_0$  e  $f_1$  e a resultante entre eles,  $f_1 - f_0$ , são:

$$f_0 = 8.53647835; f_1 = 8.53647836; f_1 - f_0 = 1e-8.$$

### Segundo Estágio

O problema de programação não linear Fuzzy a ser resolvido no segundo estágio, e definido em (3.13), é mostrado abaixo:

$$\begin{aligned} \max \text{ imizar} \quad & \lambda \\ \text{sujeito a} \quad & H(x^k)\Delta x^k + s = \Delta z \\ & \lambda(f_1 - f_0) + \frac{1}{2} s^T Q s \leq f_1 \\ & \lambda p \pm F(x^k)\Delta x^k \leq \Delta z_{\text{Fuzzy}} \\ & 0 \leq \lambda \leq 1 \\ & s \geq 0 \end{aligned} \tag{3.41}$$

Neste problema,  $\lambda$  representa uma variável de estado adicional. Desta forma, o vetor de estado passa a ser representado por  $x^T = [\theta_2, \theta_3, V_1, V_2, V_3, \lambda]$ . A condição inicial das variáveis de estado, ângulos e magnitudes das tensões, não se alteram em relação ao primeiro estágio de solução. A condição inicial considerada para  $\lambda$  é a unidade.

Para solução deste problema deve-se também construir a matriz  $H(x)$  e calcular o vetor  $\Delta z$ . Contudo, a matriz  $H(x)$  passa a apresentar uma coluna adicional, relativa às derivadas das equações das medidas em relação à variável de estado adicional,  $\lambda$ , sendo todas estas nulas, pois não existe dependência entre as equações que modelam as medidas

e a variável  $\lambda$ , inserida no processo de solução. A matriz  $H(x)$  para este sistema, na primeira iteração, é mostrada abaixo.

$$H(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{12}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_{12}}{\partial \theta_2} & 0 & \frac{\partial P_{12}}{\partial V_1} & \frac{\partial P_{12}}{\partial V_2} & 0 & \frac{\partial P_{12}}{\partial \lambda} \\ \frac{\partial P_{13}}{\partial \theta_1} & 0 & \frac{\partial P_{13}}{\partial \theta_3} & \frac{\partial P_{13}}{\partial V_1} & 0 & \frac{\partial P_{13}}{\partial V_3} & \frac{\partial P_{13}}{\partial \lambda} \\ \frac{\partial P_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_1}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_1}{\partial \theta_3} & \frac{\partial P_1}{\partial V_1} & \frac{\partial P_1}{\partial V_2} & \frac{\partial P_1}{\partial V_3} & \frac{\partial P_1}{\partial \lambda} \\ \frac{\partial Q_{12}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Q_{12}}{\partial \theta_2} & 0 & \frac{\partial Q_{12}}{\partial V_1} & \frac{\partial Q_{12}}{\partial V_2} & 0 & \frac{\partial Q_{12}}{\partial \lambda} \\ \frac{\partial Q_{13}}{\partial \theta_1} & 0 & \frac{\partial Q_{13}}{\partial \theta_3} & \frac{\partial Q_{13}}{\partial V_1} & 0 & \frac{\partial Q_{13}}{\partial V_3} & \frac{\partial Q_{13}}{\partial \lambda_1} \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_3} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_1} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_2} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_3} & \frac{\partial Q_1}{\partial \lambda} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\partial V_1}{\partial V_1} & 0 & 0 & \frac{\partial V_1}{\partial \lambda} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial V_2}{\partial V_2} & 0 & \frac{\partial V_2}{\partial \lambda} \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

$$H = \begin{bmatrix} -30.0000 & 0 & 10.0000 & -10.0000 & 0 & 0.0 & 0.0 \\ 0 & -17.2414 & 6.8966 & 0 & -6.8966 & 0.0 & 0.0 \\ 40.9589 & -10.9589 & -10.0000 & 14.1096 & -4.1096 & 0.0 & 0.0 \\ 10.0000 & 0 & 30.0000 & -30.0000 & 0 & 0.0 & 0.0 \\ 0 & 6.8966 & 17.2414 & 0 & -17.2414 & 0.0 & 0.0 \\ -14.1096 & 4.1096 & -30.0000 & 40.9589 & -10.9589 & 0.0 & 0.0 \\ 0 & 0 & 1.0000 & 0 & 0 & 0.0 & 0.0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0000 & 0 & 0.0 & 0.0 \end{bmatrix}$$

O vetor de resíduos de medição,  $\Delta z$ , para este problema de estimação de estado é definido abaixo. Este vetor é semelhante ao construído no primeiro estágio de solução do problema de programação quadrática Crisp, pois não foram excluídas nem inseridas novas medidas ao sistema, e a condição inicial dos ângulos e magnitudes das tensões, para a primeira iteração, não se alterou.

$$\Delta z = \begin{bmatrix} z_{P12} - h_{P12}(x) \\ z_{P13} - h_{P13}(x) \\ z_{P2} - h_{P2}(x) \\ z_{Q12} - h_{Q12}(x) \\ z_{Q13} - h_{Q13}(x) \\ z_{Q2} - h_{Q2}(x) \\ z_{V1} - h_{V1}(x) \\ z_{V2} - h_{V2}(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.8880 \\ 1.1730 \\ -0.5010 \\ 0.5680 \\ 0.6630 \\ -0.2860 \\ 0.0060 \\ -0.0320 \end{bmatrix}$$

Como mencionado anteriormente, a construção da matriz  $F(x)$  é semelhante à construção da matriz  $H(x)$ , porém com a presença de um termo adicional relativo à derivada da pseudo-medida Fuzzy ( $P_{23F}$ ) em relação a variável  $\lambda$ . Desta forma, tem-se:

$$F(x) = \frac{\partial f(x)}{\partial x} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\partial P_{23F}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_{23F}}{\partial \theta_3} & 0 & \frac{\partial P_{23F}}{\partial V_2} & \frac{\partial P_{23F}}{\partial V_3} & \frac{\partial P_{23F}}{\partial \lambda} \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

$$F(x) = \frac{\partial f(x)}{\partial x} = [0 \quad 10.95 \quad -10.95 \quad 0 \quad 4.11 \quad -4.11 \quad 0]$$

O lado direito da restrição de desigualdade Fuzzy, expressa em (3.41), é dada por:

$$\begin{aligned} \Delta z_{P_{23Fuzzy}} &= (z_{P_{23Fuzzy}} + p) - h_{P_{23Fuzzy}}(x) \\ \Delta z_{P_{23Fuzzy}} &= 0.44 + 0.04 - 0 = 0.48 \end{aligned} \quad (3.44)$$

A restrição de desigualdade não linear do problema de programação Fuzzy, referente à função objetivo do problema Crisp de programação quadrática, é construída a partir dos valores de  $f_0$  e  $f_1$  obtidos como solução dos dois problemas de programação quadrática Crisp do primeiro estágio, sendo dados por:  $f_0 = 8.53647835$ ,  $f_1 = 8.53647836$ ,  $f_1 - f_0 = 1e-8$ . Uma vez que  $s = \Delta z - H(x)\Delta x$ , tem-se a seguinte expressão expandida para a restrição de desigualdade não linear do problema de programação Fuzzy.

$$\begin{aligned} \lambda(f_1 - f_0) + \frac{1}{2} [c_1 (\Delta z_1 - H_1(x)\Delta x)^2 + c_2 (\Delta z_2 - H_2(x)\Delta x)^2 \\ + c_3 (\Delta z_3 - H_3(x)\Delta x)^2 + c_4 (\Delta z_4 - H_4(x)\Delta x)^2 + c_5 (\Delta z_5 - H_5(x)\Delta x)^2 \\ + c_6 (\Delta z_6 - H_6(x)\Delta x)^2 + c_7 (\Delta z_7 - H_7(x)\Delta x)^2 + c_8 (\Delta z_8 - H_8(x)\Delta x)^2] \leq f_1 \end{aligned} \quad (3.45)$$

Os elementos  $c_i$ ,  $i = 1, \dots, 8$ , são as ponderações das medidas presentes no sistema, sendo definidos como a diagonal da matriz  $Q$ . Os termos de  $H_1$  a  $H_8$  são as linhas da matriz  $H(x)$ , calculada a partir de (3.42), e mostrada anteriormente.

De acordo com (3.41), o problema de estimação de estado, aplicando programação não linear Fuzzy, a ser resolvido na primeira iteração, é mostrado a seguir. A matriz  $H(x)$  e o termo  $\Delta z$  foram definidos anteriormente.

$$\begin{aligned}
& \max \text{ imizar } \lambda \\
& \text{sujeito a} \\
& \lambda(1e-8) + \frac{1}{2} [15625(0.8880 - H_1(x)\Delta x)^2 + 15625(1.1730 - H_2(x)\Delta x)^2 \\
& + 10000(-0.5010 - H_3(x)\Delta x)^2 + 15625(0.5680 - H_4(x)\Delta x)^2 \\
& + 15625(0.6630 - H_5(x)\Delta x)^2 + 10000(-0.286 - H_6(x)\Delta x)^2 \\
& + 62500(0.0060 - H_7(x)\Delta x)^2 + 62500(-0.032 - H_8(x)\Delta x)^2] \leq 8.53647836 \\
& H(x)\Delta x + s = \Delta z \\
& (0.04)\lambda + [0 \quad 10.95 \quad -10.95 \quad 0 \quad 4.11 \quad -4.11]\Delta x \leq 0.48 \\
& 0 \leq \lambda \leq 1 \\
& s \geq 0
\end{aligned} \tag{3.46}$$

O vetor  $\Delta x$  representa os resíduos das variáveis de estado do problema de estimação de estado Fuzzy,  $(\Delta\theta, \Delta V, \Delta\lambda)$ . Para solução deste problema, aplicou-se a função FMINCON, (MATLAB, 2005), que permite a modelagem de restrições não-lineares ao modelo de otimização.

Os resíduos das variáveis de estado para a primeira iteração do problema de programação não-linear Fuzzy e o valor das variáveis de estado para próxima iteração, são:

$$\Delta x = \begin{bmatrix} \Delta\theta_2 \\ \Delta\theta_3 \\ \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0211 \\ -0.0451 \\ -0.0009 \\ -0.0265 \\ -0.0580 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad x^1 = x^0 + \Delta x^1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.0211 \\ -0.0451 \\ -0.0009 \\ -0.0265 \\ -0.0580 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0211 \\ -0.0451 \\ 0.9991 \\ 0.9735 \\ 0.9420 \\ 1 \end{bmatrix}$$

A segunda iteração é resolvida assim como a primeira iteração, recalculando as matrizes  $H(x)$  e  $F(x)$  e os vetores  $\Delta z$  e  $\Delta z_{Fuzzy}$ , em função dos novos valores das variáveis de estado. O valor de  $p$  é mantido fixo e igual a 0.04 p.u. O valor do termo  $\Delta z_{P23Fuzzy}$  é corrigido em função do valor de  $h_{P23Fuzzy}(x)$ , calculado a partir dos novos valores das variáveis de estado, como em (3.44). A Tabela 3.3 mostra um sumário com os valores dos resíduos das variáveis de estado, durante cada iteração do processo de solução, enquanto a Tabela 3.4 mostra os valores estimados e os resíduos resultantes para cada medida

considerada no sistema exemplo. O segundo estágio do estimador de estado, aplicando programação quadrática Fuzzy com função objetivo não simétrica, converge em três iterações, para os valores mostrados abaixo.

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.00 \\ -1.247 \\ -2.746 \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.9996 \\ 0.9742 \\ 0.9439 \end{bmatrix}$$

$$\lambda = 1;$$

Tabela 3.3: Convergência do problema de programação Fuzzy não linear.

Resíduo das Variáveis de Estado (p.u.)	Iterações		
	1	2	3 (1.0e-005)
$\Delta \theta_2$	-0.0211	-0.0006	-0.0159
$\Delta \theta_3$	-0.0451	-0.0027	0.3146
$\Delta V_1$	-0.0009	-0.0001	-0.2425
$\Delta V_2$	-0.0265	-0.0001	-0.2607
$\Delta V_3$	-0.0580	0.0011	0.1110
$\Delta \lambda$	0	0	0

Tabela 3.4: Valores estimados e resíduos de estimação para as medidas do sistema.

Medidas	Valor Medido (p.u.)	Valor Estimado (p.u.)	Resíduo (p.u.)
$P_{12}$	0.888	0.8930	-0.0050
$P_{13}$	1.173	1.1711	0.0019
$P_2$	-0.501	-0.4959	0.0051
$Q_{12}$	0.568	0.5588	0.0092
$Q_{13}$	0.663	0.6677	-0.0047
$Q_2$	-0.286	-0.2977	-0.0117
$V_1$	1.006	0.9996	0.0064
$V_2$	0.968	0.9742	-0.0062

O valor unitário para a variável  $\lambda$  indica que a solução obtida satisfaz plenamente a função objetivo e as restrições associadas ao problema. Analisando as desigualdades no

ponto de convergência, verifica-se que ambas as restrições foram satisfeitas. Para a restrição de desigualdade da pseudo-medida Fuzzy, tem-se, no ponto de convergência:

$$\lambda p + F(x^{(2)}) \Delta x^{(2)} \leq \Delta z_{p23Fuzzy}$$

$$(0.04)\lambda + [0 \ 10.1721 \ -10.1721 \ 0 \ 3.7229 \ -3.7229 \ 0] * \Delta x^{(2)} \leq 0.0940$$

$$1 * 0.04 + 6.1551e-005 \leq 0.0940 \rightarrow 0.0461551 \leq 0.094$$

Para a restrição de desigualdade relativa à função objetivo do problema Crisp de programação quadrática, tem-se:

$$\lambda (f_1 - f_0) + \frac{1}{2} s^T Q s \leq f_1$$

$$1(1e-8) + 4.3191 \leq 8.53647836 \rightarrow 4.3191 \leq 8.53647836$$

Onde o valor do termo  $\frac{1}{2} s^T Q s$ , no ponto de convergência, é igual a 4.3191.

O emprego de uma função de pertinência trapezoidal, para a modelagem da pseudo-medida Fuzzy, resultaria em uma restrição de desigualdade adicional ao problema, conforme descrito no tópico (3.6) deste capítulo.

---

---

# CAPÍTULO 4

---

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

### 4.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tem o propósito de apresentar o conjunto de testes e os resultados alcançados, aplicando-se os modelos desenvolvidos neste trabalho de tese. A validação dos resultados é realizada comparando os mesmos com os resultados fornecidos pela aplicação das metodologias mais frequentemente encontradas na literatura especializada e apresentadas no Capítulo 2. Para obtenção dos resultados apresentados, neste capítulo, um conjunto de diferentes casos de teste, com diferentes planos de medição foram empregados. Para elaboração dos casos de teste, construção das medidas analógicas, pseudo-medidas Fuzzy, pseudo-medidas Crisps e critérios de avaliação dos resultados, uma série de premissas básicas foram estabelecidas. Sendo assim, anterior à apresentação dos resultados propriamente ditos, é realizada uma descrição das premissas básicas adotadas.

O conjunto de simulações realizadas tem o propósito de avaliar os modelos desenvolvidos no cálculo do vetor de estado do sistema, considerando a presença de informações qualitativas, modeladas como pseudo-medidas Fuzzy, e a presença de erros grosseiros em dados de medição ou na definição do valor central das pseudo-medidas Fuzzy. Resultados da aplicação dos modelos desenvolvidos na solução do problema da Modelagem da Rede Externa, em sistemas de transmissão de eletricidade interconectados e

no cálculo do vetor de estado em um sistema de distribuição de eletricidade são apresentados.

Ao contrário das técnicas tradicionais de Modelagem da Rede Externa e representação de sistemas de distribuição de eletricidade, em que as pseudo-medidas recebem um baixo nível de confiança em função da imprecisão inerente, as informações representadas por números Fuzzy não são ponderadas durante o problema de cálculo do vetor de estado, pois estas são inclusas no problema como restrições de desigualdade, conforme apresentado no Capítulo 3. Sendo assim, problemas numéricos associados às ponderações das pseudo-medidas não são verificados nos modelos de estimadores de estado considerando restrições Fuzzy. Modificações nos dados imprecisos são incorporadas ao modelo através da adequação da respectiva função de pertinência à nova situação.

## 4.2 CONSIDERAÇÕES INICIAIS PARA AS SIMULAÇÕES

Os seguintes modelos de estimadores de estado, descritos no Capítulo 2 e no Capítulo 3, são avaliados no presente capítulo:

- Estimador de Estado, aplicando o Método dos Mínimos Quadrados Ponderados (MQP), com a abordagem por Equações Normais. Este é capaz de processar valores medidos no sistema elétrico e pseudo-medidas Crisps. Necessita de uma ferramenta de pós-processamento para detecção e identificação de erros grosseiros. Neste trabalho foi utilizado o Teste de Hipótese baseado no valor da função objetivo  $J(x)$ , em conjunto a metodologia dos Maiores Resíduos Normalizados, para a detecção e identificação do erro grosseiro dentro do conjunto de medidas disponíveis. As medidas identificadas como portadoras de erros grosseiros são eliminadas do conjunto de medidas. Ambas as técnicas de pós-processamento são descritas no Capítulo 2, item (2.2.4).

- Estimador de Estado, aplicando a técnica do Valor Absoluto Ponderado dos Resíduos (VAPR), com modelagem definida de acordo com (ABUR, 2004) e descrita no Capítulo 2, item (2.2.1.2.2). Esta técnica é capaz de processar valores medidos no sistema elétrico e pseudo-medidas Crisps. Não é usual a aplicação de uma ferramenta de pós-processamento, em virtude deste tipo de estimador mostrar-se robusto a uma grande variedade de erros em dados de medição, com exceção dos erros identificados em medidas caracterizadas por pontos de alavancagem, (ABUR, 2004) e (FALCÃO, 1988). Em (FALCÃO, 1988) é descrita uma técnica de pós-processamento para detecção e identificação de erros grosseiros, em estimadores de estado, aplicando programação linear. Esta técnica de pós-processamento poderia ser aplicada ao estimador VAPR desenvolvido neste trabalho, uma vez que este é baseado na resolução de uma seqüência de problemas de programação linear.

- Estimador de Estado, aplicando Programação Linear Fuzzy com Função Objetivo Simétrica (PLFS). É capaz de processar valores medidos no sistema elétrico e pseudo-medidas Fuzzy.

- Estimador de Estado, aplicando Programação Linear Fuzzy com Função Objetivo Não-Simétrica (PLFNS). É capaz de processar valores medidos no sistema elétrico e pseudo-medidas Fuzzy.

- Estimador de Estado, aplicando Programação Quadrática Fuzzy com Função Objetivo Não-Simétrica (PQF). É capaz de processar valores medidos no sistema elétrico e pseudo-medidas Fuzzy.

Para os estimadores de estado, aplicando programação Fuzzy, não foi utilizada nenhuma ferramenta de pós-processamento, pois a robustez à presença de uma grande variedade de erros grosseiros em medidas e nas pseudo-medidas Fuzzy é uma característica fundamental a ser verificada nestes tipos de estimadores de estado.

A implementação computacional de todos os modelos de estimadores de estado desenvolvidos, neste trabalho, foi realizada utilizando o software Matlab, versão 7.1, (MATLAB, 2005). A função *linprog* foi utilizada para solução da seqüência de problemas de programação linear presentes nos Estimadores de Estado VAPR, PLFS e PLFNS. Esta função considera o emprego de algoritmos de otimização em larga escala e é baseada na técnica de solução de Pontos Interiores Lineares, a qual é uma variante do método de Pontos Interiores Primal–Dual, ou o método Simplex (MATLAB, 2005). A função *fmincon* foi utilizada para solução da seqüência de problemas de programação não-linear presentes no Estimador de Estado PQF. Esta função considera o emprego de algoritmos de otimização em larga escala e é baseada na técnica de solução por Pontos Interiores Primal–Dual e algoritmo Quase Newton (MATLAB, 2005). Para solução dos dois problemas iniciais de minimização quadrática do Estimador de Estado PQF é utilizada a função *quadprog*, conforme descrito em (MATLAB, 2005).

O critério de convergência, utilizado em todos os testes realizados, foi o desvio máximo entre duas iterações sucessivas dos valores das variáveis de estado estimadas no problema, magnitudes e ângulos de fase das tensões nas barras, com valor de desvio máximo igual a  $10^{-5}$  p.u..

Em todos os testes realizados, será apresentado o valor convergido da função objetivo do problema,  $J(x)$ , para cada modelo de estimador de estado avaliado. Para os estimadores de estado, considerando restrições Fuzzy, o valor convergido da função objetivo refere-se ao valor de  $\lambda$ , obtido na solução do último problema de programação destes estimadores.

As equações, que modelam as medidas ou pseudo-medidas inseridas no problema de estimação de estado, consideram um modelo acoplado entre as potências ativa e reativa. As medidas ou pseudo-medidas processadas pelos modelos de estimadores de estado abordados, neste trabalho, são: injeções de potência ativa e reativa nos barramentos, fluxos

de potência ativa e reativa em linhas de transmissão entre barramentos e magnitudes das tensões nos barramentos. As equações, que modelam estas medidas ou pseudo-medidas, estão definidas em (MONTICELLI, 1999a) e (ABUR, 2004). No Apêndice C, são apresentadas as expressões gerais para o cálculo dos fluxos e injeções de potência ativa e reativa nas barras, assim como as derivadas primeiras das medidas de magnitude de tensão, fluxo e injeção de potência ativa e reativa em relação as variáveis de estado, magnitude e ângulo das tensões nos barramentos.

#### 4.2.1. Construção do Conjunto de Medidas

Os valores das medidas processadas, pelos estimadores de estados avaliados, foram obtidos a partir da solução exata de um problema de fluxo de potência para o caso base, com inserção de um ruído aleatório, normalmente distribuído. De acordo com (FALCÃO, 1988) assume-se que o ruído de medição tem média zero e desvio padrão definido por:

$$\sigma_p = \frac{1}{3}(0.005F + 0.06z) \quad (4.1)$$

$$\sigma_T = 0.002z \quad (4.2)$$

Onde:

$\sigma_p$  é o desvio padrão associado as medidas de fluxo e injeção de potência ativa e reativa, em p.u;

$\sigma_T$  é o desvio padrão associado a medidas de tensão, em p.u;

$F$  é o valor de fundo de escala do medidor. Em virtude de não se dispor de informação sobre o valor de  $F$ , considerou-se este igual a zero. Sendo assim, o ruído aleatório a ser inserido no conjunto de medidas tem valor máximo igual a  $\pm 3\sigma$ , em 99.97% dos casos.

No vetor  $z$  estão incluídas medidas de magnitude de tensão, fluxo de potência ativa e reativa, e injeção de potência ativa e reativa, todas em p.u..

O ruído aleatório é adicionado a cada medida de acordo com a equação (4.3).

$$\tilde{z} = z + \mathcal{G} \quad (4.3)$$

Onde,  $\mathcal{G}$  é o ruído aleatório.

#### 4.2.2. Modelagem das Pseudo-medidas Fuzzy

A situação ideal, para a construção das funções de pertinência representativas das pseudo-medidas Fuzzy, seria utilizar toda a experiência acumulada pelos operadores de redes de energia elétrica para modelagem das mesmas, ou então os resultados da aplicação de ferramentas computacionais de suporte a tomada de decisão, como resultado de previsores de carga, fluxos de potência para diferentes condições de carregamento, dentre outras. No Capítulo 3, são descritas algumas ferramentas computacionais que podem auxiliar no levantamento de informações para construção das funções de pertinência, entretanto, nenhuma delas foi implementada, uma vez que foge ao escopo do trabalho.

A conjunção dos estimadores de estado, considerando restrições Fuzzy, com uma das ferramentas computacionais de suporte a decisão descrita, neste trabalho, representa uma boa alternativa para futuros trabalhos.

Em virtude da indisponibilidade de informações de operação dos sistemas de teste e curvas de regimes de carregamento/geração, além da disponibilidade de dados da rede elétrica para uma única condição de carregamento, a modelagem das pseudo-medidas Fuzzy obedeceu a um conjunto de regras, cujo propósito é permitir uma representação mais coerente possível com a situação real de operação.

O seguinte conjunto de regras foi adotado como referência na modelagem das pseudo-medidas Fuzzy:

- Pseudo-medidas de injeção e fluxo de potência ativa e reativa são inseridas aos pares nas simulações realizadas.

- Pseudo-medidas de tensão nos barramentos do sistema são modeladas por funções de pertinência com formato triangular;

- Pseudo-medidas de injeção e fluxo de potência ativa e reativa são modeladas por funções de pertinência com formato trapezoidal;

- O valor central da função de pertinência da pseudo-medida Fuzzy, independente do tipo de função de pertinência, é determinado de acordo com a seguinte regra:

- 1) Execução de um problema de fluxo de potência para o caso base do sistema;
- 2) Adição de um erro grosseiro, gerado de forma aleatória, e com valor compreendido no intervalo de  $\pm 10\sigma$  e  $\pm 40\sigma$ , ao valor calculado pelo fluxo de potência, para pseudo-medidas Fuzzy de fluxo e injeção de potência ativa e reativa. Para pseudo-medidas Fuzzy de magnitude de tensão, o valor do erro grosseiro adicionado ao valor fornecido pelo fluxo de potência, está compreendido entre  $\pm 5\sigma$  e  $\pm 10\sigma$ . A adição de um erro grosseiro ao valor fornecido pelo fluxo de potência tem o propósito de simular uma situação de imprecisão, na informação qualitativa empregada para a modelagem da pseudo-medida Fuzzy. O valor numérico extraído a partir de uma informação qualitativa imprecisa é empregado na definição do valor central da pseudo-medida Fuzzy.

Na Figura 4.1, é mostrado o formato padrão das funções de pertinência trapezoidal e triangular consideradas para a representação das pseudo-medidas Fuzzy. As funções de pertinência consideradas serão sempre simétricas em relação ao valor central. Os parâmetros  $B_0$  e  $B_1$  representam a faixa de variação aceitável em relação ao valor central,  $C$ , com pertinência unitária, enquanto  $A_0$  e  $A_1$  representam os pontos de pertinência nula.

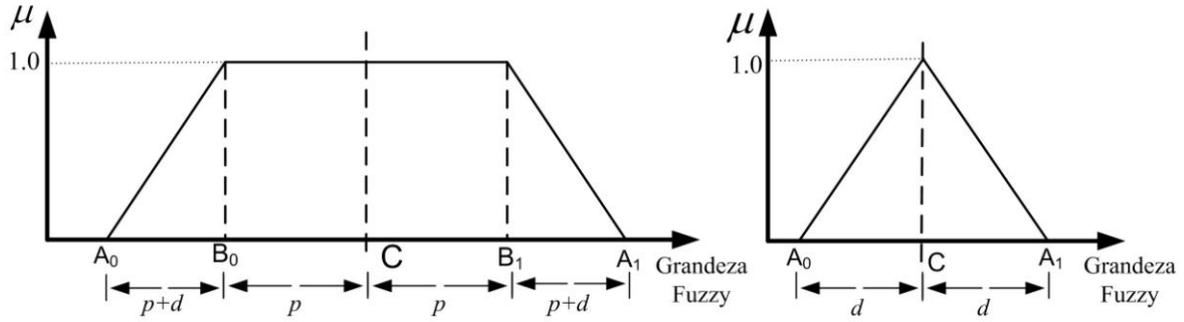


Figura 4.1: Funções de pertinência trapezoidal e triangular.

Para a função de pertinência trapezoidal os valores  $B_0$  e  $B_1$ ,  $A_0$  e  $A_1$  são determinados em função de  $p$  e  $d$  de acordo com as seguintes expressões:

$$B_0 = B_1 = C \pm p \quad (4.4)$$

$$A_0 = A_1 = C \pm p \pm d \quad (4.5)$$

Para a função de pertinência triangular tem-se as seguintes expressões:

$$A_0 = A_1 = C \pm d \quad (4.6)$$

Os valores de  $p$  e  $d$  são calculados em razão de porcentagem do valor central ou de acordo com o valor do desvio padrão adicionado ao valor central de cada pseudo-medida Fuzzy considerada no processo de estimação de estado. Em (4.7) e (4.8), são mostradas as equações para a determinação de  $p$  e  $d$ , em funções de pertinência trapezoidais, enquanto (4.9) mostra a expressão para o cálculo de  $d$  em funções de pertinência triangulares. O termo  $k$  é a constante de proporcionalidade da função de pertinência, podendo estar em porcentagem ou em função do valor do desvio padrão considerado para o valor central da mesma.

$$p = k C/100 \quad (4.7)$$

$$d = k B/100 \quad \therefore B = B_0 = B_1 \quad (4.8)$$

$$d = k C/100 \quad (4.9)$$

Os valores considerados para  $k$  procuraram representar variações possíveis de se verificar em situações reais. De acordo com a simulação realizada, valores diferenciados foram utilizados para  $k$ . Assim, à medida que os resultados das simulações forem apresentados, os valores utilizados para  $k$  e, conseqüentemente, para  $p$  e  $d$ , na simulação, serão descritos. Em alguns testes ajustou-se o valor de  $k$ , após testes com valores distintos, de forma que o melhor resultado no cálculo do vetor de estado fosse alcançado.

Um roteiro, para a construção das pseudo-medidas Fuzzy, é assim proposto:

- 1) Determina-se o valor central da pseudo-medida Fuzzy, ou termo  $C$  da Figura 4.1.  
O valor central é obtido a partir do resultado de um problema de fluxo de potência, com adição de um erro grosseiro ao mesmo, conforme descrito anteriormente;
- 2) Para funções de pertinência trapezoidais, determina-se o valor do incremento  $p$ . O valor numérico de  $p$  é calculado a partir do valor central  $C$ , previamente definido, sendo seu valor adicionado ao valor de  $C$  para a composição de  $B_0$  e  $B_1$ . O valor de  $p$  tem caráter subjetivo, mensurando uma faixa de aceitação satisfatória da informação qualitativa imprecisa;
- 3) Determina-se o valor do incremento  $d$ . O valor numérico de  $d$  é calculado a partir do valor central  $C$ , sendo seu valor adicionado ao valor de  $B_0$  e  $B_1$  para a composição dos termos  $A_0$  e  $A_1$ . O valor de  $d$  tem caráter subjetivo, mensurando uma faixa de decréscimo na qualidade da informação qualitativa imprecisa;
- 4) Determinados os termos  $C$ ,  $B_0$ ,  $B_1$ ,  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $p$  e  $d$ , constroem-se uma função de pertinência como na Figura 4.1;
- 5) Aplica-se as relações definidas no Capítulo 3, tópico (3.6), para a modelagem das restrições de desigualdade Fuzzy dos estimadores de estado propostos.

### 4.2.3. Modelagem das Pseudo-medidas Crisps

Neste trabalho, as pseudo-medidas Crisps são encaradas como um caso particular das pseudo-medidas Fuzzy. O valor considerado para a modelagem da pseudo-medida Crisp é igual ao valor central da função de pertinência da pseudo-medida Fuzzy. Isto permite uma comparação mais verossímil entre os resultados do cálculo do vetor de estado para os estimadores de estado Fuzzy e estimadores MQP ou VAPR avaliados neste trabalho.

As pseudo-medidas Crisps são representadas no estimador de estado MQP, através da matriz Jacobiana  $H$ , com valor elevado de variância. Para o estimador de estado VAPR, as pseudo-medidas Crisps são representadas na matriz de restrições de igualdade do problema.

O valor considerado para a variância de cada pseudo-medida Crisp, em cada simulação, é descrito com a mesma.

### 4.2.4. Critérios para Avaliação do Resultado da Estimação de Estado

O resultado do cálculo do vetor de estado será sempre comparado ao valor verdadeiro, obtido através da solução de um problema de fluxo de potência. Sendo assim, dois critérios, para análise dos erros de estimação em relação ao valor verdadeiro, são propostos. O primeiro critério baseia-se na análise do erro absoluto de estimação para cada grandeza de interesse estimada no sistema, enquanto o segundo critério considera o erro médio quadrático do conjunto de grandezas estimadas. Além dos erros de estimação para os ângulos e magnitudes das tensões em cada barramento, serão também calculados erros de estimação para os fluxos e injeções de potência ativa e reativa nas linhas e barras do sistema, respectivamente. Os valores calculados para os fluxos e injeções de potência, a partir dos estados estimados, serão comparados àqueles obtidos a partir da solução de um problema de fluxo de potência. Para o cálculo dos erros absoluto e médio quadrático

considera-se que os valores de todas as grandezas são dados em p.u., exceto o valor do ângulo das tensões nas barras, que é definido em graus.

Em (4.10) e (4.11), são mostradas as equações para o cálculo do erro absoluto de estimação para as magnitudes e ângulos das tensões, enquanto (4.12) e (4.13) mostram as equações para o cálculo do erro médio quadrático para o conjunto de estados estimados. As expressões compreendidas entre (4.14) e (4.17) mostram as equações para o cálculo do erro absoluto de estimação para as injeções e fluxos de potência ativa e reativa, enquanto as expressões entre (4.18) e (4.21) mostram as equações para o cálculo do erro médio quadrático destas grandezas.

$$EA_{V_i} = \left| V_i - \hat{V}_i \right| * 100 \quad (4.10)$$

$$EA_{\theta_i} = \left| \theta_i - \hat{\theta}_i \right| * 100 \quad (4.11)$$

$$EMQ_V = \left[ \frac{1}{NB} \sum_{i=1}^{NB} \left( V_i - \hat{V}_i \right)^2 \right] * 100 \quad (4.12)$$

$$EMQ_{\theta} = \left[ \frac{1}{NB} \sum_{i=1}^{NB} \left( \theta_i - \hat{\theta}_i \right)^2 \right] * 100 \quad (4.13)$$

$$EA_{P_i} = \left| P_i - \hat{P}_i \right| * 100 \quad (4.14)$$

$$EA_{Q_i} = \left| Q_i - \hat{Q}_i \right| * 100 \quad (4.15)$$

$$EA_{P_{f_{ij}}} = \left| P_{f_{ij}} - \hat{P}_{f_{ij}} \right| * 100 \quad (4.16)$$

$$EA_{Q_{f_{ij}}} = \left| Q_{f_{ij}} - \hat{Q}_{f_{ij}} \right| * 100 \quad (4.17)$$

$$EMQ_P = \left[ \frac{1}{NB} \sum_{i=1}^{NB} \left( P_i - \hat{P}_i \right)^2 \right] * 100 \quad (4.18)$$

$$EMQ_{Q_o} = \left[ \frac{1}{NB} \sum_{i=1}^{NB} \left( Q_i - \hat{Q}_i \right)^2 \right] * 100 \quad (4.19)$$

$$EMQ_{P_f} = \left[ \frac{1}{NL} \sum_{i=1}^{NL} \left( P_{f_i} - \hat{P}_{f_i} \right)^2 \right] * 100 \quad (4.20)$$

$$EMQ_{Q_f} = \left[ \frac{1}{NL} \sum_{i=1}^{NL} \left( Q_{f_i} - \hat{Q}_{f_i} \right)^2 \right] * 100 \quad (4.21)$$

Onde:

NB é o número de barramentos do sistema;

NL é o número de linhas de transmissão do sistema;

As grandezas presentes nas equações (4.10) a (4.21), com índice definido pelo acento circunflexo, indicam valores estimados para magnitudes e ângulos das tensões, e valores calculados a partir do resultado da estimação, injeções e fluxos de potência ativa e reativa. As grandezas, sem presença de índice superior, indicam os valores verdadeiros obtidos pela execução de um problema de fluxo de potência.

Nas expressões para o cálculo do erro médio quadrático, para o fluxo de potência ativa e reativa entre duas barras  $i$  e  $j$ , consideram-se fluxos de potência nas direções  $ij$  e  $ji$ . As expressões (4.16) e (4.17) mostram o cálculo do erro absoluto do fluxo de potência ativa e reativa, considerando a direção de  $i$  para  $j$ . Contudo estas podem também ser utilizadas para calcular o erro absoluto do fluxo de potência na direção  $ji$ .

#### 4.2.5. Sistemas de Teste

Para realização das simulações, os seguintes sistemas testes foram considerados:

- IEEE 14 barras e 20 linhas;
- IEEE 30 barras e 41 linhas;
- IEEE 118 barras e 186 linhas;

- Sistema de distribuição de 33 barramentos e 32 circuitos. Este sistema é freqüentemente utilizado em estudos de planejamento de redes de distribuição de eletricidade, sendo inicialmente apresentado em (BARAN, 1989).

Os dados elétricos e de carregamento de todos os sistemas teste do IEEE são encontrados em [www.ee.washington.edu/research/pstca/](http://www.ee.washington.edu/research/pstca/).

Uma descrição completa com os dados elétricos e o resultado do fluxo de potência no caso base, para todos os sistema testes, é realizada no Apêndice B.

Diferentes planos de medição e níveis de redundância de medidas foram construídos nos sistemas testes. Cada sistema teste, com seu plano de medição considerado, serão descritos com a simulação.

#### **4.2.6. Preparação dos Casos Teste**

Os casos testes podem ser divididos em três grupos:

1) Representação de pseudo-medidas no problema de estimação de estado. Para este conjunto de simulações será considerado o sistema IEEE 14 barras. Estes testes têm o objetivo de avaliar a capacidade dos estimadores de estado propostos no cálculo do vetor de estado, considerando ou não a presença de erros grosseiros no conjunto de medições ou nas próprias pseudo-medidas. Nestes testes, as seguintes características dos estimadores de estado propostos foram analisadas:

- Representação de um par de pseudo-medidas Fuzzy no problema de estimação de estado, sem considerar a presença de erro grosseiro no valor central da função de pertinência característica;

- Representação de pseudo-medidas Fuzzy redundantes, considerando a presença de erro grosseiro no valor central da função de pertinência característica;

- Representação de pseudo-medidas Fuzzy críticas, considerando a presença de erro grosseiro no valor central da função de pertinência característica. A representação de pseudo-medidas Fuzzy críticas é de fundamental importância dentro deste trabalho, pois somente através desta é possível a estimação de estado em redes de distribuição de eletricidade ou em sistemas de transmissão de eletricidade com rede externa desconhecida, caracterizados por serem “não observáveis” como um todo.

- Avaliação dos estimadores de estado considerando a presença de erros grosseiros em dados de medição. Neste conjunto de simulações, as pseudo-medida Fuzzy apresentam adição de erros grosseiros no valor central da função de pertinência característica. Os seguintes tipos de erros grosseiros foram averiguados:

- Erros grosseiros não conformativos e não interativos;
- Erros grosseiros não conformativos e interativos;
- Erros grosseiros devido a falhas no sistema de aquisição de medidas.

2) Solução do cálculo do vetor de estado em redes de distribuição de eletricidade. O sistema teste considerado para a rede de distribuição se caracteriza pela quase total ausência de pontos de medição, sendo que as únicas medidas verificadas encontram-se no barramento de entrada da rede. A observabilidade total da rede de distribuição é alcançada com a inclusão de um elevado número de pseudo-medidas Fuzzy ou Crisps. As pseudo-medidas, inseridas na rede de distribuição, representam pseudo-medidas de injeção de potência ativa e reativa. As seguintes situações foram avaliadas para a rede de distribuição:

- Todas as pseudo-medidas Fuzzy, com valor central definido diretamente pelo carregamento considerado em um problema de fluxo de potência, sem adição de erro grosseiro ao mesmo. Não se considera a inclusão de erro grosseiro no conjunto de medidas.

- Adição de erro grosseiro ao valor central de um número de pseudo-medidas Fuzzy e, conseqüentemente, nas pseudo-medidas Crisps. Não se considera a inclusão de erro grosseiro no conjunto de medidas.

- Reprodução da situação anterior de avaliação, considerando as mesmas pseudo-medidas e o mesmo valor de erro grosseiro adicionado ao valor central das mesmas, porém considerando a inclusão de erro grosseiro em um par de medidas.

3) Solução do problema de modelagem da rede elétrica externa em sistemas de transmissão de eletricidade. O modelo de fluxo de potência total da rede elétrica, rede interna mais rede externa, é construído através da aplicação da técnica de estimação de estado em um passo, em que se executa um único estimador de estado para a rede externa e interna. Para este conjunto de simulações serão considerados os sistemas IEEE 14 barras, IEEE 30 barras e IEEE118 barras. Cada sistema foi dividido em uma rede interna e em uma ou mais redes externas. A rede interna é totalmente observável, caracterizando-se pela presença de medidas. A rede elétrica externa torna-se observável para a rede interna, permitindo a estimação do seu estado, através da representação de pseudo-medidas Fuzzy ou Crisps. Para as medidas presentes na rede interna não se considerou a inclusão de erro grosseiro em nenhuma das simulações, sendo as mesmas construídas conforme descrito no item (4.1.1). As seguintes divisões entre redes interna e externa foram adotadas para os sistemas de teste:

- Sistema IEEE 14 barras, dividido em rede interna e uma rede externa. A divisão das redes interna e externa foi realizada com auxílio do aplicativo “Power Education Toolbox”, (P.E.T, 2004), encontrado em [www.ece.neu.edu/~abur/pet.html](http://www.ece.neu.edu/~abur/pet.html).

- Sistema IEEE 30 barras, dividido em rede interna e uma rede externa. A divisão adotada para o sistema em rede interna e externa, assim como a configuração de medidas considerada para a rede interna, é sugerida em (DO COUTTO FILHO, 2005). A

representação das pseudomedidas Fuzzy, na rede externa, procurou tornar a mesma observável com a inclusão do menor número possível de pseudo-medidas.

- Sistema IEEE 30 barras, dividido em rede interna e duas redes externas. A divisão das redes interna e externa foi realizada com auxílio do aplicativo “Power Education Toolbox”, (P.E.T, 2004). A configuração de medidas considerada para a rede interna é sugerida em (DO COUTTO FILHO, 2005). Em cada rede externa foram representadas pseudo-medidas Fuzzy de natureza diferenciada, sendo que em uma das redes externas também são representadas medidas virtuais de injeção nula.

- Sistema IEEE 118 barras, dividido em rede interna e duas redes externas. A divisão do sistema IEEE118 barras, em rede interna e duas redes externas, foi determinada a partir da divisão proposta em (YOON, 2005). A configuração de medidores para a rede interna também é proposta em (YOON, 2005).

Deve-se enfatizar, para todas as simulações realizadas nos sistemas teste, que nenhum método para determinação dos pontos de alocação de pseudo-medidas Fuzzy foi aplicado, uma vez que foge ao escopo deste trabalho. As pseudo-medidas foram alocadas com o propósito de solucionar problemas de observabilidade, ou com o intuito de criar redundância ao sistema de medição disponível.

### **4.3. RESULTADOS DOS CASOS TESTES**

#### **4.3.1. Representação de Pseudo-medidas Fuzzy**

Para demonstração do processo de representação de pseudo-medidas Fuzzy, no processo de estimação de estado em sistemas de energia elétrica, será considerado o sistema teste do IEEE com 14 barras e 20 linhas, com a configuração de medição definida na Figura 4.2. Este sistema de medidas apresenta um ponto de medição de magnitude de tensão, 23 pontos de medição ativa e 23 pontos de medição reativa, com uma redundância

total do sistema de medição igual a 1.741. A construção do conjunto de medidas, pseudo-medidas Fuzzy e pseudo-medidas Crisp é realizada de acordo com o definido nos itens (4.1.1), (4.1.2) e (4.1.3), respectivamente.

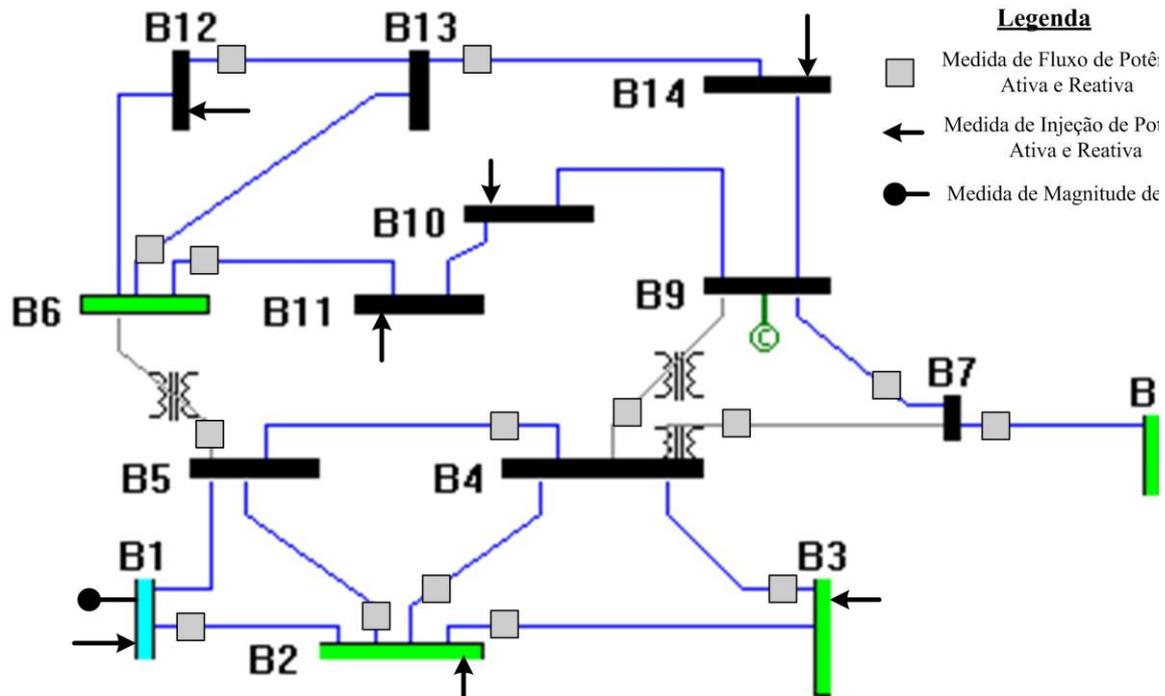


Figura 4.2: Plano de medição do sistema teste IEEE 14 barras.

O resultado do cálculo do vetor de estado pelos estimadores de estado, considerando restrições Fuzzy, é comparado com o resultado do fluxo de potência e com o resultado da aplicação de estimadores de estado baseados em informações Crisps, MQP e VAPR.

Em função da inexistência de informações operacionais ou do levantamento de curvas típicas de operação, a construção das funções de pertinência das pseudo-medidas Fuzzy obedeceu aos seguintes princípios:

“Para funções de pertinência trapezoidais, variações de 10% do valor central são consideradas com pertinência unitária, enquanto que o decréscimo de pertinência ocorre para variações iguais a 15% do valor central.”

“Para funções de pertinência triangulares, o decréscimo de pertinência ocorre para variações iguais a 5% do valor central.”

Os valores em p.u. das grandezas são determinados em uma base de potência de 100MW e tensão igual a 138 KV.

#### 4.3.1.1. Representação de Pseudo-medidas Fuzzy Redundantes

Nesta simulação, considerou-se a inclusão de um par de pseudo-medidas de injeção de potência na barra 13, da Figura 4.2, representativas das condições de carregamento ativo e reativo nesta barra. Foram construídas uma pseudo-medida Fuzzy de injeção de potência ativa e uma pseudo-medida Fuzzy de injeção de potência reativa. O valor central das funções de pertinência referente às pseudo-medidas Fuzzy é determinado como no item (4.1.2). A Tabela 4.1 mostra o valor central e o valor correspondente para os pontos de pertinência unitária e pertinência zero da função de pertinência das pseudo-medidas Fuzzy consideradas, sendo estes pontos definidos na Figura 4.1. Também é mostrado o valor do fluxo de potência, ao qual é adicionado um erro grosseiro entre  $\pm 10$  e  $\pm 40$  desvios padrões. Os valores considerados, para as faixas de pertinência, procuram evitar grandes variações em relação ao valor central da pseudo-medida Fuzzy. Para as duas pseudo-medidas Crisps avaliadas nos estimadores de estado MQP e VAPR, adotou-se uma variância igual a 10.

Tabela 4.1: Valores dos vértices da função de pertinência da pseudo-medida Fuzzy.

Pseudo-medida Fuzzy	Valor Central com Erro (p.u.)	A <sub>0</sub> (p.u.)	B <sub>0</sub> (p.u.)	B <sub>1</sub> (p.u.)	A <sub>1</sub> (p.u.)	Valor do Fluxo de Potência (p.u.)
P <sub>13</sub>	0.1660	0.1328	0.1494	0.1826	0.1992	0.1350
Q <sub>13</sub>	0.0442	0.0354	0.0398	0.0486	0.0530	0.058

O resultado do cálculo do vetor de estado, aplicando os estimadores de estado PLFS, PLFNS e PQF, assim como o resultado do fluxo de potência é mostrado na Tabela 4.2. Em todas as medidas se considera o acréscimo de um ruído aleatório, conforme descrito no item (4.1.1), com valor máximo igual a  $\pm 3\sigma$ . A condição inicial, para o problema de programação não linear do estimador de estado PQF, foi valor nulo para os ângulos das tensões, unitário para as magnitudes das tensões, e unitário para a variável lambda,  $\lambda$ .

Tabela 4.2: Resultado do cálculo do vetor de estado.

Barra	Fluxo de Potência		Estimador PLFS		Estimador PLFNS		Estimador PQF	
	V (p.u.)	TETA (Graus)	V (p.u.)	TETA (Graus)	V (p.u.)	TETA (Graus)	V (p.u.)	TETA (Graus)
1	1.06	0	1.0587	0	1.0590	0	1.0550	0
2	1.045	-4.957	1.0455	-5.0225	1.0453	-5.0815	1.0408	-5.1068
3	1.01	-12.633	1.0122	-12.7432	1.0119	-12.8207	1.0056	-12.9173
4	1.026	-10.366	1.0276	-10.5242	1.0271	-10.6524	1.0212	-10.6749
5	1.033	-8.947	1.0341	-9.1087	1.0339	-9.1751	1.0279	-9.1751
6	1.07	-14.879	1.0715	-15.1004	1.0713	-15.2127	1.0653	-15.3015
7	1.045	-13.45	1.0464	-13.6420	1.0462	-13.7833	1.0405	-13.8114
8	1.09	-13.45	1.0931	-13.6420	1.0913	-13.7833	1.0858	-13.8114
9	1.028	-15.07	1.0292	-15.2213	1.0295	-15.4301	1.0237	-15.4685
10	1.028	-15.318	1.0291	-15.4799	1.0293	-15.6662	1.0234	-15.7208
11	1.045	-15.213	1.0464	-15.4117	1.0465	-15.5605	1.0405	-15.6398
12	1.053	-15.72	1.0546	-15.9528	1.0547	-16.1061	1.0490	-16.1866
13	1.046	-15.738	1.0477	-15.9859	1.0471	-16.2321	1.0411	-16.3107
14	1.017	-16.394	1.0132	-16.8751	1.0190	-16.8184	1.0133	-16.8564

Na Tabela 4.3, é mostrado o valor dos erros médio quadráticos ( $EMQ$ ) e o valor máximo do erro absoluto ( $Max(EA)$ ) para as grandezas de interesse. Os baixos valores de erros mostram que os estimadores foram eficazes no cálculo do vetor de estado, contornando o problema da imprecisão existente na representação de pseudo-medidas.

Tabela 4.3: Erros de estimação.

Erros	Estimador PLFS	Estimador PLFNS	Estimador PQF
EMQ <sub>V</sub>	3.4774e-006	1.8057e-006	2.1674e-005
EMQ <sub>Θ</sub>	0.0447	0.1045	0.1395
EMQ <sub>P</sub>	2.0273e-004	2.7527e-004	2.3261e-004
EMQ <sub>Q</sub>	1.8967e-004	1.3115e-004	4.1621e-005
EMQ <sub>Pf</sub>	7.4803e-005	1.5074e-004	1.1394e-004
EMQ <sub>Qf</sub>	5.2736e-005	4.4677e-005	8.1339e-005
Max(EA <sub>V</sub> )	0.0038	0.0020	0.0058
Max(EA <sub>Θ</sub> )	0.4811	0.4941	0.5727
Max(EA <sub>Pi</sub> )	4.2389e-004	4.6797e-004	3.7395e-004
Max(EA <sub>Qi</sub> )	4.8568e-004	4.1075e-004	1.8958e-004
Max(EA <sub>P<sub>fe</sub></sub> )	2.6769e-004	3.0101e-004	2.7335e-004
Max(EA <sub>Q<sub>fe</sub></sub> )	1.5149e-004	1.5998e-004	2.1951e-004

O resultado do cálculo do vetor de estado e o valor dos erros de estimação para os estimadores MQP e VAPR são mostrados nas Tabelas 4.4 e 4.5, respectivamente.

Tabela 4.4: Resultado do cálculo do vetor de estado.

Barra	Fluxo de Potência		Estimador MQP		Estimador VAPR	
	V (p.u.)	TETA (Graus)	V (p.u.)	TETA (Graus)	V (p.u.)	TETA (Graus)
1	1.06	0	1.0527	0	1.0610	0
2	1.045	-4.957	1.0381	-5.0214	1.0477	-4.8937
3	1.01	-12.633	1.0041	-12.7669	1.0142	-12.4852
4	1.026	-10.366	1.0198	-10.4863	1.0292	-10.2364
5	1.033	-8.947	1.0265	-8.9939	1.0361	-8.7724
6	1.07	-14.879	1.0643	-14.9226	1.0736	-14.5503
7	1.045	-13.45	1.0386	-13.6474	1.0476	-13.3500
8	1.09	-13.45	1.0836	-13.6474	1.0927	-13.3500
9	1.028	-15.07	1.0217	-15.3384	1.0309	-15.0245
10	1.028	-15.318	1.0214	-15.5498	1.0306	-15.2286
11	1.045	-15.213	1.0390	-15.3415	1.0481	-15.0071
12	1.053	-15.72	1.0472	-15.7835	1.0567	-15.5140
13	1.046	-15.738	1.0404	-15.8084	1.0492	-15.6566
14	1.017	-16.394	1.0111	-16.6113	1.0203	-16.3663

Tabela 4.5: Erros de estimação.

Erros	ESTIMADOR MQP	ESTIMADOR VAPR
EMQ <sub>V</sub>	3.9417e-005	9.5011e-006
EMQ <sub>Θ</sub>	0.0226	0.0217
EMQ <sub>P</sub>	1.2083e-004	4.3018e-004
EMQ <sub>Q</sub>	3.0489e-005	1.2067e-004
EMQ <sub>Pf</sub>	5.2271e-005	1.5753e-004
EMQ <sub>Qf</sub>	1.0015e-004	7.7636e-005
Max(EA <sub>V</sub> )	0.0073	0.0042
Max(EA <sub>Θ</sub> )	0.2684	0.3287
Max(EA <sub>Pi</sub> )	3.3503e-004	6.1028e-004
Max(EA <sub>Qi</sub> )	1.5674e-004	3.3117e-004
Max(EA <sub>P<sub>fe</sub></sub> )	2.3395e-004	3.2915e-004
Max(EA <sub>Q<sub>fe</sub></sub> )	2.2747e-004	1.7603e-004

O resíduo de estimação, a cada iteração do processo de convergência, para todos os estimadores de estado avaliados, é mostrado na Tabela 4.6. Para os estimadores de estado, considerando restrições Fuzzy, a convergência refere-se ao último problema de programação resolvido. Direção de convergência semelhante é verificada em todos os estimadores de estado, com critério de convergência atendido em quatro iterações.

Tabela 4.6: Convergência dos estimadores de estado.

Iteração	PLFS	PLFNS	PQF	MQP	VAPR
1	0.3070	0.314	0.3074	0.308	0.307
2	0.0203	0.027	0.0278	0.0305	0.0259
3	0.0010	0.00066	0.0013	0.00082	0.0005
4	2.25e-6	8.00e-6	6.9944e-6	7.00e-6	1.300e-6

O valor final da função objetivo,  $J(x)$ , em todos os estimadores de estado, considerando restrições Fuzzy, foi igual a 1, indicando que todas as restrições foram atendidas satisfatoriamente. O valor final da função objetivo do estimador de estado MQP foi 18.61, enquanto para o estimador de estado VAPR este foi igual a 0.34958.

### 4.3.1.2. Representação de Diferentes Pseudo-medidas Fuzzy Redundantes

O propósito da simulação é demonstrar a representação de um número considerável de pseudo-medidas Fuzzy redundantes no problema de estimação de estado, empregando pseudo-medidas Fuzzy de injeção de potência ativa e reativa, pseudo-medidas Fuzzy de fluxo de potência ativa e reativa e pseudo-medidas Fuzzy de magnitude de tensão. O processo de composição das medidas e pseudo-medidas Crisps seguem os princípios descritos nos itens (4.1.1) e (4.1.3), respectivamente. Para a modelagem das pseudo-medidas Fuzzy são seguidas as definições de (4.1.2), e os lemas enunciados em (4.2.1).

Os pares de pseudo-medidas Fuzzy redundantes são representadas no sistema IEEE 14 barras da Figura 4.2: pseudo-medidas Fuzzy de injeção de potência ativa e reativa na barra 13 ( $P_{13}$ ,  $Q_{13}$ ), pseudo-medidas Fuzzy de fluxo de potência ativa e reativa entre as barras 9-10 e 9-14 ( $P_{9-10}$ ,  $Q_{9-10}$ ,  $P_{9-14}$ ,  $Q_{9-14}$ ), e pseudo-medida Fuzzy de magnitude de tensão na barra 9. A redundância do sistema de medidas em conjunto com as pseudo-medidas é igual a 2.0.

A Tabela 4.7 mostra o valor central, com a inclusão de um erro grosseiro aleatório entre  $\pm 10\sigma$  e  $\pm 40\sigma$ , e o valor correspondente para os pontos de pertinência unitária e pertinência zero da função de pertinência das pseudo-medidas Fuzzy consideradas, sendo estes pontos definidos na Figura 4.1. Também é mostrado o valor do fluxo de potência.

Tabela 4.7: Valores dos vértices das funções de pertinência das pseudo-medidas Fuzzy.

Pseudo-medidas Fuzzy	Valor Central com Erro (p.u.)	$A_0$ (p.u.)	$B_0$ (p.u.)	$B_1$ (p.u.)	$A_1$ (p.u.)	Valor do Fluxo de Potência (p.u.)
$P_{13}$	0.0868	0.0738	0.0781	0.0955	0.0998	0.1350
$Q_{13}$	0.0774	0.0658	0.0697	0.0851	0.0890	0.0580
$P_{9-10}$	0.0549	0.0467	0.0494	0.0604	0.0631	0.0478
$Q_{9-10}$	0.0148	0.0170	0.0133	0.0126	0.0163	0.0168
$P_{9-14}$	0.0770	0.0654	0.0693	0.0847	0.0886	0.0885
$Q_{9-14}$	0.0024	0.0020	0.0022	0.0026	0.0028	0.0018
$V_9$	1.0450	0.9927	-	-	1.0972	1.0280

O resultado do cálculo do vetor de estado aplicando os estimadores de estado PLFS, PLFNS e PQF, assim como o resultado obtido pela aplicação do fluxo de potência é mostrado na Tabela 4.8. Em todas as medidas se considera o acréscimo de um ruído aleatório conforme descrito no item (4.1.1), com valor máximo igual a  $\pm 3\sigma$ . A condição inicial para o problema de programação não linear do estimador de estado PQF foi valor nulo para os ângulos das tensões, unitário para as magnitudes das tensões, e unitário para a variável lambda,  $\lambda$ .

Tabela 4.8: Resultado do cálculo do vetor de estado.

Barra	Fluxo de Potência		Estimador PLFS		Estimador PLFNS		Estimador PQF	
	V (p.u.)	TETA (Graus)	V (p.u.)	TETA (Graus)	V (p.u.)	TETA (Graus)	V (p.u.)	TETA (Graus)
1	1.06	0	1.0602	0	1.0590	0	1.0546	0
2	1.045	-4.957	1.0459	-4.9431	1.0456	-4.9449	1.0402	-5.0008
3	1.01	-12.633	1.0112	-12.7387	1.0108	-12.8269	1.0056	-12.8839
4	1.026	-10.366	1.0277	-10.2975	1.0277	-10.3910	1.0224	-10.4157
5	1.033	-8.947	1.0338	-8.9297	1.0339	-9.0308	1.0285	-9.0337
6	1.07	-14.879	1.0706	-14.7822	1.0705	-14.9935	1.0658	-14.9443
7	1.045	-13.45	1.0455	-13.4960	1.0464	-13.6092	1.0408	-13.6161
8	1.09	-13.45	1.0923	-13.4967	1.0942	-13.6092	1.0878	-13.6161
9	1.028	-15.07	1.0277	-15.0637	1.0288	-15.1405	1.0231	-15.1917
10	1.028	-15.318	1.0275	-15.2808	1.0284	-15.3836	1.0230	-15.4154
11	1.045	-15.213	1.0454	-15.1363	1.0457	-15.3006	1.0409	-15.2864
12	1.053	-15.72	1.0533	-15.5225	1.0538	-15.6979	1.0482	-15.7276
13	1.046	-15.738	1.0480	-15.3794	1.0483	-15.5766	1.0422	-15.6008
14	1.017	-16.394	1.0197	-16.1263	1.0204	-16.2255	1.0138	-16.3780

Na Tabela 4.9 é mostrado o valor dos erros médio quadráticos ( $EMQ$ ) e o valor máximo do erro absoluto ( $Max(EA)$ ) para as grandezas de interesse. Os baixos valores dos erros mostram que os estimadores foram eficazes no cálculo do vetor de estado.

Tabela 4.9: Erros de estimação.

Erros	Estimador PLFS	Estimador PLFNS	Estimador PQF
EMQ <sub>V</sub>	1.6599e-006	3.1346e-006	1.8490e-005
EMQ <sub>Θ</sub>	0.0198	0.0129	0.0131
EMQ <sub>P</sub>	4.6726e-004	3.5287e-004	6.5894e-004
EMQ <sub>Q</sub>	4.5197e-005	1.2256e-004	5.5639e-005
EMQ <sub>Pf</sub>	1.4687e-004	1.8886e-004	1.0256e-004
EMQ <sub>Qf</sub>	1.1624e-004	7.6005e-005	1.0193e-004
Max(EA <sub>V</sub> )	0.0027	0.0042	0.0054
Max(EA <sub>Θ</sub> )	0.3586	0.1939	0.2509
Max(EA <sub>Pi</sub> )	5.7544e-004	5.3923e-004	5.5062e-004
Max(EA <sub>Qi</sub> )	1.6421e-004	3.6110e-004	1.9911e-004
Max(EA <sub>P<sub>fe</sub></sub> )	3.5046e-004	3.7885e-004	2.5690e-004
Max(EA <sub>Q<sub>fe</sub></sub> )	2.3284e-004	2.1016e-004	2.1499e-004

O resultado do cálculo do vetor de estado e o valor dos erros de estimação para os estimadores MQP e VAPR são mostrados nas Tabelas 4.10 e 4.11, respectivamente. Para as pseudo-medidas Crisps adotou-se uma variância igual a 0.01. O baixo valor de variância tenta sensibilizar os estimadores MQP e VAPR aos erros nas pseudo-medidas Crisps.

Tabela 4.10: Resultado do cálculo do vetor de estado.

Barra	Fluxo de Potência		Estimador MQP		Estimador VAPR	
	V (p.u.)	TETA (Graus)	V (p.u.)	TETA (Graus)	V (p.u.)	TETA (Graus)
1	1.06	0	1.0545	0	1.0595	0
2	1.045	-4.957	1.0401	-5.0545	1.0464	-5.0576
3	1.01	-12.633	1.0061	-12.8866	1.0131	-12.8229
4	1.026	-10.366	1.0224	-10.5427	1.0296	-10.5249
5	1.033	-8.947	1.0286	-9.1537	1.0359	-9.1515
6	1.07	-14.879	1.0655	-14.9451	1.0722	-14.7966
7	1.045	-13.45	1.0405	-13.6778	1.0473	-13.3974
8	1.09	-13.45	1.0872	-13.6778	1.0922	-13.3974
9	1.028	-15.07	1.0232	-15.3260	1.0302	-15.0483
10	1.028	-15.318	1.0229	-15.5646	1.0301	-15.2732
11	1.045	-15.213	1.0402	-15.3747	1.0474	-15.1509
12	1.053	-15.72	1.0484	-15.7421	1.0561	-15.5160
13	1.046	-15.738	1.0423	-15.6585	1.0508	-15.4415
14	1.017	-16.394	1.0132	-16.5219	1.0207	-16.2464

Tabela 4.11: Erros de estimação.

Erros	Estimador MQP	Estimador VAPR
EMQ <sub>V</sub>	3.4867e-005	7.8118e-006
EMQ <sub>Θ</sub>	0.0308	0.0202
EMQ <sub>P</sub>	2.4244e-004	4.2568e-004
EMQ <sub>Q</sub>	4.7353e-005	2.2070e-004
EMQ <sub>Pf</sub>	7.8898e-005	1.6518e-004
EMQ <sub>Qf</sub>	7.4390e-005	2.3186e-005
Max(EA <sub>V</sub> )	0.0055	0.0048
Max(EA <sub>Θ</sub> )	0.2560	0.2165
Max(EA <sub>Pi</sub> )	4.5886e-004	5.7739e-004
Max(EA <sub>Qi</sub> )	2.0101e-004	5.5771e-004
Max(EA <sub>P<sub>fe</sub></sub> )	2.0245e-004	3.2909e-004
Max(EA <sub>Q<sub>fe</sub></sub> )	2.0114e-004	1.3945e-004

O valor convergido para a função objetivo,  $J(x)$ , em todos os estimadores de estado, considerando restrições Fuzzy, foi igual a 1, indicando que todas as restrições foram atendidas satisfatoriamente. Para o estimador MQP, o valor da função objetivo convergida foi 1219.241, enquanto para o estimador de estado VAPR foi 0.35928.

O resíduo de estimação, a cada iteração do processo de convergência, para todos os estimadores de estado avaliados, é mostrado na Tabela 4.12. Direção de convergência semelhante é verificada em todos os estimadores de estado, com critério de convergência atendido em quatro iterações. Na Tabela 4.13 é mostrado o número de iterações necessárias à convergência do último problema programação linear ou não linear, executado pelos estimadores de estado, considerando restrições Fuzzy. Verifica-se um maior número de iterações para convergência dos problemas de programação no estimador de estado PQF. Isto pode se justificar pela condição inicial, considerada para o problema de programação não linear, estar distante do ponto de convergência.

Tabela 4.12: Convergência dos estimadores de estado.

Iterações para Convergência	PLFS	PLFNS	PQF	MQP	VAPR
1	0.3044	0.3062	0.3067	0.3101	0.3084
2	0.0251	0.0259	0.0304	0.0302	0.0254
3	0.0004	0.00058	0.00066	0.0005	0.0003
4	1.720e-6	1.00e-7	6.92e-6	5.83e-6	1.19e-7

Tabela 4.13: Convergência do último problema de programação dos estimadores Fuzzy.

Convergência do Último Problema de Programação para os Estimadores de Estado Fuzzy	N° de Iterações até a Convergência		
	PLFS	PLFNS	PQF
1	11	14	21
2	9	12	14
3	9	11	12
4	9	11	12

O resultado da aplicação da ferramenta de pós-processamento ao estimador de estado MQP é mostrado na Tabela 4.14. Das sete pseudo-medidas Crisps consideradas, quatro foram identificadas como portadoras de erros grosseiros ( $P_{13}$ ,  $Q_{13}$ ,  $P_{9-10}$ ,  $P_{9-14}$ ). Isto somente foi possível, pois adotou-se uma baixa variância para as mesmas. Na Tabela 4.15, é apresentado o valor dos erros médio quadrático e absoluto para as variáveis de estado ângulo e magnitude das tensões, após a execução da ferramenta de pós-processamento do estimador de estado MQP.

Tabela 4.14: Resultado do pós-processamento para o estimador de estado MQP.

Pós - Processamentos	Medida Identificada	Valor da Função Objetivo	Limite da Função Objetivo	Maior Resíduo Normalizado
1	$P_{13}$	1219.2408	55.7585	206.6223
2	$P_{9-10}$	275.845	52.1923	107.3423
3	$Q_{13}$	141.4761	50.9985	65.9635
4	$P_{9-14}$	81.3995	49.8018	39.4234
5	$P_{1-2}$	45.2897	48.6024	24.4830

Tabela 4.15: Erros de estimação para o estimador de estado MQP.

Erros	Estimador MQP (Sem Pós-Processamento)	Estimador MQP (Com Pós-Processamento)
EMQ <sub>v</sub>	3.4867e-005	1.9225e-005
EMQ <sub>o</sub>	0.0308	8.7169e-004
Max(EA <sub>v</sub> )	0.0055	0.0035
Max(EA <sub>o</sub> )	0.0604	0.0495

#### 4.3.1.3. Representação de Pseudo-medidas Fuzzy Críticas

Para o plano de medição do sistema IEEE14 barras, mostrado na Figura 4.2, a remoção dos pontos de medição de injeção de potência ativa e reativa nas barras 10 e 11 ( $P_{10}, Q_{10}, P_{11}, Q_{11}$ ), devido a um defeito técnico qualquer, cria uma ilha de não observabilidade para estas barras, impossibilitando a estimação de todo o estado do sistema teste. Sendo assim, os pontos de medição nas barras 10 e 11 representam pares de medidas críticas, conforme abordado em (LONDON Jr., 2001). Caso seja impossível restaurar os pontos de medição nas barras 10 e 11, a alternativa para restauração da observabilidade total do sistema, em questão, é a inclusão de pseudo-medidas ao plano de medição. A inclusão de um par de pseudo-medidas Fuzzy críticas de injeção de potência ativa e reativa nas barras 10 e 11, como mostrado na Figura 4.3, torna o sistema novamente observável. As funções de pertinência para as pseudo-medidas Fuzzy críticas são construídas conforme descrito no item 4.1.2. Ao valor central da função de pertinência das pseudo-medidas Fuzzy críticas serão adicionados erros grosseiros entre  $\pm 10\sigma$  e  $\pm 40\sigma$  em relação ao valor do fluxo de potência, ou valor considerado para o par de medidas anteriormente existente nas barras 10 e 11, uma vez que parte-se do princípio do desconhecimento da condição carregamento nas barras 10 e 11.

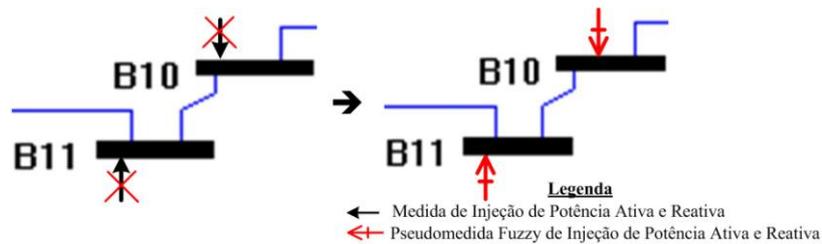


Figura 4.3: Representação de um par de Pseudo-medidas Fuzzy críticas de injeção de potência nas barras 10 e 11 do sistema IEEE14 barras.

O processo de composição das medidas e pseudo-medidas Crisps seguem os princípios descritos nos itens (4.1.1) e (4.1.3), respectivamente. Os pares de pseudo-medidas Fuzzy são representados no sistema IEEE 14 barras da Figura 4.2: pseudo-medidas Fuzzy de injeção de potência ativa e reativa na barra 10, pseudo-medidas Fuzzy de injeção de potência ativa e reativa na barra 11. A redundância do sistema de medidas em conjunto com as pseudo-medidas Fuzzy permanece a mesma da situação descrita com a presença de medições apenas, igual a 1.741.

A Tabela 4.16 mostra o valor central, com a inclusão de um erro grosseiro aleatório entre  $\pm 10\sigma$  e  $\pm 40\sigma$ , e o valor correspondente para os pontos de pertinência unitária e pertinência zero da função de pertinência das pseudo-medidas Fuzzy consideradas, sendo estes pontos definidos na Figura 4.1. Também é mostrado o valor do fluxo de potência. A construção das funções de pertinência das quatro pseudo-medidas Fuzzy segue os lemas enunciados no item (4.2.1).

Tabela 4.16: Valores dos vértices das funções de pertinência das pseudo-medidas Fuzzy.

Pseudo-medida Fuzzy	Valor Central com Erro (p.u.)	$A_0$ (p.u.)	$B_0$ (p.u.)	$B_1$ (p.u.)	$A_1$ (p.u.)	Valor do Fluxo de Potência (p.u.)
$P_{10}$	0.0789	0.0671	0.0710	0.0868	0.0907	0.0900
$Q_{10}$	0.0384	0.0326	0.0346	0.0422	0.0442	0.0580
$P_{11}$	0.0235	0.0200	0.0211	0.0259	0.0270	0.0350
$Q_{11}$	0.0201	0.0171	0.0181	0.0221	0.0231	0.0180

O resultado do cálculo do vetor de estado, aplicando os estimadores de estado PLFS, PLFNS e PQF, assim como o resultado obtido pela aplicação do fluxo de potência é mostrado na Tabela 4.17. Na Tabela 4.18, é mostrado o resultado do cálculo do vetor de estado para os estimadores MQP e VAPR. A condição inicial, para o problema de programação não linear do estimador de estado PQF, foi valor nulo para os ângulos das tensões, unitário para as magnitudes das tensões, e unitário para a variável lambda,  $\lambda$ . Para as pseudo-medidas Crisps avaliadas nos estimadores de estado MQP e VAPR, adotou-se uma variância igual a 10, caracterizando a imprecisão existente na definição destas.

Tabela 4.17: Resultado do cálculo do vetor de estado.

Barra	Fluxo de Potência		Estimador PLFS		Estimador PLFNS		Estimador PQF	
	V (p.u.)	TETA (Graus)	V (p.u.)	TETA (Graus)	V (p.u.)	TETA (Graus)	V (p.u.)	TETA (Graus)
1	1.06	0	1.0591	0	1.0591	0	1.0591	0
2	1.045	-4.957	1.0462	-4.9785	1.0462	-4.9785	1.0443	-4.9676
3	1.01	-12.633	1.0119	-12.8241	1.0119	-12.8241	1.0100	-12.8723
4	1.026	-10.366	1.0295	-10.3195	1.0295	-10.3195	1.0240	-10.5321
5	1.033	-8.947	1.0362	-8.8787	1.0362	-8.8787	1.0306	-9.0719
6	1.07	-14.879	1.0735	-14.8837	1.0735	-14.8837	1.0681	-15.1390
7	1.045	-13.45	1.0484	-13.2997	1.0484	-13.2997	1.0420	-13.6295
8	1.09	-13.45	1.0927	-13.2997	1.0927	-13.2997	1.0872	-13.6295
9	1.028	-15.07	1.0317	-14.8922	1.0317	-14.8922	1.0249	-15.2658
10	1.028	-15.318	1.0320	-15.1942	1.0321	-15.1867	1.0254	-15.5356
11	1.045	-15.213	1.0486	-15.1586	1.0488	-15.1516	1.0425	-15.4621
12	1.053	-15.72	1.0563	-15.7280	1.0563	-15.7280	1.0508	-15.9916
13	1.046	-15.738	1.0494	-15.7449	1.0494	-15.7449	1.0439	-16.0083
14	1.017	-16.394	1.0210	-16.2774	1.0210	-16.2774	1.0148	-16.6180

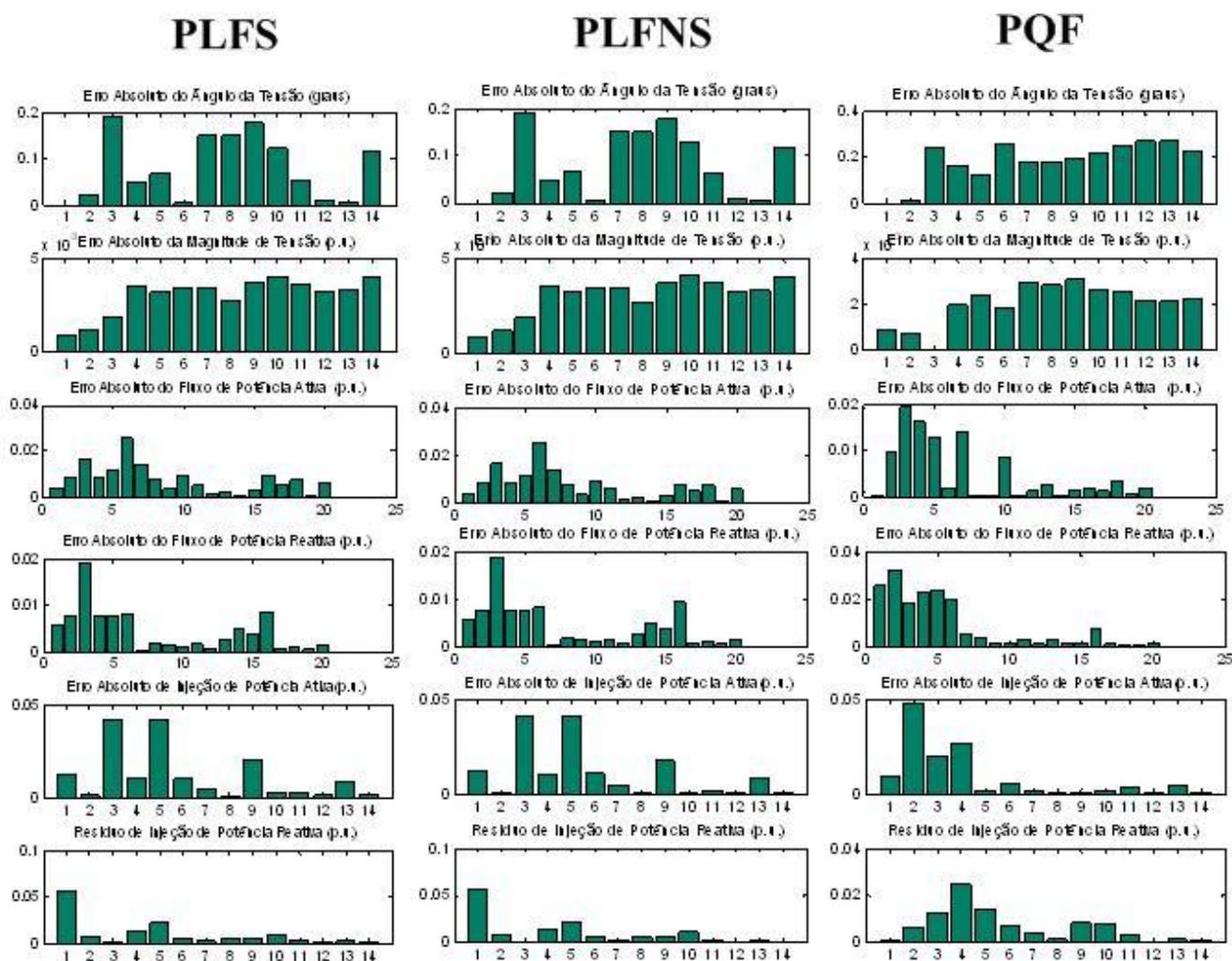
Tabela 4.18: Resultado do cálculo do vetor de estado.

Barra	Fluxo de Potência		Estimador MQP		Estimador VAPR	
	V (p.u.)	TETA (Graus)	V (p.u.)	TETA (Graus)	V (p.u.)	TETA (Graus)
1	1.06	0	1.0545	0	1.0594	0
2	1.045	-4.957	1.0401	-5.0247	1.0458	-5.0323
3	1.01	-12.633	1.0063	-12.8331	1.0124	-12.7772
4	1.026	-10.366	1.0223	-10.5362	1.0283	-10.5182
5	1.033	-8.947	1.0289	-9.0608	1.0348	-9.0877
6	1.07	-14.879	1.0666	-15.0444	1.0719	-14.9981
7	1.045	-13.45	1.0405	-13.6117	1.0470	-13.5933
8	1.09	-13.45	1.0865	-13.6117	1.0916	-13.5933
9	1.028	-15.07	1.0233	-15.2413	1.0302	-15.2379
10	1.028	-15.318	1.0250	-15.4692	1.0317	-15.4585
11	1.045	-15.213	1.0422	-15.3711	1.0484	-15.3283
12	1.053	-15.72	1.0497	-15.8831	1.0546	-15.8393
13	1.046	-15.738	1.0430	-15.9059	1.0476	-15.8425
14	1.017	-16.394	1.0131	-16.5875	1.0195	-16.5656

Na Tabela 4.19, é mostrado o valor do erro médio quadrático (*EMQ*) para as grandezas de interesse, enquanto na Figura 4.4, é apresentado o valor dos erros absolutos. Os resultados mostram que a representação de pseudo-medidas Fuzzy críticas é uma boa alternativa para a solução do problema de observabilidade, possibilitando a representação de imprecisões em uma grandeza que por natureza deve ser precisa. Pode-se observar que a adição de erro grosseiro ao valor cental, caracterizando a imprecisão na modelagem da pseudo-medida Fuzzy crítica, não interfere no resultado da estimação de estado. A representação de pseudo-medidas Crisps críticas exige uma elevada variância associada às mesmas para uma estimação de estado confiável. Os erros médios quadráticos e os erros absolutos foram muito próximos em todos os estimadores de estado avaliados; contudo os maiores erros foram verificados no estimador MQP, mesmo considerando uma elevada variância para as pseudo-medidas Crisps.

Tabela 4.19: Erros médio quadráticos de estimação.

Erros	Estimador PLFS	Estimador PLFNS	Estimador PQF	Estimador MQP	Estimador VAPR
EMQ <sub>V</sub>	1.0028e-005	1.0196e-005	4.8325e-006	3.5529e-005	4.8341e-006
EMQ <sub>θ</sub>	0.0109	0.0111	0.0412	0.0240	0.0172
EMQ <sub>P</sub>	2.1495e-004	2.1169e-004	1.8165e-004	6.9118e-005	6.2585e-005
EMQ <sub>Q</sub>	1.9513e-004	1.9632e-004	6.0926e-005	6.8834e-004	1.7956e-004
EMQ <sub>Pf</sub>	8.9251e-005	3.8068e-005	5.9511e-005	2.6991e-005	4.8163e-005
EMQ <sub>Qf</sub>	3.7567e-005	3.8445e-005	1.8140e-004	8.2703e-005	3.1740e-005



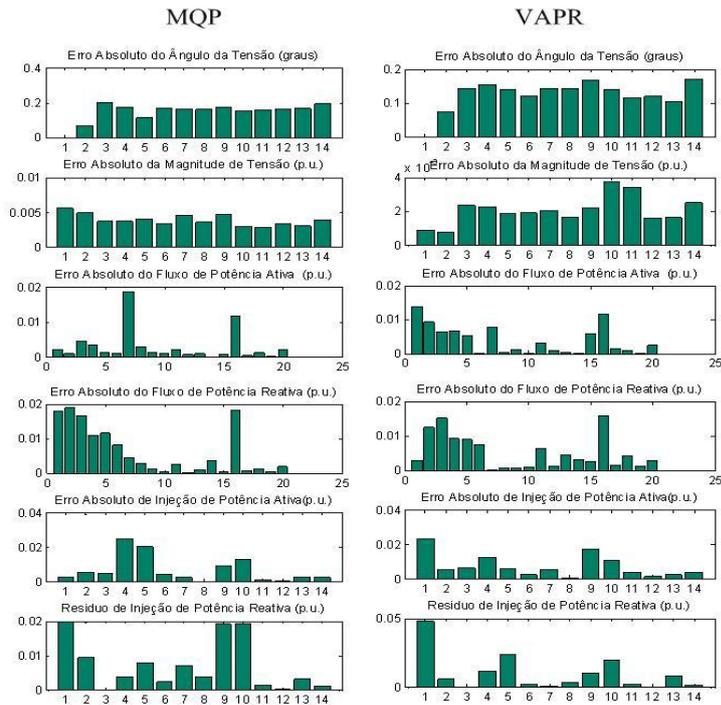


Figura 4.4: Erros absolutos de estimação.

Os estimadores de estado MQP e VAPR e o último problema de programação dos estimadores, considerando restrições Fuzzy, convergiram em 4 iterações. O valor final da função objetivo em todos os estimadores de estado, considerando restrições Fuzzy, foi igual a 1, indicando que todas as restrições foram atendidas satisfatoriamente. Para o estimador MQP o valor da função objetivo convergida foi 789.227, enquanto para o estimador de estado VAPR foi 0.1372.

#### 4.3.2. Avaliação dos Estimadores de Estado com Presença de Erros Grosseiros em Dados de Medição

O objetivo deste conjunto de testes é verificar a robustez dos estimadores considerando restrições Fuzzy à presença de erros grosseiros em dados de medição. Para tanto será considerado o plano de medição da Figura 4.2 com a inserção de um conjunto de pseudo-medidas Fuzzy redundantes, como mostrado na Figura 4.5. Os pares de pseudo-medidas Fuzzy serão representados: pseudo-medidas Fuzzy de injeção de potência ativa e

reativa nas barras 4, 5 e 6 ( $P_4, Q_4, P_5, Q_5, P_6, Q_6$ ); pseudo-medidas Fuzzy de fluxo de potência ativa e reativa entre as barras 6 – 12 e 10 – 11 ( $P_{6-12}, Q_{6-12}, P_{10-11}, Q_{10-11}$ ). A redundância do sistema de medidas em conjunto com as pseudo-medidas Fuzzy inclusas é igual a 2.11.

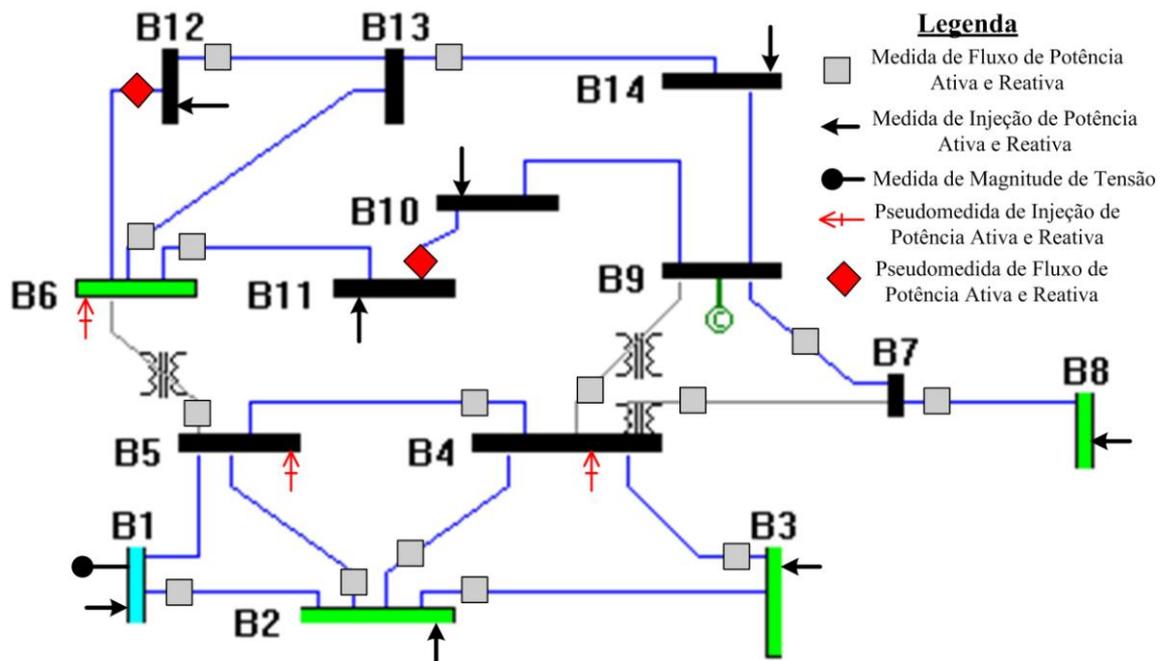


Figura 4.5: Plano de medição e pseudo-medidas Fuzzy para o sistema IEEE 14 barras.

O processo de composição das medidas, sem presença de erros grosseiros e pseudo-medidas Crisps, segue os itens (4.1.1) e (4.1.3), respectivamente. Para a composição das pseudo-medidas Fuzzy, são seguidas as definições do item (4.1.2), e o lema abaixo.

“Para funções de pertinência trapezoidais, variações de 15% do valor central são consideradas com pertinência unitária, enquanto que o decréscimo de pertinência ocorre para variações iguais a 25% do valor central.”

A Tabela 4.20 mostra o valor central com a inclusão de um erro grosseiro aleatório entre  $\pm 10\sigma$  e  $\pm 40\sigma$ , e o valor correspondente para os pontos de pertinência unitária e zero da função de pertinência das pseudo-medidas Fuzzy consideradas, sendo estes pontos definidos na Figura 4.1. Nesta tabela também é mostrado o valor do fluxo de potência.

Tabela 4.20: Valores dos vértices das funções de pertinência das pseudo-medidas Fuzzy.

<b>Pseudo-medidas Fuzzy</b>	<b>Valor Central com Erro (p.u.)</b>	<b>A<sub>0</sub> (p.u.)</b>	<b>B<sub>0</sub> (p.u.)</b>	<b>B<sub>1</sub> (p.u.)</b>	<b>A<sub>1</sub> (p.u.)</b>	<b>Valor do Fluxo de Potência (p.u.)</b>
<b>P<sub>4</sub></b>	0.3871	0.2903	0.3484	0.4452	0.4839	0.4780
<b>Q<sub>4</sub></b>	0.0290	0.0218	0.0247	0.0334	0.0363	0.0390
<b>P<sub>5</sub></b>	0.0623	0.0467	0.0530	0.0716	0.0779	0.0760
<b>Q<sub>5</sub></b>	0.0105	0.0079	0.0089	0.0121	0.0131	0.0160
<b>P<sub>6</sub></b>	0.0887	0.0665	0.0754	0.1020	0.1109	0.1120
<b>Q<sub>6</sub></b>	0.4956	0.3717	0.4213	0.5699	0.6195	0.4162
<b>P<sub>10-11</sub></b>	0.0489	0.0367	0.0416	0.0562	0.0611	0.0423
<b>Q<sub>10-11</sub></b>	0.0646	0.0485	0.0549	0.0743	0.0808	0.0750
<b>P<sub>6-12</sub></b>	0.1066	0.0799	0.0906	0.1226	0.1333	0.0804
<b>Q<sub>6-12</sub></b>	0.0257	0.0193	0.0218	0.0296	0.0321	0.0329

Os seguintes tipos de erros em medidas são averiguados pelos estimadores de estado: erros grosseiros não conformativos e não interativos, erros grosseiros conformativos e não interativos e erros grosseiros devido a falhas no sistema de aquisição de dados. Erros grosseiros, do tipo interativos e conformativos, não foram averiguados; em função de grande parte dos estimadores de estado falharem no tratamento deste tipo de erro. Uma explicação deste fenômeno, e um exemplo ilustrativo, é encontrado em (PEREIRA, 2008).

A deterioração da medida, pelo erro grosseiro, é realizada adicionando-se um erro compreendido entre  $\pm 10\sigma$  e  $\pm 40\sigma$  ao valor da medida determinado, como o descrito no item (4.1.1). É importante ressaltar que às medidas portadoras de erros grosseiros também serão adicionados ruídos aleatórios, como definido em (4.1.1), com desvio padrão máximo igual a  $\pm 3\sigma$ . A cada tipo de erro averiguado, diferentes medidas serão escolhidas para serem as portadoras de erro grosseiro. As medidas escolhidas, como portadoras de erros grosseiros, e o valor das mesmas, serão descritos com a apresentação dos resultados.

Na Tabela 4.21, é mostrado o resultado do cálculo do vetor de estado, para o sistema da Figura 4.5, aplicando os estimadores de estado PLFS, PLFNS e PQF, para a situação sem a adição de erros grosseiros nas medidas. Ao valor das medidas é adicionado apenas

um ruído aleatório de  $\pm 3\sigma$ . A condição inicial, para o problema de programação não linear do estimador de estado PQF, foi valor nulo para os ângulos das tensões, unitário para as magnitudes das tensões, e unitário para a variável lambda,  $\lambda$ .

Tabela 4.21: Resultado do cálculo do vetor de estado.

Barra	Fluxo de Potência		Estimador PLFS		Estimador PLFNS		Estimador PQF	
	V (p.u.)	TETA (Graus)	V (p.u.)	TETA (Graus)	V (p.u.)	TETA (Graus)	V (p.u.)	TETA (Graus)
1	1.06	0	1.0587	0	1.0585	0	1.0606	0
2	1.045	-4.957	1.0439	-4.9978	1.0448	-4.9174	1.0467	-4.9194
3	1.01	-12.633	1.0104	-12.6734	1.0111	-12.5249	1.0131	-12.5279
4	1.026	-10.366	1.0257	-10.3283	1.0257	-10.2951	1.0281	-10.3033
5	1.033	-8.947	1.0320	-8.8798	1.0322	-8.8659	1.0341	-8.8737
6	1.07	-14.879	1.0654	-14.7750	1.0654	-14.6655	1.0647	-14.7089
7	1.045	-13.45	1.0453	-13.1937	1.0447	-13.6383	1.0446	-13.4694
8	1.09	-13.45	1.0903	-13.1937	1.0904	-13.6383	1.0898	-13.4694
9	1.028	-15.07	1.0279	-14.8892	1.0274	-15.1895	1.0268	-15.0455
10	1.028	-15.318	1.0279	-15.1650	1.0275	-15.3969	1.0266	-15.2991
11	1.045	-15.213	1.0455	-15.0900	1.0454	-15.2126	1.0449	-15.1904
12	1.053	-15.72	1.0514	-15.5939	1.0505	-15.4716	1.0491	-15.5563
13	1.046	-15.738	1.0497	-15.6138	1.0485	-15.7741	1.0452	-15.7573
14	1.017	-16.394	1.0191	-16.2870	1.0181	-16.5034	1.0162	-16.4120

O valor do erro médio quadrático (*EMQ*) para as grandezas de interesse é mostrado na Tabela 4.22, enquanto na Figura 4.6, é apresentado o valor dos erros absolutos. Os erros médios quadráticos e os erros absolutos foram muito próximos em todos os estimadores de estado avaliados. O último problema de programação dos três estimadores de estado, considerando restrições Fuzzy, convergiu em quatro iterações, com valor da função objetivo convergida igual a 1, indicando que todas as restrições foram atendidas.

Tabela 4.22: Erros médio quadráticos de estimação.

Erros	Estimador PLFS	Estimador PLFNS	Estimador PQF
EMQ <sub>V</sub>	3.3906e-006	2.8946e-006	4.7543e-006
EMQ <sub>e</sub>	0.0190	0.0169	0.0057
EMQ <sub>P</sub>	1.4820e-004	1.6174e-004	5.6547e-005
EMQ <sub>Q</sub>	0.0014	1.2080e-4	7.7364e-004
EMQ <sub>Pf</sub>	5.9033e-005	8.8829e-005	2.7370e-005
EMQ <sub>Qf</sub>	4.6113e-004	3.7965e-004	2.8202e-004

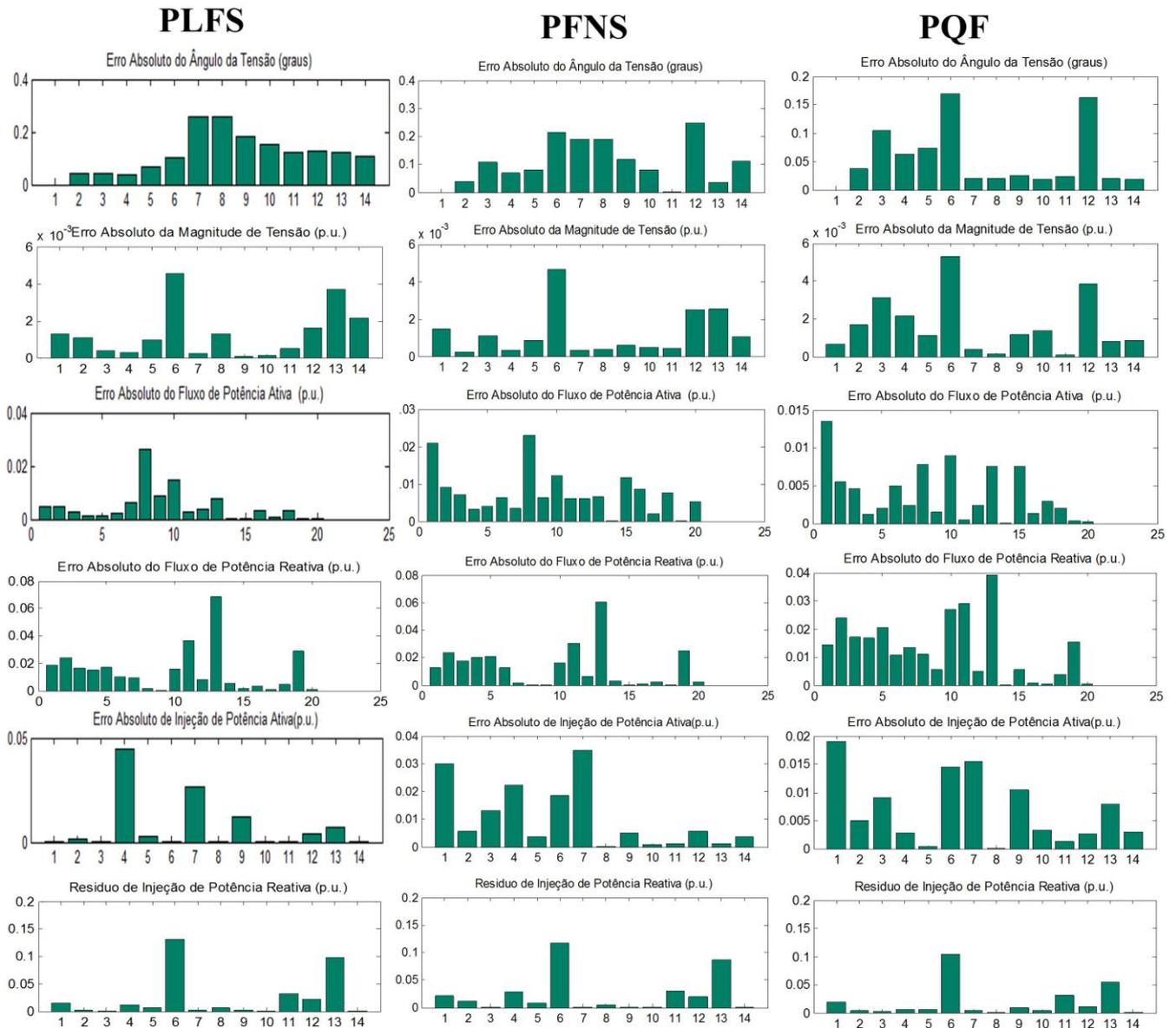


Figura 4.6: Erros absolutos de estimação.

#### 4.3.2.1. Erros Grosseiros Não Interativos e Não Conformativos

O conjunto de medidas selecionadas como portadoras de erros grosseiros caracteriza-se por não se relacionar mutuamente, de forma que os erros adicionados às mesmas não apresentam interatividade e conformatividade. Na Tabela 4.23, é mostrado o valor da medida com presença de um erro grosseiro máximo de  $\pm 40\sigma$ . Nela também é mostrado o valor considerado para o problema de fluxo de potência.

Tabela 4.23: Medidas com erros grosseiros não conformativos e não interativos.

Medida	Valor com Erro Grosseiro (p.u.)	Valor para o Fluxo de Potência (p.u.)
<b>P<sub>2</sub></b>	0.2504	0.1830
<b>Q<sub>2</sub></b>	0.2666	0.29695
<b>Q<sub>8</sub></b>	0.3837	0.2796
<b>P<sub>4-5</sub></b>	-0.8451	-0,6097
<b>Q<sub>4-5</sub></b>	0.0579	0,0425

O resultado do cálculo do vetor de estado, aplicando os estimadores de estado PLFS, PLFNS, PQF e o fluxo de potência, é mostrado na Tabela 4.24. A Tabela 4.25 mostra o resultado do cálculo do vetor de estado para os estimadores MQP e VAPR. A condição inicial, para o problema de programação não linear do estimador de estado PQF, foi valor nulo para os ângulos das tensões, unitário para as magnitudes das tensões, e unitário para a variável lambda,  $\lambda$ . Para as pseudo-medidas Crisps, avaliadas nos estimadores de estado MQP e VAPR, adotou-se uma variância igual a 10, caracterizando a imprecisão existente na definição destas.

Tabela 4.24: Resultado do cálculo do vetor de estado para os estimadores PLFS, PLFNS, PQF, considerando erros grosseiros não interativos e não conformativos.

Barra	Fluxo de Potência		Estimador PLFS		Estimador PLFNS		Estimador PQF	
	V (p.u.)	TETA (Graus)	V (p.u.)	TETA (Graus)	V (p.u.)	TETA (Graus)	V (p.u.)	TETA (Graus)
1	1.06	0	1.0587	0	1.0591	0	1.0625	0
2	1.045	-4.957	1.0448	-4.9744	1.0457	-5.0774	1.0489	-5.0171
3	1.01	-12.633	1.0074	-12.8788	1.0109	-12.8137	1.0127	-12.8182
4	1.026	-10.366	1.0201	-10.6505	1.0253	-10.5774	1.0276	-10.6342
5	1.033	-8.947	1.0266	-9.1300	1.0314	-9.0833	1.0343	-9.1055
6	1.07	-14.879	1.0516	-15.2512	1.0625	-14.9447	1.0660	-14.9776
7	1.045	-13.45	1.0318	-14.1488	1.0450	-14.2118	1.0447	-14.4245
8	1.09	-13.45	1.0929	-14.1489	1.1077	-14.2118	1.1003	-14.4228
9	1.028	-15.07	1.0136	-15.8854	1.0276	-15.8530	1.0265	-15.9726
10	1.028	-15.318	1.0233	-15.6857	1.0280	-16.0406	1.0265	-16.0518
11	1.045	-15.213	1.0261	-15.6200	1.0465	-15.7712	1.0461	-15.7736
12	1.053	-15.72	1.0512	-15.2554	1.0477	-15.7515	1.0504	-15.8229
13	1.046	-15.738	1.0126	-16.3979	1.0418	-15.8734	1.0464	-15.9389
14	1.017	-16.394	0.9939	-17.2175	1.0153	-16.9110	1.0169	-16.9358

Tabela 4.25: Resultado do cálculo do vetor de estado para os estimadores MQP e VAPR, considerando erros grosseiros não interativos e não conformativos.

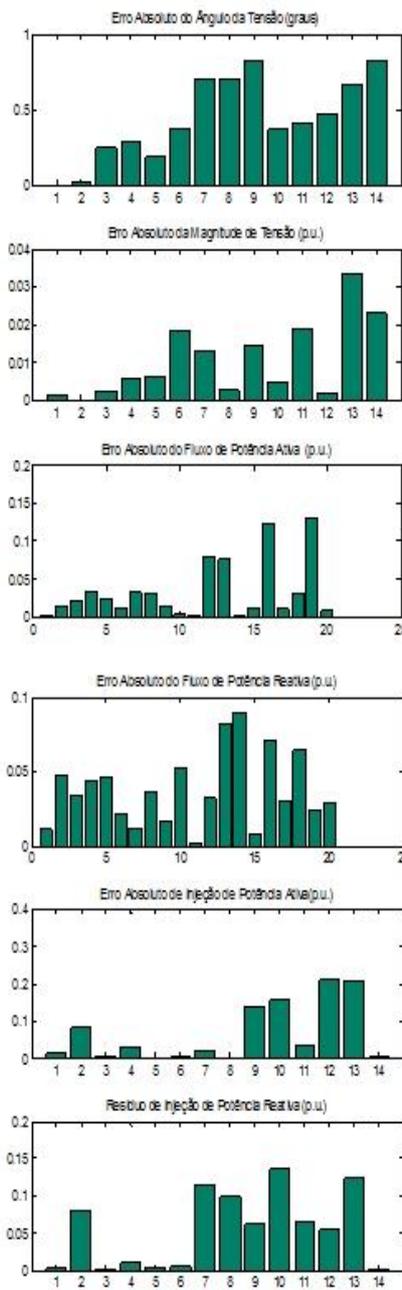
Barra	Fluxo de Potência		Estimador MQP		Estimador VAPR	
	V (p.u.)	TETA (Graus)	V (p.u.)	TETA (Graus)	V (p.u.)	TETA (Graus)
1	1.06	0	1.0430	0	1.0587	0
2	1.045	-4.957	1.0295	-5.1347	1.0456	-4.9499
3	1.01	-12.633	0.9921	-13.3494	1.0118	-12.7750
4	1.026	-10.366	1.0072	-11.0721	1.0288	-10.4000
5	1.033	-8.947	1.0163	-9.0647	1.0349	-8.9416
6	1.07	-14.879	1.0538	-15.2228	1.0720	-14.7494
7	1.045	-13.45	1.0265	-14.2573	1.0474	-13.5597
8	1.09	-13.45	1.0814	-14.2573	1.1084	-13.5597
9	1.028	-15.07	1.0097	-15.9009	1.0309	-15.1661
10	1.028	-15.318	1.0098	-16.0569	1.0306	-15.3837
11	1.045	-15.213	1.0280	-15.7173	1.0474	-15.1840
12	1.053	-15.72	1.0366	-16.0909	1.0558	-15.6152
13	1.046	-15.738	1.0296	-16.1041	1.0496	-15.6717
14	1.017	-16.394	0.9997	-17.0374	1.0207	-16.4463

O valor do erro médio quadrático ( $EMQ$ ) é mostrado na Tabela 4.26, enquanto na Figura 4.7, é apresentado o valor dos erros absolutos, para todos os estimadores de estado avaliados. Os erros médios quadráticos e os erros absolutos foram muito próximos em todos os estimadores de estado avaliados; entretanto a melhor estimação foi verificada para o estimador de estado VAPR. Para os estimadores de estado, considerando restrições Fuzzy, verificou-se um elevado  $EMQ$  para o ângulo da tensão. A aplicação de uma técnica de pós-processamento a estes estimadores poderia ser uma alternativa para redução deste erro.

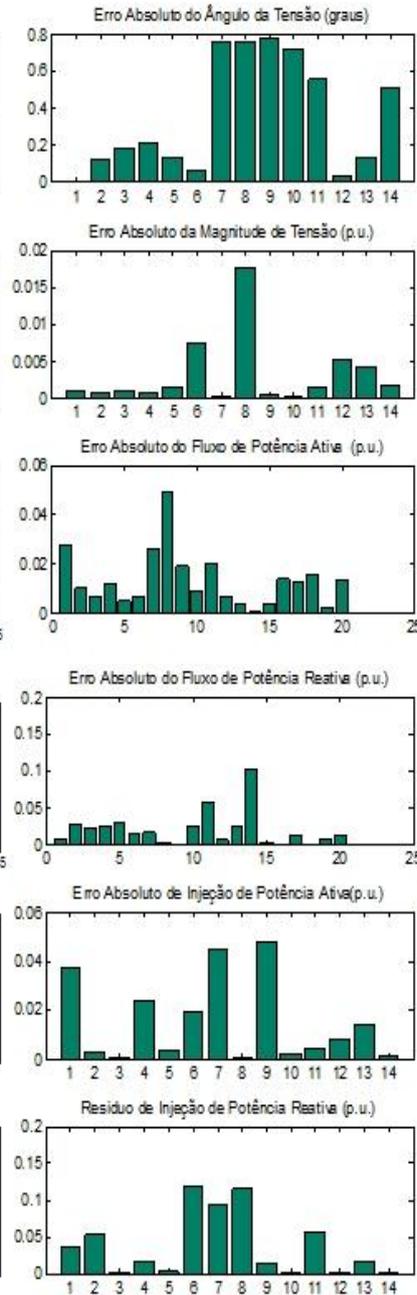
Tabela 4.26: Erros médios quadráticos de estimação, considerando a presença de erros grosseiros não iterativos e não conformativos nas medidas.

Erros	Estimador PLFS	Estimador PLFNS	Estimador PQF	Estimador MQP	Estimador VAPR
$EMQ_V$	2.0301e-004	3.0511e-005	1.1867e-005	2.8229e-004	2.9896e-005
$EMQ_e$	0.2561	0.2149	0.2895	0.3325	0.0068
$EMQ_P$	0.0070	3.5000e-004	7.2048e-004	0.0072	1.2026e-004
$EMQ_Q$	0.0033	0.0022	0.0013	0.0032	5.9179e-004
$EMQ_{Pf}$	0.0025	2.9149e-004	5.8602e-004	0.0027	5.4030e-005
$EMQ_{Qf}$	0.0020	9.6240e-004	5.5231e-004	7.3244e-004	5.0420e-004

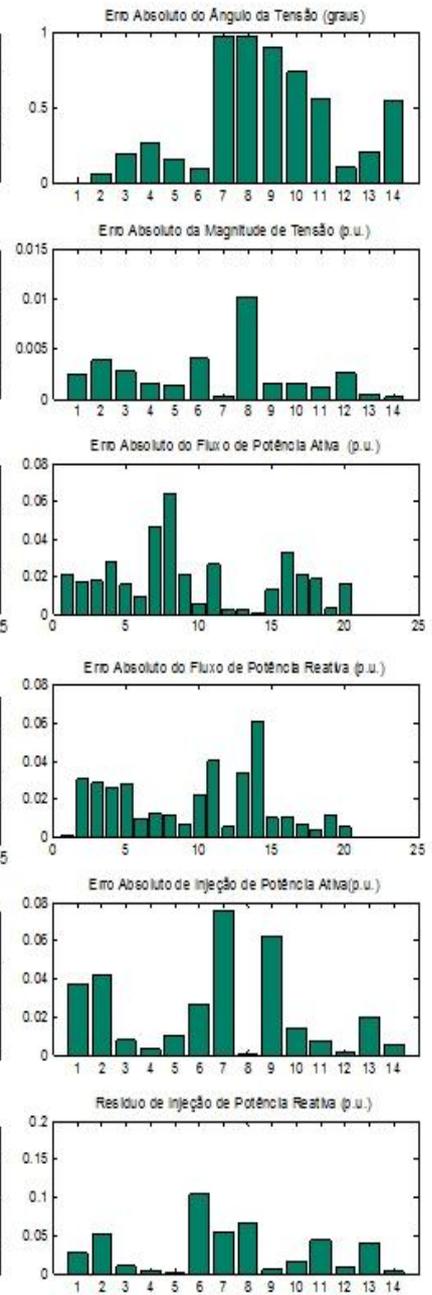
## PLFS



## PLFNS



## PQF



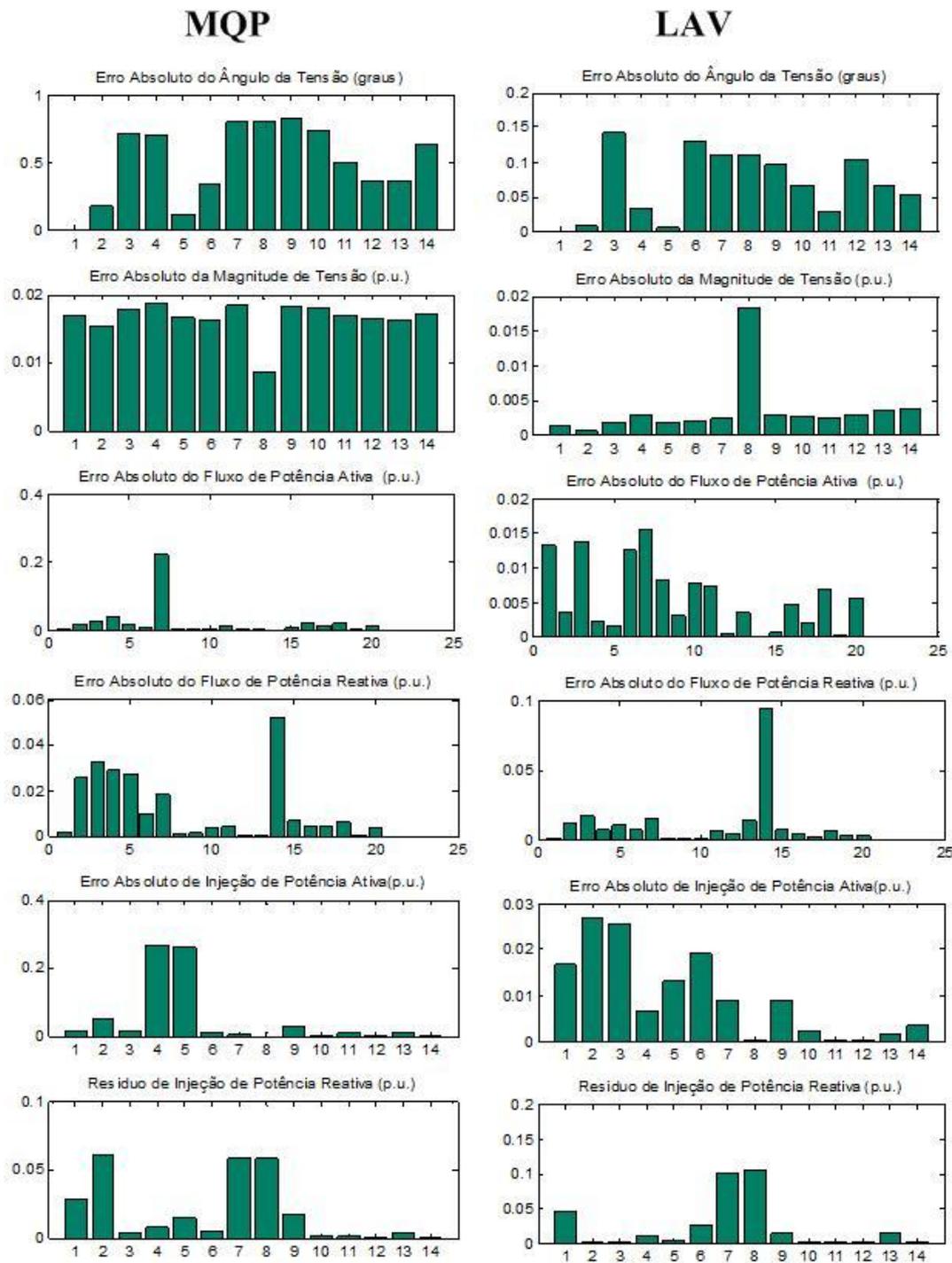


Figura 4.7: Erros absolutos de estimação considerando a presença de erros grosseiros não interativos e não conformativos nas medidas.

O último problema de programação dos três estimadores de estado, considerando restrições Fuzzy, convergiu em quatro iterações, com valor da função objetivo convergida igual a 1, indicando que todas as restrições foram atendidas satisfatoriamente. Os valores

convergidos da função objetivo dos estimadores de estado MQP e VAPR foram, respectivamente, 6733.2685 e 0.83859. Para o estimador de estados MQP, considerou-se a aplicação de uma ferramenta de pós-processamento, com resultado mostrado na Tabela 4.27. Todas as medidas portadoras de erros grosseiros ( $P_{45}$ ,  $Q_{45}$ ,  $P_2$ ,  $Q_2$ ,  $Q_8$ ) foram corretamente identificadas e removidas para o processo de re-estimação de estado. Na Tabela 4.28, tem-se o valor dos erros médio quadrático, após a última execução da ferramenta de pós-processamento do estimador de estados MQP.

Tabela 4.27: Resultado do pós-processamento para o estimador MQP, considerando a presença de erros grosseiros não interativos e não conformativos nas medidas.

Pós - Processamentos	Medida Identificada	Valor da Função Objetivo	Limite da Função Objetivo	Maior Resíduo Normalizado
1	$P_{4-5}$	6733.2685	47.7663	8194.7
2	$Q_2$	5436.8057	46.6916	3034.9
3	$P_2$	4040.2467	45.6160	1560.8
4	$Q_8$	3396.267	44.5395	492.4
5	$Q_{4-5}$	552.1793	43.4619	125.1
6	$P_{1-2}$	499.6473	41.3036	59.47
7	$Q_{2-3}$	62.5275	40.6206	32.81
8	$Q_{1-2}$	29.1478	40.0414	17.12

Tabela 4.28: Erros médio quadrático para o estimador de estado MQP pós-processado.

Erros	Estimador MQP
$EMQ_V$	4.3397e-006
$EMQ_E$	0.0011
$EMQ_P$	8.0967e-005
$EMQ_Q$	2.3114e-004
$EMQ_{Pf}$	3.1074e-005
$EMQ_{Qf}$	1.0792e-004

#### 4.3.2.2. Erros Grosseiros Interativos e Não Conformativos

O conjunto de medidas selecionadas, como portadoras de erros grosseiros, caracteriza-se por se relacionar mutuamente de forma interativa, mas não conformativa; de modo que os erros adicionados às mesmas sejam do tipo interativos e não conformativos. Na Tabela 4.29, é mostrado o valor da medida com presença de um erro grosseiro compreendido entre  $\pm 10\sigma$  e  $\pm 40\sigma$ . Nela também é mostrado o valor considerado para o problema de fluxo de potência.

Tabela 4.29: Medidas com presença de erros grosseiros não conformativos e interativos.

Medida	Valor com Erro Grosseiro (p.u.)	Valor para o Fluxo de Potência (p.u.)
$P_2$	0.2617	0.1830
$Q_2$	0.4187	0.29695
$P_{2-4}$	0.3256	0.56139
$Q_{2-4}$	-0.0876	-0.06350
$P_{2-5}$	0.2408	0.41513
$Q_{2-5}$	-0.0414	-0.06570

O resultado do cálculo do vetor de estado, aplicando os estimadores de estado PLFS, PLFNS e PQF, assim como o resultado obtido pela aplicação do fluxo de potência, é mostrado na Tabela 4.30. Na Tabela 4.31 é mostrado o resultado do cálculo do vetor de estado para os estimadores MQP e VAPR. A condição inicial, para o problema de programação não linear do estimador de estado PQF, foi valor nulo para os ângulos das tensões, unitário para as magnitudes das tensões, e unitário para a variável lambda,  $\lambda$ . Para as pseudo-medidas Crisps, avaliadas nos estimadores de estado MQP e VAPR, adotou-se uma variância igual a 10, caracterizando a imprecisão existente na definição destas.

Tabela 4.30: Resultado do cálculo do vetor de estado para os estimadores PLFS, PLFNS, PQF, considerando erros grosseiros iterativos e não conformativos.

Barra	Fluxo de Potência		Estimador PLFS		Estimador PLFNS		Estimador PQF	
	V (p.u.)	TETA (Graus)	V (p.u.)	TETA (Graus)	V (p.u.)	TETA (Graus)	V (p.u.)	TETA (Graus)
1	1.06	0	1.0606	0	1.0573	0	1.0606	0
2	1.045	-4.957	1.0493	-4.9286	1.0439	-5.0101	1.0498	-4.8814
3	1.01	-12.633	1.0085	-12.5619	1.0094	-12.7138	1.0092	-12.4698
4	1.026	-10.366	1.0256	-9.9022	1.0245	-10.4281	1.0263	-9.8440
5	1.033	-8.947	1.0322	-8.5293	1.0311	-9.0032	1.0330	-8.4934
6	1.07	-14.879	1.0545	-14.1785	1.0685	-14.9411	1.0590	-14.1617
7	1.045	-13.45	1.0345	-13.0275	1.0433	-13.5165	1.0365	-12.8942
8	1.09	-13.45	1.0801	-13.0284	1.0886	-13.5165	1.0833	-12.8290
9	1.028	-15.07	1.0158	-14.6758	1.0260	-15.1400	1.0196	-14.4523
10	1.028	-15.318	1.0153	-14.9067	1.0259	-15.3881	1.0196	-14.6848
11	1.045	-15.213	1.0338	-14.7571	1.0433	-15.2807	1.0380	-14.5747
12	1.053	-15.72	1.0401	-14.9304	1.0525	-15.7137	1.0434	-15.0181
13	1.046	-15.738	1.0345	-15.2067	1.0448	-15.7984	1.0384	-15.1021
14	1.017	-16.394	1.0054	-15.9516	1.0159	-16.4615	1.0101	-15.7712

Tabela 4.31: Resultado do cálculo do vetor de estado para os estimadores MQP e VAPR, considerando erros grosseiros iterativos e não conformativos.

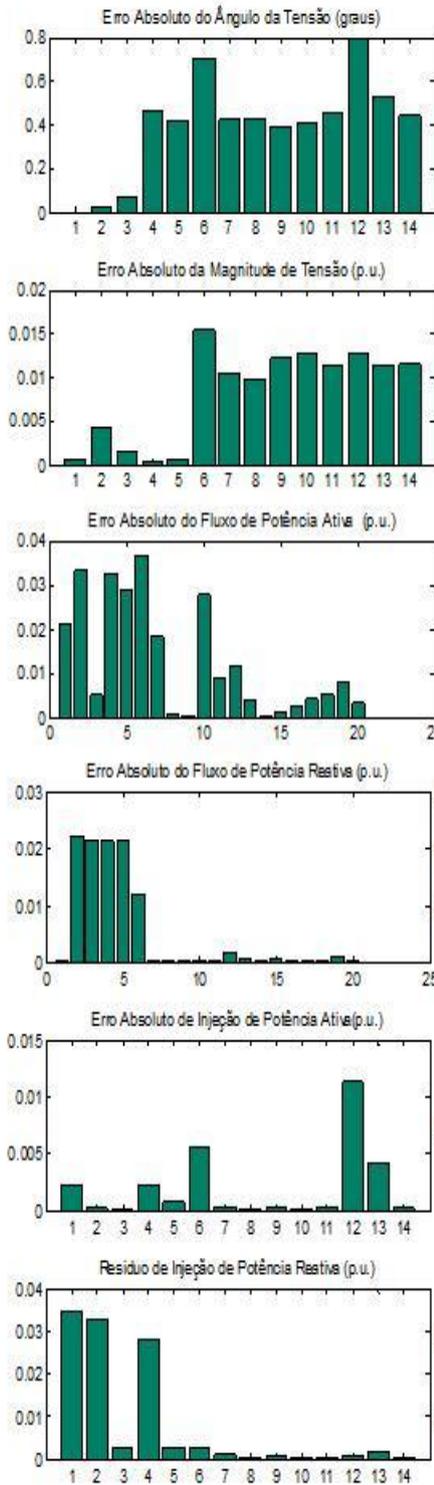
Barra	Fluxo de Potência		Estimador MQP		Estimador VAPV	
	V (p.u.)	TETA (Graus)	V (p.u.)	TETA (Graus)	V (p.u.)	TETA (Graus)
1	1.06	0	1.0160	0	1.0595	0
2	1.045	-4.957	1.0044	-5.3448	1.0468	-4.9208
3	1.01	-12.633	0.9625	-13.6747	1.0080	-12.4739
4	1.026	-10.366	0.9785	-10.7350	1.0190	-10.0157
5	1.033	-8.947	0.9850	-9.1453	1.0257	-8.5498
6	1.07	-14.879	1.0256	-15.6960	1.0641	-14.6105
7	1.045	-13.45	0.9985	-14.1344	1.0385	-13.1638
8	1.09	-13.45	1.0455	-14.1344	1.0839	-13.1638
9	1.028	-15.07	0.9801	-15.9361	1.0207	-14.8301
10	1.028	-15.318	0.9802	-16.1992	1.0207	-15.0739
11	1.045	-15.213	0.9990	-16.0713	1.0386	-14.9576
12	1.053	-15.72	1.0077	-16.6241	1.0469	-15.4703
13	1.046	-15.738	1.0005	-16.6521	1.0399	-15.4974
14	1.017	-16.394	0.9700	-17.3706	1.0108	-16.1570

O valor do erro médio quadrático ( $EMQ$ ), para as grandezas de interesse, é mostrado na Tabela 4.32, enquanto na Figura 4.8, é apresentado o valor dos erros absolutos para todos os estimadores de estado avaliados. Para os estimadores de estado, considerando restrições Fuzzy, os erros médios quadráticos e os erros absolutos foram muito próximos, sendo que o estimador de estado PLFNS apresentou o melhor ajuste a situação. Os estimadores de estado, considerando restrições Fuzzy, trataram os erros grosseiros durante o processo de cálculo do vetor de estado, mostrando-se robustos aos erros grosseiros considerados. O pior resultado da estimação de estado foi verificada no estimador de estado MQP, principalmente, para a variável tensão, mostrando a necessidade da aplicação de uma ferramenta de pós-processamento para obtenção de um resultado satisfatório para a estimação.

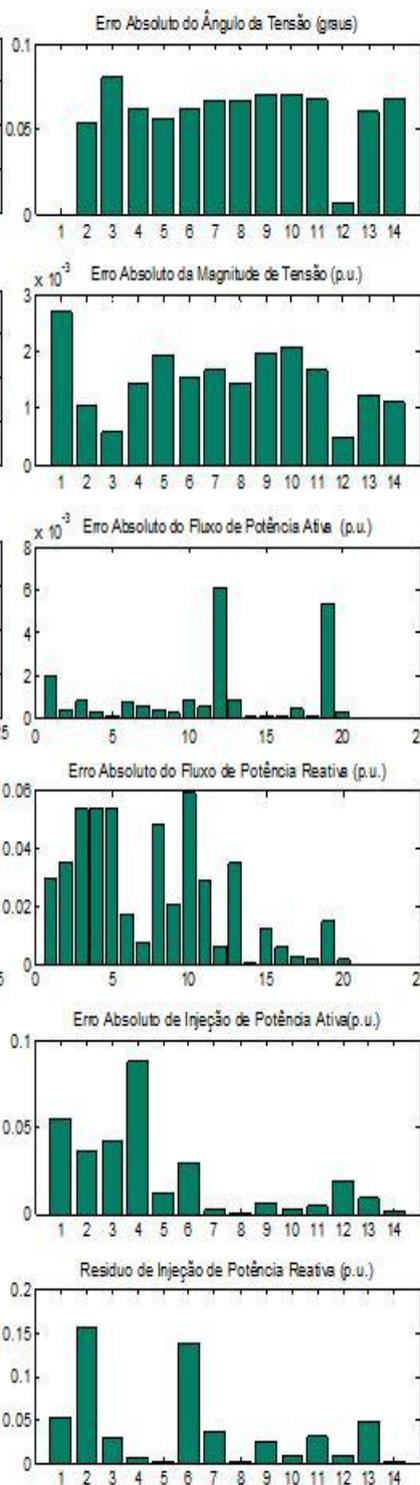
Tabela 4.32: Erros médios quadráticos de estimação considerando a presença de erros grosseiros interativos e não conformativos nas medidas.

<b>Erros</b>	<b>Estimador PLFS</b>	<b>Estimador PLFNS</b>	<b>Estimador PQF</b>	<b>Estimador MQP</b>	<b>Estimador VAPR</b>
EMQ <sub>V</sub>	9.4860e-005	8.4645e-006	4.6386e-005	0.0021	3.4559e-005
EMQ <sub>E</sub>	0.2063	0.1460	0.2996	0.5632	0.0644
EMQ <sub>P</sub>	7.6336e-004	2.7361e-005	7.4733e-004	0.0011	4.0388e-004
EMQ <sub>Q</sub>	0.0026	5.1856e-004	0.0022	0.0065	0.0026
EMQ <sub>Pf</sub>	3.1464e-004	1.2424e-005	3.6848e-004	3.4857e-004	1.2366e-004
EMQ <sub>Qf</sub>	0.0010	2.3288e-004	8.1081e-004	7.6383e-003	9.1909e-004

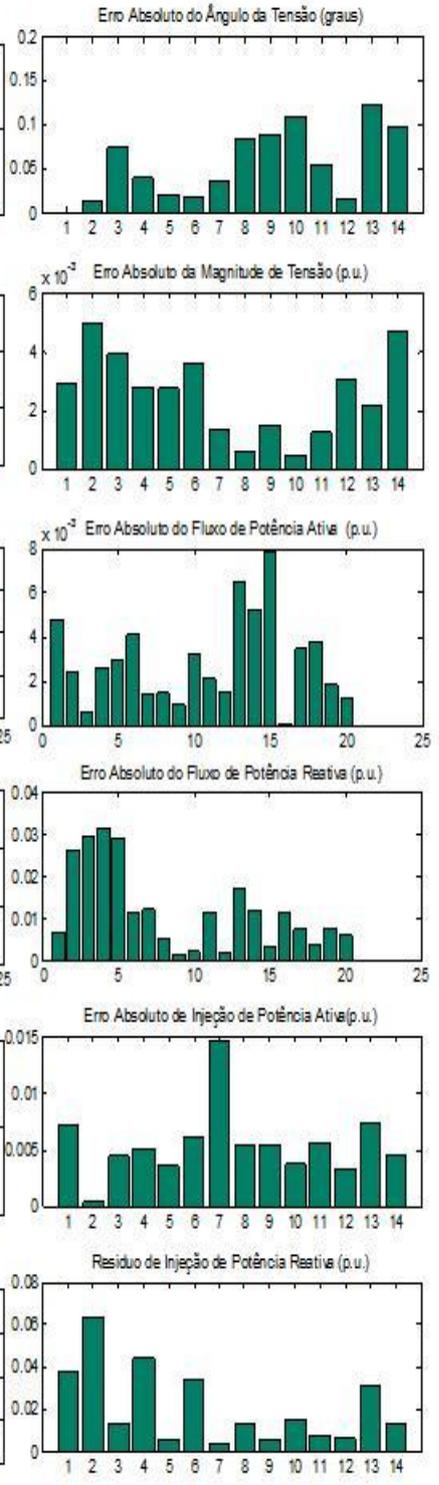
## PLFS



## PLFNS



## PQF



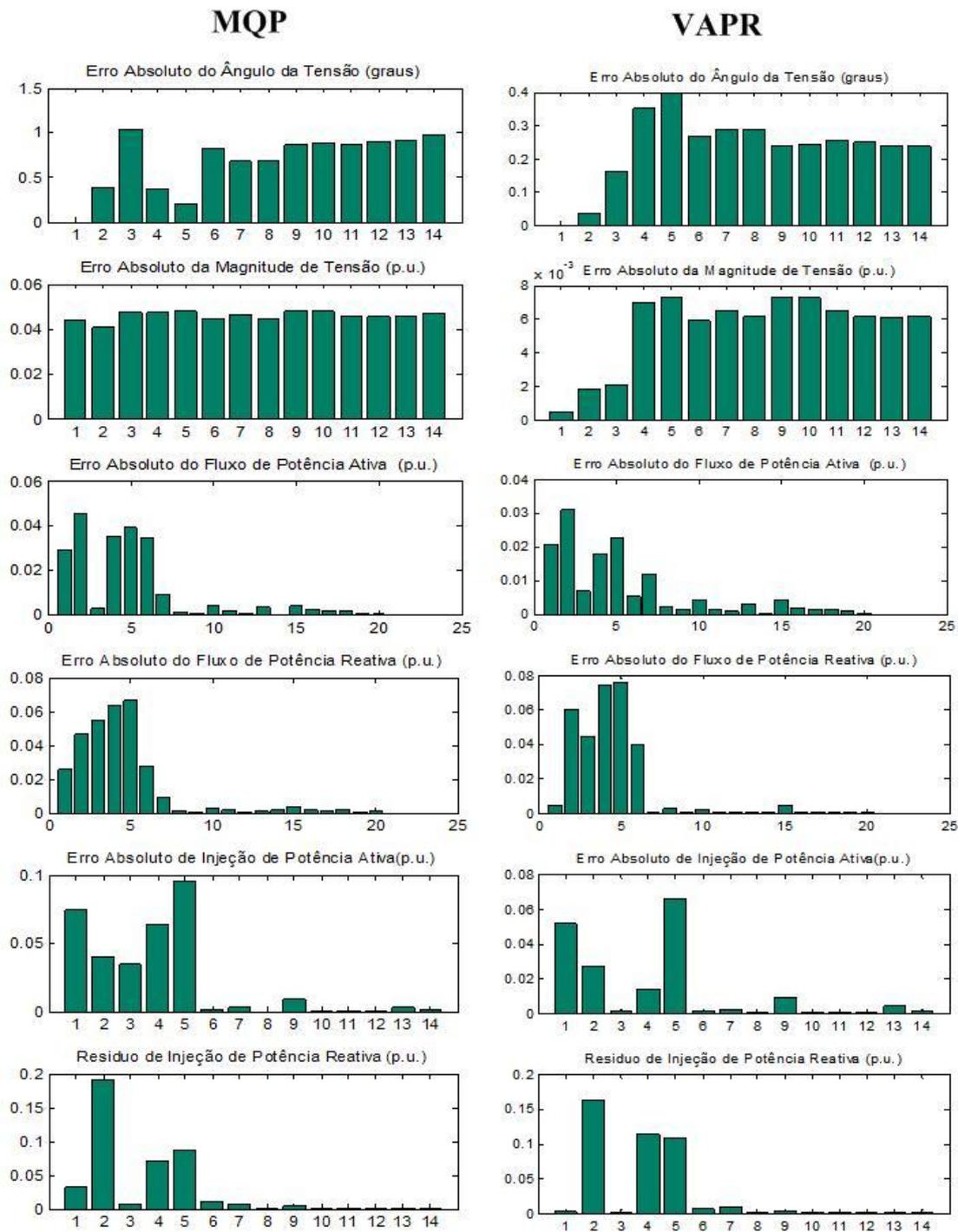


Figura 4.8: Erros absolutos de estimação, considerando a presença de erros grosseiros interativos e não conformativos nas medidas.

O resíduo de estimação, a cada iteração do processo de convergência, para todos os estimadores de estado avaliados, é mostrado na Tabela 4.33. Para os estimadores de estado, considerando restrições Fuzzy, a convergência refere-se ao último problema de

programação resolvido. Direção de convergência semelhante é verificada em todos os estimadores de estado, com critério de convergência atendido em diferentes números de iterações. Os maiores números de iterações nos estimadores de estado PLFS e PQF podem ser justificados pela condição inicial distante do ponto de convergência.

Tabela 4.33: Convergência dos estimadores de estado.

Iteração	PLFS	PLFNS	PQF	MQP	VAPR
1	0.3331	0.3117	0.3163	0.3013	0.3042
2	0.2665	0.0239	0.0525	0.0203	0.0248
3	0.0170	0.0116	0.0054	0.0023	0.0004
4	0.0032	0.0006	0.0020	0.0002	0.0000
5	0.0003	0.0001	0.0002	0.0000	-
6	0.0000	-	0.0000		-

O último problema de programação dos três estimadores de estado, considerando restrições Fuzzy, apresentou valor da função objetivo convergida igual a 1, indicando que todas as restrições foram atendidas satisfatoriamente. Os valores convergidos da função objetivo dos estimadores de estado MQP e VAPR foram, respectivamente, 26136.5185 e 3.473. Para o estimador de estado, MQP, considerou-se a aplicação de uma ferramenta de pós-processamento, com resultado mostrado na Tabela 4.34. Todas as medidas portadoras de erros grosseiros ( $P_{2-4}$ ,  $Q_{2-4}$ ,  $P_{2-5}$ ,  $Q_{2-5}$ ,  $P_2$ ,  $Q_2$ ) foram corretamente identificadas e removidas para o processo de re-estimação de estado. Na Tabela 4.35 é apresentado o valor dos erros médio quadrático, após a última execução da ferramenta de pós-processamento do estimador de estados MQP.

Tabela 4.34: Resultado do pós-processamento para o estimador MQP considerando a presença de erros grosseiros interativos e não conformativos nas medidas.

Pós - Processamentos	Medida Identificada	Valor da Função Objetivo	Limite da Função Objetivo	Maior Resíduo Normalizado
1	$P_{2-4}$	26136.5185	47.7663	3216.76
2	$P_{2-5}$	8764.5071	46.6916	1043.49
3	$Q_{2-4}$	4555.215	45.6160	602.82
4	$Q_{2-3}$	2773.2493	44.5395	210.72
5	$Q_{2-5}$	1123.9449	43.7761	102.58
6	$Q_2$	452.6742	42.3833	77.85
7	$P_{2-3}$	213.368	41.3036	32.67
8	$P_2$	106.1444	40.2228	21.60
9	$Q_{1-2}$	50.6699	39.1408	11.91
10	$P_{3-4}$	13.4406	38.0575	8.37

Tabela 4.35: Erros médio quadrático para o estimador de estado MQP pós-processado.

Erros	Estimador MQP
EMQ <sub>V</sub>	1.0411e-004
EMQ <sub>θ</sub>	0.0263
EMQ <sub>P</sub>	4.4547e-004
EMQ <sub>Q</sub>	0.0043
EMQ <sub>Pf</sub>	1.0703e-004
EMQ <sub>Qf</sub>	0.0015

#### 4.3.2.3. Falha na Aquisição de Dados

O conjunto de medidas selecionadas, como portadoras de erros grosseiros, representam falhas no sistema de aquisição e transmissão de dados. Foram consideradas falhas do tipo perda do sistema de transmissão ou de coleta de dados, caracterizadas por valores nulos nas medidas, e falha no sistema de transmissão de dados, caracterizada por inversão do valor da medida. Na Tabela 4.36, é mostrado o conjunto de medidas com presença de erro grosseiro e o valor do mesmo. Também é mostrado o valor considerado para o problema de fluxo de potência.

Tabela 4.36: Convergência dos estimadores de estado.

Medida	Valor sem Erro Grosseiro (p.u.)	Valor com Erro Grosseiro (p.u.)
$P_{14}$	-0.149	0
$Q_{14}$	-0.050	0
$P_{5-6}$	0.453	-0.453
$Q_{5-6}$	-0.129	0.129
$P_{4-7}$	0.276	0
$Q_{4-7}$	-0.084	0

O resultado do cálculo do vetor de estado, aplicando os estimadores de estado PLFS, PLFNS e PQF, assim como o resultado obtido pela aplicação do fluxo de potência são mostrados na Tabela 4.37. Na Tabela 4.38, é mostrado o resultado do cálculo do vetor de estado para os estimadores MQP e VAPR. A condição inicial, para o problema de programação não linear do estimador de estado PQF, foi valor da magnitude e ângulo da tensão iguais aos resíduos obtidos na convergência do segundo problema de programação quadrática do estimador de estado PQF; enquanto para a variável lambda,  $\lambda$ , foi unitário. Para as pseudo-medidas Crisps, avaliadas nos estimadores de estado MQP e VAPR, adotou-se uma variância igual a 10, caracterizando-se a imprecisão existente na definição destas. Analisando as Tabelas 4.37 e 4.38, observa-se que as piores estimativas foram verificadas nos estimadores de estado com resolução de problemas quadráticos, sendo que a pior estimativa deu-se para o estimador de estado MQP. Os estimadores de estado, aplicando técnicas lineares de solução do problema de estimação, mostraram-se mais robustos aos erros grosseiros, tratando os mesmos durante o processo de cálculo do vetor de estado. No estimador de estado PQF, o último problema de programação resolvido no mesmo, não foi capaz de tratar os erros grosseiros das medidas, resultando em uma estimativa para a variável de estado ângulo da tensão não precisa. A aplicação de uma técnica de pós-processamento ao estimador de estado PQF seria uma boa alternativa para obtenção de melhores estimativas.

Tabela 4.37: Resultado do cálculo do vetor de estado para os estimadores PLFS, PLFNS, PQF, considerando erros grosseiros por falha no sistema de aquisição de dados.

Barra	Fluxo de Potência		Estimador PLFS		Estimador PLFNS		Estimador PQF	
	V (p.u.)	TETA (Graus)	V (p.u.)	TETA (Graus)	V (p.u.)	TETA (Graus)	V (p.u.)	TETA (Graus)
1	1.06	0	1.0533	0	1.0565	0	1.0530	0
2	1.045	-4.957	1.0398	-5.0488	1.0433	-4.9508	1.0377	-4.8333
3	1.01	-12.633	1.0062	-12.8182	1.0097	-12.6522	1.0000	-12.7623
4	1.026	-10.366	1.0223	-10.4913	1.0257	-10.2837	1.0218	-9.2331
5	1.033	-8.947	1.0287	-9.0737	1.0323	-8.9014	1.0287	-7.8421
6	1.07	-14.879	1.0705	-15.1010	1.0726	-14.9798	1.0525	-11.5354
7	1.045	-13.45	1.0361	-13.8747	1.0391	-13.5516	1.0251	-10.7197
8	1.09	-13.45	1.0810	-13.9084	1.0840	-13.5514	1.0706	-10.7134
9	1.028	-15.07	1.0189	-15.4937	1.0218	-15.2192	1.0071	-12.1308
10	1.028	-15.318	1.0181	-15.6794	1.0213	-15.3953	1.0054	-11.8048
11	1.045	-15.213	1.0358	-15.4029	1.0374	-15.1665	1.0199	-11.4223
12	1.053	-15.72	1.0543	-16.1097	1.0561	-16.0849	1.0344	-12.6928
13	1.046	-15.738	1.0462	-15.9628	1.0459	-15.8279	1.0216	-10.9264
14	1.017	-16.394	1.0275	-15.6432	1.0317	-15.4964	1.0099	-11.5971

Tabela 4.38: Resultado do cálculo do vetor de estado para os estimadores MQP e VAPR, considerando erros grosseiros por falha no sistema de aquisição de dados.

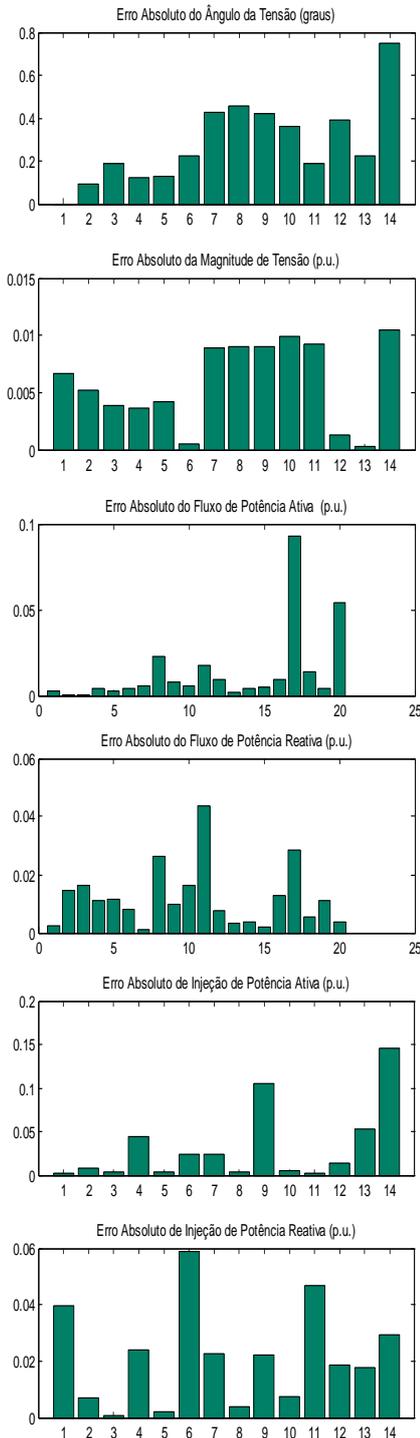
Barra	Fluxo de Potência		Estimador MQP		Estimador VAPV	
	V (p.u.)	TETA (Graus)	V (p.u.)	TETA (Graus)	V (p.u.)	TETA (Graus)
1	1.06	0	1.0580	0	1.0582	0
2	1.045	-4.957	1.0426	-4.9473	1.0452	-4.9696
3	1.01	-12.633	1.0081	-12.6296	1.0121	-12.6316
4	1.026	-10.366	1.0229	-10.3431	1.0278	-10.3648
5	1.033	-8.947	1.0298	-8.9326	1.0345	-8.9228
6	1.07	-14.879	1.0103	-4.1370	1.0747	-14.6944
7	1.045	-13.45	1.0172	-9.8180	1.0456	-13.4380
8	1.09	-13.45	1.0639	-9.8180	1.0906	-13.4380
9	1.028	-15.07	0.9979	-11.3754	1.0285	-15.0554
10	1.028	-15.318	0.9882	-10.0913	1.0290	-15.2688
11	1.045	-15.213	0.9909	-6.6792	1.0480	-15.0939
12	1.053	-15.72	0.9936	-5.1727	1.0576	-15.5470
13	1.046	-15.738	0.9867	-5.2808	1.0507	-15.5655
14	1.017	-16.394	0.9853	-8.3202	1.0382	-15.2750

O valor do erro médio quadrático ( $EMQ$ ) e do erro absoluto máximo ( $Max(EA)$ ) para as grandezas de interesse são mostrados na Tabela 4.39, enquanto na Figura 4.9, é apresentado o valor dos erros absolutos para todos os estimadores de estado avaliados. Os valores dos erros apresentados na Tabela 4.39 confirmam as informações mostradas nas Tabelas 4.37 e 4.38. Para os estimadores PLFS, PLFNS e VAPR, o pior resultado da estimação deu-se na barra 14, conforme Figura 4.9. Os estimadores de estado MQP e PQF apresentaram erros absolutos de estimação elevados em muitos barramentos, resultando em erros médio quadráticos mais elevados em relação aos demais estimadores.

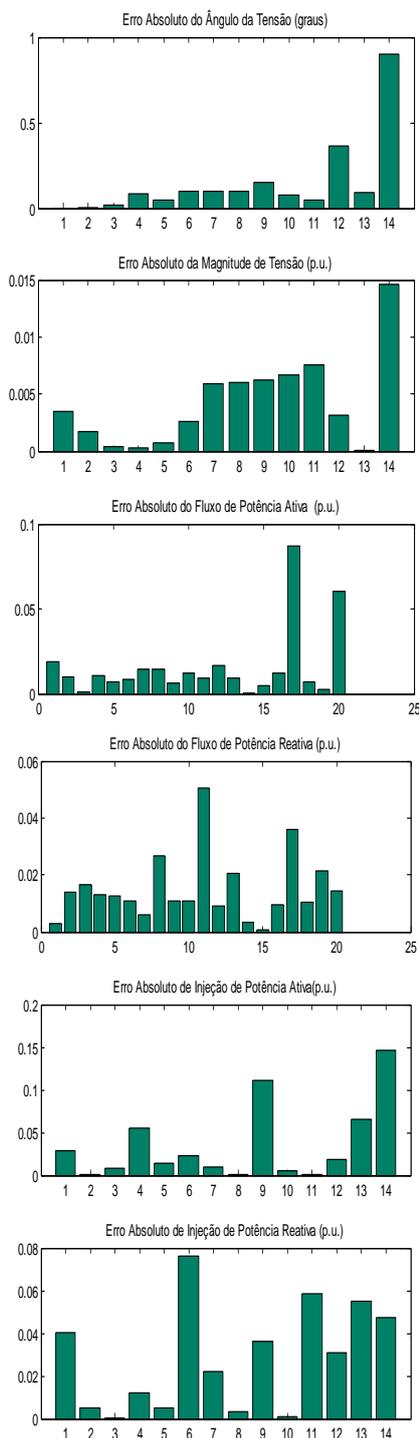
Tabela 4.39: Erros de estimação médio quadrático e absoluto, considerando a presença de erros grosseiros do tipo falha no sistema de aquisição e transmissão de dados.

<b>Erros</b>	<b>Estimador PLFS</b>	<b>Estimador PLFNS</b>	<b>Estimador PQF</b>	<b>Estimador MQP</b>	<b>Estimador VAPR</b>
$EMQ_V$	4.6831e-005	3.2733e-005	2.7775e-004	0.0013	3.8537e-005
$EMQ_\Theta$	0.1162	0.0727	8.5241	38.6681	0.0974
$EMQ_P$	0.0019	0.0022	0.0080	0.0988	0.0019
$EMQ_Q$	5.2060e-004	9.5191e-004	0.0053	0.0144	3.7452e-004
$EMQ_{Pf}$	6.4746e-004	6.6228e-004	0.0081	0.0468	6.2331e-004
$EMQ_{Qf}$	2.4932e-004	3.5649e-004	0.0024	0.0090	1.2228e-004
$Max(EA_V)$	0.0105	0.0147	0.0251	0.0597	0.0212
$Max(EA_\Theta)$	0.7508	0.8976	4.8116	10.7420	1.1190
$Max(EA_{Pi})$	0.0015	0.0015	0.0019	0.0096	0.0015
$Max(EA_{Qi})$	5.8665e-004	7.5999e-004	0.0027	0.0037	5.0855e-004
$Max(E_{A_{Pf}})$	9.2640e-004	8.7387e-004	0.0018	0.0080	9.0298e-004
$Max(E_{A_{Qf}})$	4.3727e-004	5.0414e-004	0.0013	0.0022	3.4213e-004

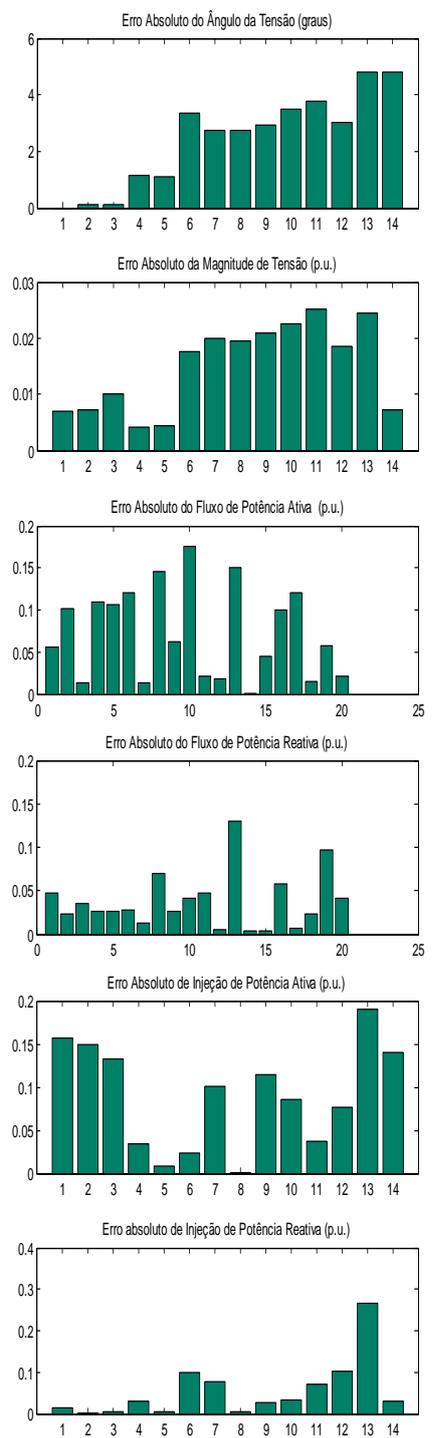
## PLFS



## PLFNS



## PQF



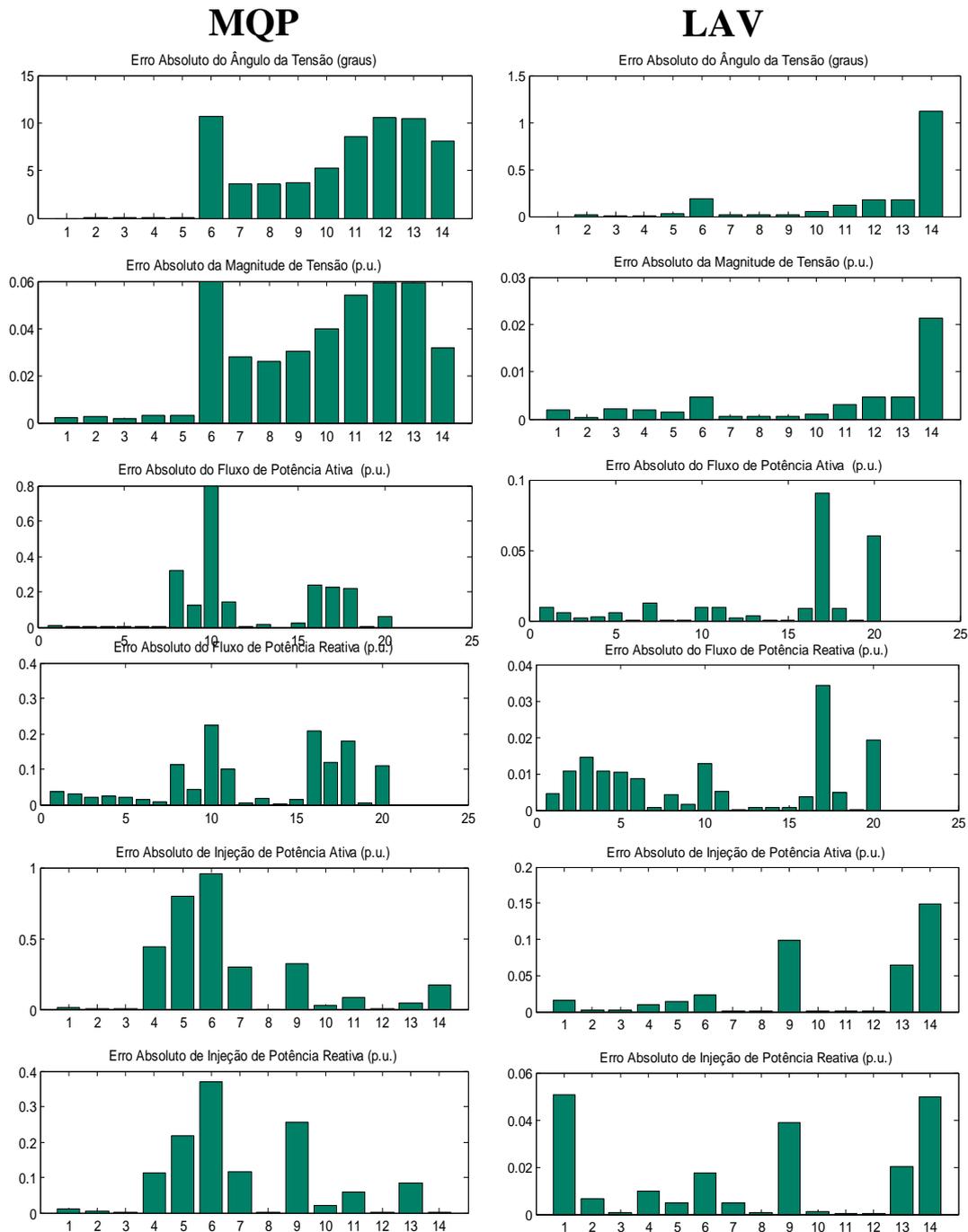


Figura 4.9: Erros absolutos de estimação, considerando a presença de erros grosseiros do tipo falha no sistema de aquisição e transmissão de dados.

O resíduo de estimação, a cada iteração do processo de convergência, para todos os estimadores de estado avaliados, é mostrado na Tabela 4.40. Para os estimadores de estado, considerando restrições Fuzzy, a convergência refere-se ao último problema de

programação resolvido. Direção de convergência semelhante é verificada nos estimadores de estado avaliados.

Tabela 4.40: Convergência dos estimadores de estado.

<b>Iteração</b>	<b>PLFS</b>	<b>PLFNS</b>	<b>PQF</b>	<b>MQP</b>	<b>VAPR</b>
1	0.3133	0.3123	0.2398	0.2365	0.2978
2	0.0255	0.0309	0.0386	0.0172	0.0356
3	0.0023	0.0014	0.0048	0.0001	0.0008
4	0.0000	0.0000	0.0006	0.0000	0.0000
5	-	-	0.0001	-	-

O último problema de programação dos três estimadores de estado, considerando restrições Fuzzy, apresentou valor da função objetivo convergida igual a 1, indicando que as restrições foram atendidas satisfatoriamente. O valor convergido da função objetivo dos estimadores de estado MQP e VAPR foi, respectivamente, 50098.0922 e 2.0447.

### **4.3.3. Rede de Distribuição de Energia Elétrica**

Conforme mencionado anteriormente, a rede de distribuição com 33 barramentos e 32 circuitos será avaliada nas simulações. Os valores adotados nas medidas e pseudomedidas, sem presença de erros grosseiros, são definidos na Tabela A.4 do Apêndice A.

Em grande parte das situações, as únicas informações disponibilizadas por meio de medidas, nas redes de distribuição de eletricidade, são as medidas de magnitude de tensão e injeção de corrente ou potência no barramento da subestação abaixadora, ou no início do alimentador da rede de distribuição. Com o propósito de uma representação mais real das redes de distribuição, as únicas medidas consideradas para o sistema teste, serão: uma medida de magnitude de tensão, um par de medidas de injeção de potência ativa e reativa e um par de medidas de fluxo de potência ativa e reativa. Todas estas medidas estão localizadas no barramento de início do alimentador, como mostrado na Figura 4.10.

Na Figura 4.10, é mostrada a rede de distribuição com o conjunto de medidas e pseudo-medidas Fuzzy. As pseudo-medidas são modeladas por valores de injeção de potência ativa e reativa, refletindo as condições de carregamento nos barramentos ao longo do alimentador. Foram representados 32 pares de pseudo-medidas Fuzzy de injeção de potência ativa e reativa. A redundância do sistema de medidas e pseudo-medidas Fuzzy é igual a 1.06154. A barra 33 é a referência angular do sistema de distribuição.

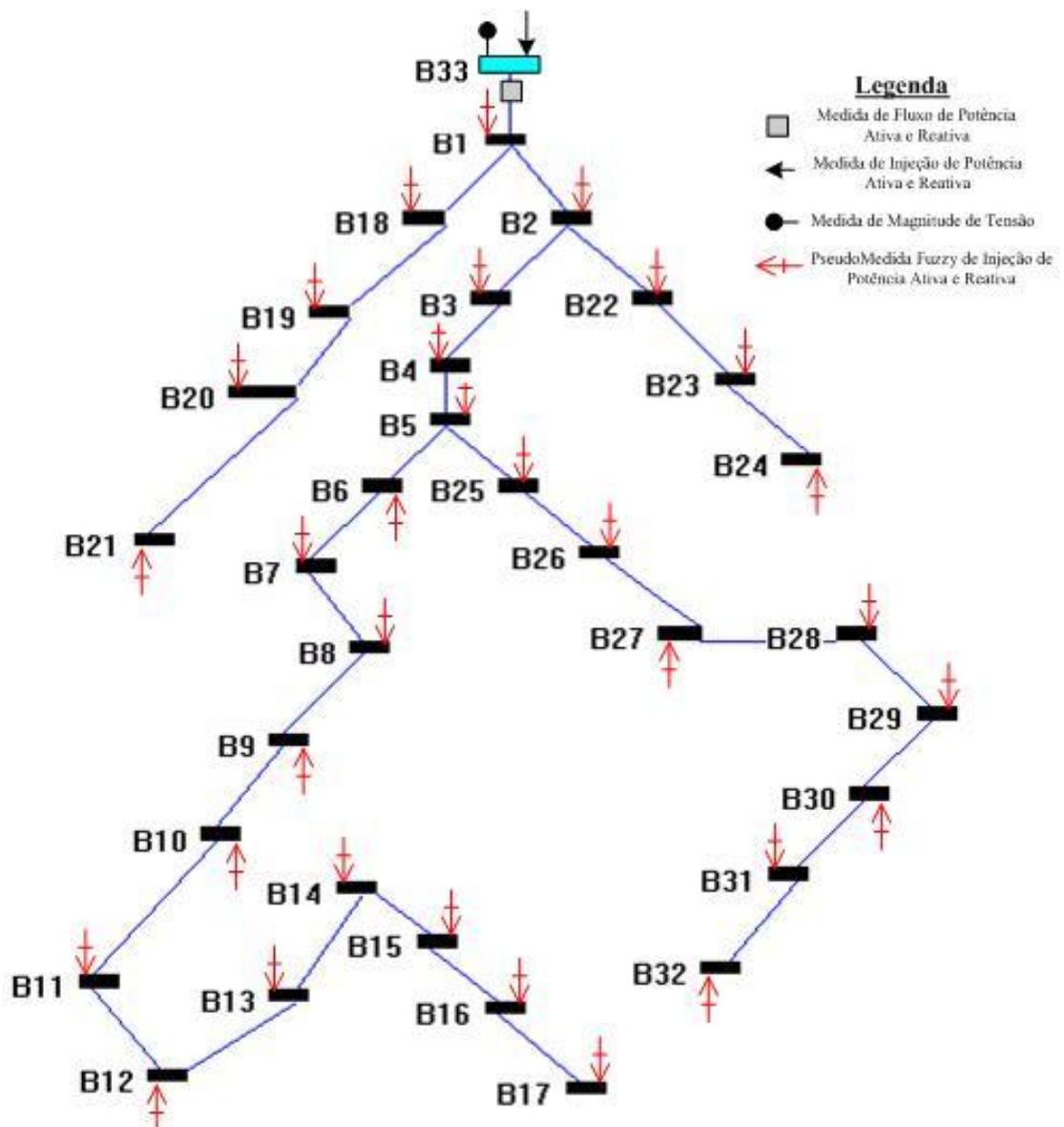


Figura 4.10: Plano de medição e pseudo-medidas Fuzzy para o sistema de distribuição de eletricidade de 33 barramentos.

A construção do conjunto de medidas, pseudo-medidas Fuzzy e pseudo-medidas Crisp é realizada de acordo com o definido nos itens (4.1.1), (4.1.2) e (4.1.3), respectivamente. Porém, o valor do desvio padrão de cada medida não será mais calculado de acordo com as equações 4.1 e 4.2, sendo estes fixos e iguais a:

- Medidas de tensão = 0.001
- Medidas de injeção e fluxo de potência = 0.01

O valor da variância de todas as pseudo-medidas Crisps, consideradas nos estimadores de estado MQP e VAPR, foi igual a 10 em todos os testes realizados no sistema de distribuição de eletricidade.

O valor central da função de pertinência da pseudo-medida Fuzzy é determinado a partir dos valores de carregamento considerados para o problema de fluxo de potência. Três diferentes situações de simulação foram avaliadas no sistema de distribuição. Na primeira situação, nenhum erro grosseiro foi adicionado ao valor central das pseudo-medidas Fuzzy, uma vez que o desconhecimento das condições de operação é total nestes sistemas. Nas demais situações, considerou-se o acréscimo do erro grosseiro ao valor central da função de pertinência de algumas pseudo-medida Fuzzy.

Em razão da inexistência de informações operacionais ou do levantamento de curvas típicas de operação, a construção das funções de pertinência das pseudo-medidas Fuzzy obedeceu ao seguinte princípio:

“O total desconhecimento das condições de operação da rede de distribuição, em conjunto com os baixos valores das injeções de potência relativas ao valor central das funções de pertinência, permitem variações de até  $\pm 30\%$  do valor central para faixas com pertinência unitária, enquanto que o decréscimo de pertinência ocorre para variações iguais a até  $\pm 40\%$  do valor central.”

A Tabela 4.41 mostra o valor correspondente para os intervalos  $p$  e  $d$  da função de pertinência definida na Figura 4.1. O ponto  $p$  é relativo ao intervalo de pertinência unitária, enquanto o intervalo  $d$  refere-se ao decréscimo de pertinência da função de pertinência das pseudo-medidas Fuzzy consideradas. Os valores de  $p$  e  $d$  são expressos em porcentagem do valor central.

Tabela 4.41: Valores dos intervalos da função de pertinência da pseudo-medida Fuzzy.

Pseudo-medida Fuzzy de Injeção de Potência	Porcentagem do valor central C, definido conforme a Figura 5.1	
	$\pm p$	$\pm d$
P <sub>32</sub> , P <sub>31</sub> , P <sub>30</sub> , P <sub>29</sub> , P <sub>27</sub> , P <sub>25</sub> , P <sub>17</sub> , P <sub>2</sub> , P <sub>11</sub> , Q <sub>32</sub> , Q <sub>31</sub> , Q <sub>30</sub> , Q <sub>29</sub> , Q <sub>27</sub> , Q <sub>25</sub> , Q <sub>17</sub> , Q <sub>2</sub> , Q <sub>11</sub>	25%	10%
P <sub>20</sub> , P <sub>16</sub> , P <sub>14</sub> , P <sub>6</sub> , P <sub>8</sub> , P <sub>3</sub> , P <sub>13</sub> , Q <sub>20</sub> , Q <sub>16</sub> , Q <sub>14</sub> , Q <sub>6</sub> , Q <sub>8</sub> , Q <sub>3</sub> , Q <sub>13</sub>	20%	10%
P <sub>22</sub> , P <sub>10</sub> , P <sub>12</sub> , Q <sub>22</sub> , Q <sub>10</sub> , Q <sub>12</sub>	22%	10%
P <sub>14</sub> , P <sub>6</sub> , P <sub>8</sub> , P <sub>3</sub> , P <sub>13</sub> , P <sub>19</sub> , Q <sub>14</sub> , Q <sub>6</sub> , Q <sub>8</sub> , Q <sub>3</sub> , Q <sub>13</sub> , Q <sub>19</sub>	15%	10%
P <sub>9</sub> , P <sub>4</sub> , P <sub>21</sub> , P <sub>26</sub> , Q <sub>9</sub> , Q <sub>4</sub> , Q <sub>21</sub> , Q <sub>26</sub>	15%	5%
P <sub>28</sub> , P <sub>5</sub> , P <sub>7</sub> , P <sub>23</sub> , Q <sub>5</sub> , Q <sub>7</sub> , Q <sub>28</sub> , Q <sub>23</sub>	10%	10%
P <sub>15</sub> , P <sub>24</sub> , P <sub>18</sub> , Q <sub>15</sub> , Q <sub>24</sub> , Q <sub>18</sub>	10%	7%

#### 4.3.3.1. Pseudo-medida Fuzzy sem presença de erro grosseiro

Neste teste, não se considera a inclusão de erros grosseiros ao valor calculado pelo fluxo de potência, para a modelagem do valor central da função de pertinência das pseudo-medidas Fuzzy, e conseqüentemente nas pseudo-medidas Crisps. A condição inicial, para o problema de programação não linear do estimador de estado PQF, foi valor nulo para os ângulos das tensões, unitário para as magnitudes das tensões, e unitário para a variável lambda,  $\lambda$ .

O resultado da estimação dos módulos e ângulos da tensão, aplicando os estimadores de estado PLFNS, PQF, MQP e VAPR, assim como o resultado obtido pela aplicação do

fluxo de potência são mostrados na Figura 4.11. Observa-se que todos os estimadores de estado avaliados apresentaram estimações semelhantes para as variáveis de interesse.

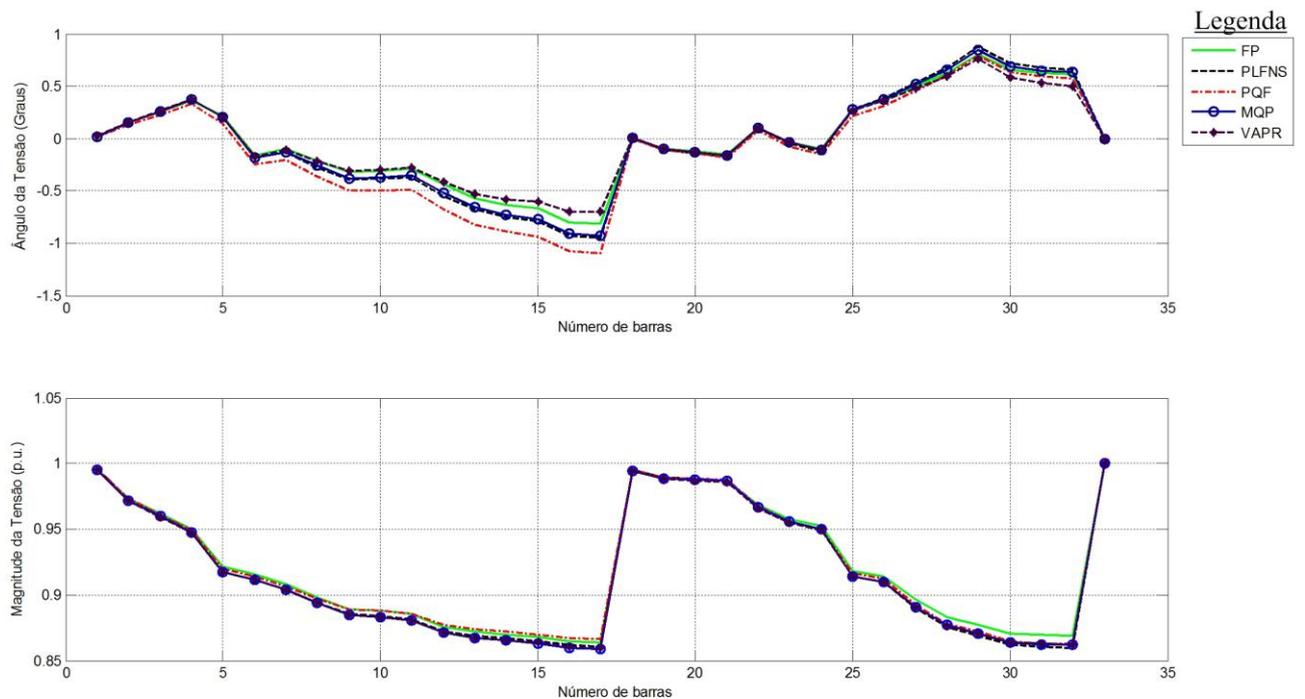


Figura 4.11: Estimativas dos ângulos e módulos das tensões nos barramentos.

O valor do erro médio quadrático ( $EMQ$ ) e o valor do erro absoluto máximo ( $Max(EA)$ ) para as grandezas de interesse são descritos na Tabela 4.42, enquanto na Figura 4.12 é apresentado o valor dos erros absolutos por barramento do sistema. Os erros médios quadráticos e os erros absolutos foram muito próximos em todos os estimadores de estado avaliados, sendo que os estimadores de estado PLFNS e PQF solucionaram, com eficácia, o problema de observabilidade do sistema de distribuição, aliada a uma estimação de estado coerente. Como pode ser observado na Figura 4.12 e na Tabela 4.42, a pior estimativa foi verificada para o ângulo da tensão no estimador de estado PQF.

Tabela 4.42: Erros de estimação.

Erros	Estimador POF	Estimador PLFNS	Estimador MQP	Estimador VAPR
EMQ <sub>V</sub>	7.2839e-006	1.9272e-005	1.7437e-005	1.7182e-005
EMQ <sub>θ</sub>	0.0179	0.0040	0.0024	0.0020
EMQ <sub>P</sub>	1.3429e-005	1.5006e-005	1.4350e-005	1.4280e-005
EMQ <sub>Q</sub>	6.0402e-006	6.0604e-006	5.9842e-006	5.8406e-006
EMQ <sub>Pf</sub>	1.4870e-007	7.4526e-007	3.0144e-008	1.2379e-007
EMQ <sub>Qf</sub>	1.5175e-007	1.7824e-007	1.2878e-008	4.0586e-008
Max(EA <sub>V</sub> )	0.0061	0.0091	0.0072	0.0068
Max(EA <sub>θ</sub> )	0.2791	0.1298	0.1111	0.1188
Max(EA <sub>Pi</sub> )	0.0203	0.0215	0.0210	0.0209
Max(EA <sub>Qi</sub> )	0.0135	0.0135	0.0133	0.0131
Max( $E_{A_{Pf}}$ )	0.0012	0.0015	5.0559e-004	5.8246e-004
Max( $E_{A_{Qf}}$ )	7.5155e-004	7.8986e-004	2.4167e-004	4.2562e-004

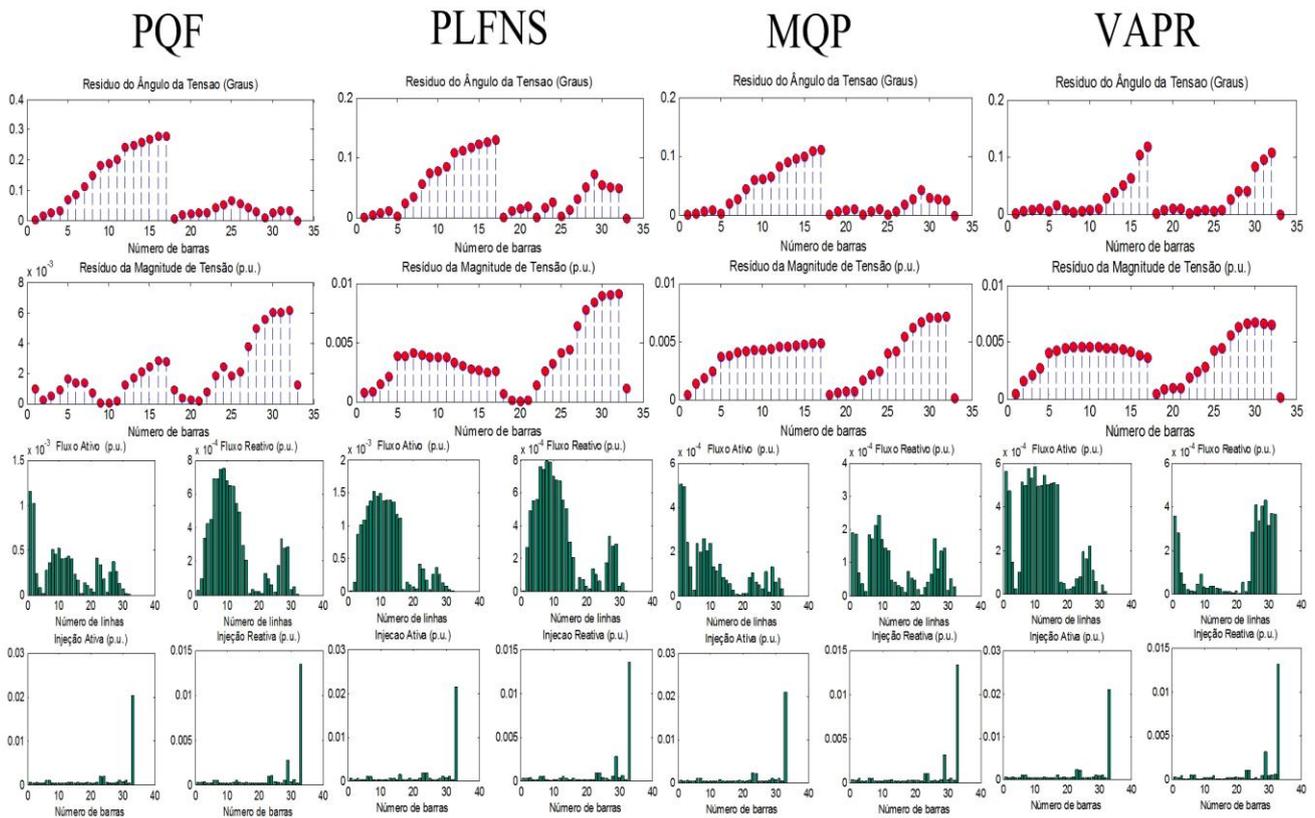


Figura 4.12: Erros absolutos por barramento para o sistema de distribuição de eletricidade de 33 barramentos.

O resíduo de estimação a cada iteração do processo de convergência, para todos os estimadores de estado avaliados, é mostrado na Tabela 4.43. Direção de convergência

semelhante é verificada em todos os estimadores de estado. O último problema de programação dos dois estimadores de estado, considerando restrições Fuzzy, apresentou valor da função objetivo convergida igual a 1, indicando que todas as restrições foram atendidas satisfatoriamente. Os valores convergidos para a função objetivo dos estimadores de estado MQP e VAPR foram, respectivamente, 0.00030927 e 0.0013066.

Tabela 4.43: Convergência dos estimadores de estado.

Iteração	Estimador PQF	Estimador PLFNS	Estimador MQP	Estimador VAPV
1	0.1288	0.1307	0.1411	0.1293
2	0.0083	0.0131	0.0057	0.0071
3	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000
4	0.0000	-	-	-

#### 4.3.3.2. Situação com a pseudo-medida Fuzzy com presença de erro grosseiro

Neste teste, considerou-se a adição de um erro grosseiro no valor central da função de pertinência de algumas pseudo-medidas Fuzzy, e conseqüentemente, nas pseudo-medidas Crisps. Foram selecionadas e distribuídas, ao longo do alimentador, vinte pseudo-medidas Fuzzy de injeção de potência ativa e reativa para introdução de erro grosseiro ao valor central. Na Tabela 4.44, é mostrado o valor central da função de pertinência das pseudo-medidas Fuzzy com presença de erro grosseiro, e o valor não contaminado, utilizado em um problema de fluxo de potência e no teste realizado no item (4.3.3.1). O valor do erro grosseiro foi gerado aleatoriamente, com valores de desvio padrão compreendidos entre  $\pm 10\sigma$  e  $\pm 40\sigma$ .

Tabela 4.44: Pseudo-medidas Fuzzy com adição de erros grosseiros ao valor central da sua função de pertinência.

Pseudo-medida	Valor para o Fluxo de Potência (KW/Kvar)	Valor Central com Erro Grosseiro (KW/KVAR)
P <sub>1</sub>	100	90
Q <sub>1</sub>	60	80
P <sub>3</sub>	120	170
Q <sub>3</sub>	80	110
P <sub>6</sub>	200	150
Q <sub>6</sub>	100	150
P <sub>7</sub>	200	160
Q <sub>7</sub>	100	70
P <sub>13</sub>	120	140
Q <sub>13</sub>	80	90
P <sub>23</sub>	420	570
Q <sub>23</sub>	200	70
P <sub>24</sub>	420	370
Q <sub>24</sub>	200	260
P <sub>29</sub>	200	270
Q <sub>29</sub>	40	70
P <sub>30</sub>	150	130
Q <sub>30</sub>	70	50
P <sub>31</sub>	210	280
Q <sub>31</sub>	10	50

A condição inicial, para o problema de programação não linear do estimador de estado PQF, foi valor nulo para os ângulos das tensões, unitário para as magnitudes das tensões, e unitário para a variável lambda,  $\lambda$ . O resultado da estimação das magnitudes e ângulos da tensão, aplicando os estimadores de estado PLFNS, PQF, MQP e VAPR, assim como o resultado obtido pela aplicação do fluxo de potência são mostrados na Figura 4.13. O acréscimo do erro grosseiro ao valor central da função de pertinência da pseudo-medida manifestou-se principalmente no resultado da estimativa para a variável ângulo da tensão, quando comparamos o resultado das Figuras 4.13 e 4.11. Contudo, o valor máximo verificado para o erro absoluto do ângulo da tensão foi muito baixo, em torno de 0.5 grau para os quatro estimadores de estado avaliados.

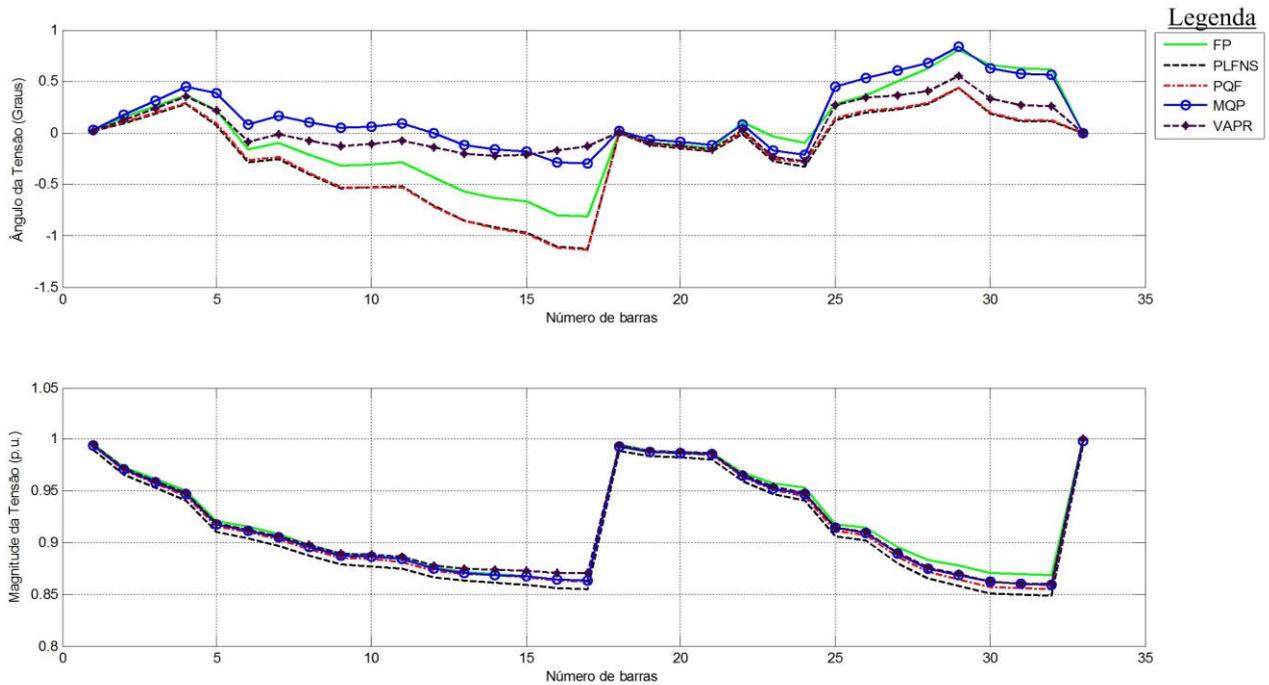


Figura 4.13: Estimativas dos ângulos e módulos das tensões nos barramentos.

O valor do erro médio quadrático ( $EMQ$ ) e o valor do erro absoluto máximo ( $Max(EA)$ ) para as grandezas de interesse são descritos na Tabela 4.45; enquanto na Figura 4.14, é apresentado o valor dos erros absolutos por barramento do sistema. Os erros médios quadráticos e os erros absolutos foram muito próximos em todos os estimadores de estado avaliados, sendo que os maiores valores de erros absolutos se verificaram nos trechos de final de rede do alimentador, locais onde a imprecisão, acerca dos valores utilizados para a pseudo-medida Fuzzy, tendem a ser maiores que em outros pontos do alimentador.

Tabela 4.45: Erros de estimação.

Erros	Estimador PQF	Estimador PLFNS	Estimador MQP	Estimador VAPV
EMQ <sub>V</sub>	4.3885e-005	1.359e-004	1.9738e-005	1.9118e-005
EMQ <sub>θ</sub>	0.0592	0.0619	0.0650	0.0660
EMQ <sub>P</sub>	1.0799e-005	1.5232e-005	1.3727e-005	1.5207e-005
EMQ <sub>Q</sub>	6.1982e-006	6.1922e-006	6.8537e-006	6.2427e-006
EMQ <sub>Pf</sub>	1.4179e-006	4.9226e-006	5.3321e-007	4.0734e-006
EMQ <sub>Qf</sub>	2.5248e-007	1.1759e-007	2.1944e-007	9.4583e-008
Max(EA <sub>V</sub> )	0.0141	0.0204	0.0094	0.0092
Max(EA <sub>θ</sub> )	0.4984	0.5079	0.5121	0.6827
Max(EA <sub>Pi</sub> )	0.0182	0.0215	0.0206	0.0215
Max(EA <sub>Qi</sub> )	0.0135	0.0135	0.0141	0.0135
Max(EA <sub>P<sub>te</sub></sub> )	0.0033	0.0039	0.0016	0.0037
Max(EA <sub>Q<sub>te</sub></sub> )	0.0010	7.5773e-004	8.4165e-004	7.4147e-004

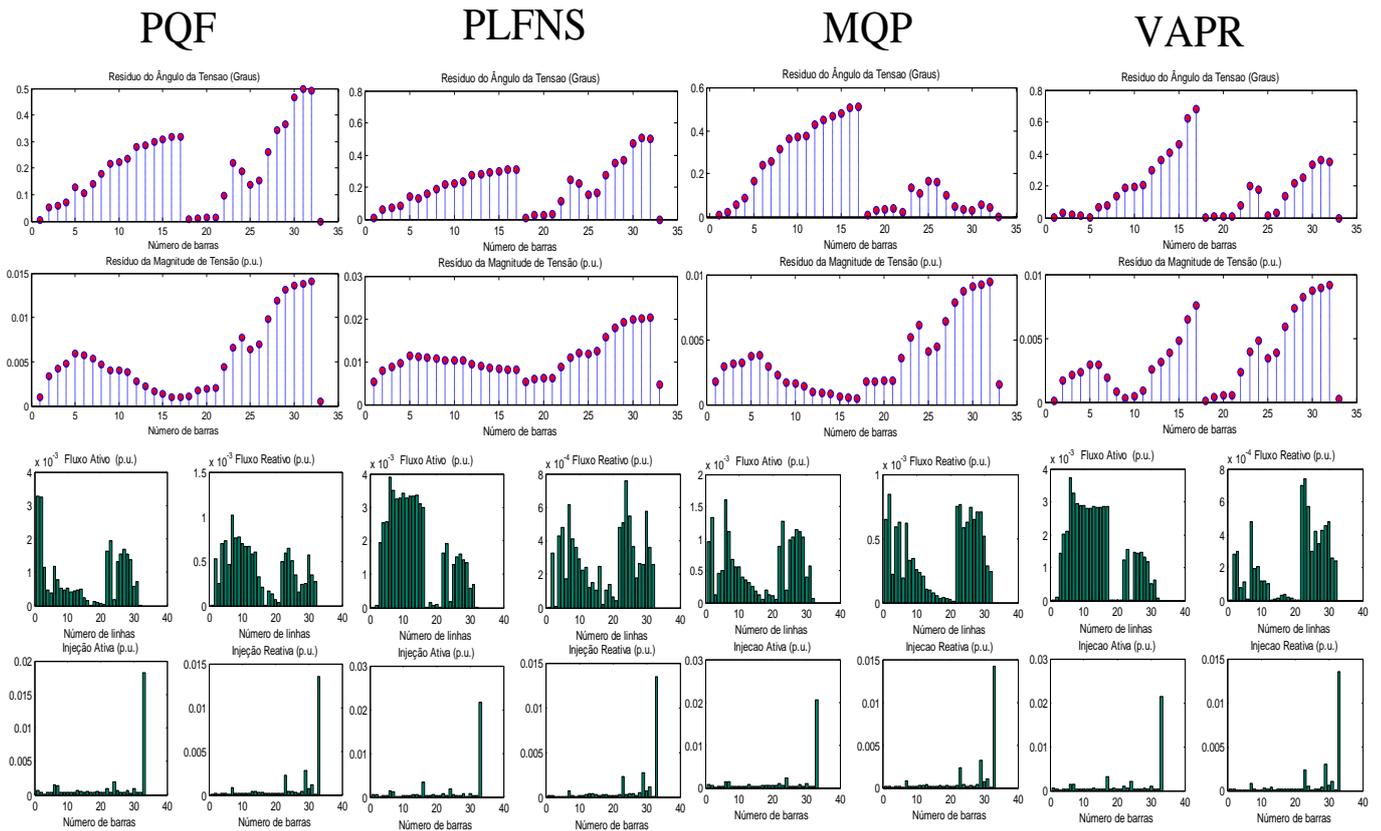


Figura 4.14: Erros absolutos por barramento para o sistema de distribuição de eletricidade de 33 barramentos.

O resíduo de estimação, a cada iteração do processo de convergência, para todos os estimadores de estado avaliados, é mostrado na Tabela 4.46. Direção de convergência

semelhante é verificada em todos os estimadores de estado. O último problema de programação dos dois estimadores de estado, considerando restrições Fuzzy, apresentou valor da função objetivo convergida igual a 1, indicando que todas as restrições foram atendidas satisfatoriamente. Os valores convergidos para a função objetivo dos estimadores de estado MQP e VAPR foram, respectivamente, 0.0018177 e 0.0027606.

Tabela 4.46: Convergência dos estimadores de estado.

Iteração	Estimador POF	Estimador PLFNS	Estimador MQP	Estimador VAPV
1	0.1361	0.1394	0.1379	0.1346
2	0.0090	0.0127	0.0057	0.0219
3	0.0001	0.0002	0.0000	0.0003
4	0.0000	0.0001	-	0.0000

#### 4.3.3.3. Pseudo-medida com presença de erro grosseiro e erro grosseiro em medidas analógicas

O propósito deste teste é avaliar a capacidade de cálculo do vetor de estado pelos estimadores de estado, considerando restrições Fuzzy, quando há presença de erros grosseiros em medidas da rede elétrica. Neste teste, será considerada a inclusão de erros grosseiros ao valor central das funções de pertinência das mesmas pseudo-medidas Fuzzy consideradas no item (4.3.3.2). Sendo assim, o conjunto de pseudo-medidas Fuzzy, com erro grosseiro em seu valor central, bem como o valor central com o erro grosseiro foram apresentados na Tabela 4.44.

Na Tabela 4.47, são mostradas as medidas às quais foram adicionados erros grosseiros, juntamente com o valor das mesmas na presença de erro grosseiro e o valor destas sem o erro grosseiro, considerado para o problema de fluxo de potência. As medidas de fluxo de potência ativa e reativa entre os barramentos 33 e 1 do sistema de distribuição da Figura 4.10 foram as medidas escolhidas como portadoras de erros grosseiros. Os erros

grosseiros considerados são do tipo falha no sistema de aquisição de medidas. Ao valor da medida  $P_{33-1}$ , é adicionado, além do erro grosseiro, um ruído aleatório calculado conforme (4.1).

Tabela 4.47: Medidas com presença de erros grosseiros para o sistema de distribuição de 33 barramentos.

<b>Medida com Erro Grosseiro</b>	<b>Valor para o Fluxo de Potência</b>	<b>Valor com Erro Grosseiro</b>
<b><math>P_{33-1}</math> (MW)</b>	4.01	-4.01
<b><math>Q_{33-1}</math> (MVar)</b>	2.430	0.00

A condição inicial, para o problema de programação não linear do estimador de estado PQF, foi valor nulo para os ângulos das tensões, unitário para as magnitudes das tensões, e unitário para a variável lambda,  $\lambda$ . O resultado da estimação das magnitudes e ângulos das tensões, aplicando os estimadores de estado PLFNS, PQF, MQP e VAPR, assim como o resultado obtido pela aplicação do fluxo de potência são mostrado na Figura 4.15. As piores estimativas para os ângulos e magnitudes das tensões foram verificadas para o estimador de estados MQP. Os estimadores, considerando restrições Fuzzy, assim como o estimador VAPR trataram os erros grosseiros, durante o processo de cálculo do vetor de estado, apresentando estimativas para as variáveis de estado quase semelhantes à situação analisada nos itens 4.3.3.1 e 4.3.3.2.

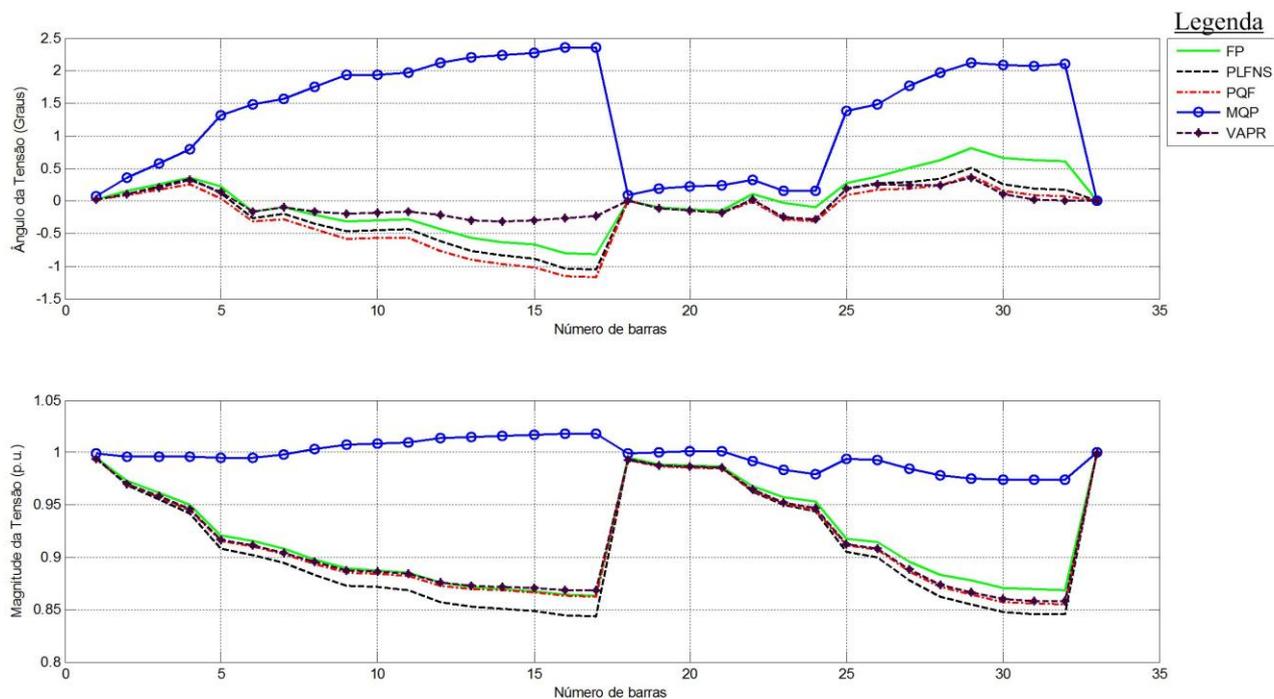


Figura 4.15: Estimativas dos ângulos e módulos das tensões nos barramentos.

O valor do erro médio quadrático ( $EMQ$ ) e o valor do erro absoluto máximo ( $Max(EA)$ ) para as grandezas de interesse são descritos na Tabela 4.48, enquanto na Figura 4.16, é apresentado o valor dos erros absolutos por barramento do sistema. O resultado mostrado na Tabela 4.48 e Figura 4.16 confirmam as informações das curvas da Figura 4.15. Todos os estimadores de estado, considerando restrições Fuzzy, apresentaram erros de estimação muito próximos.

Tabela 4.48: Erros de estimação.

Erros	Estimador PQF	Estimador PLFNS	Estimador MQP	Estimador VAPR
EMQ <sub>V</sub>	2.8728e-005	2.2348e-004	0.0086	2.9285e-005
EMQ <sub>θ</sub>	0.0806	0.0388	2.7802	0.0786
EMQ <sub>P</sub>	1.3438e-005	1.0511e-005	1.2019e-004	1.5045e-005
EMQ <sub>Q</sub>	6.0443e-006	4.0712e-006	2.1350e-005	6.1263e-006
EMQ <sub>Pf</sub>	1.4766e-007	1.1649e-006	1.8954e-004	4.4815e-007
EMQ <sub>Qf</sub>	1.5204e-007	6.8944e-007	1.9063e-005	1.1240e-007
Max(EA <sub>V</sub> )	0.0122	0.0239	0.1548	0.0110
Max(EA <sub>θ</sub> )	0.5514	0.4414	3.1781	0.6002
Max(EA <sub>Pi</sub> )	0.0203	0.0179	0.0611	0.0215
Max(EA <sub>Qi</sub> )	0.0135	0.0109	0.0256	0.0135
Max(EA <sub>P<sub>re</sub></sub> )	0.0012	0.0036	0.0396	0.0011
Max(EA <sub>Q<sub>re</sub></sub> )	7.5176e-004	0.0026	0.0121	7.0093e-004

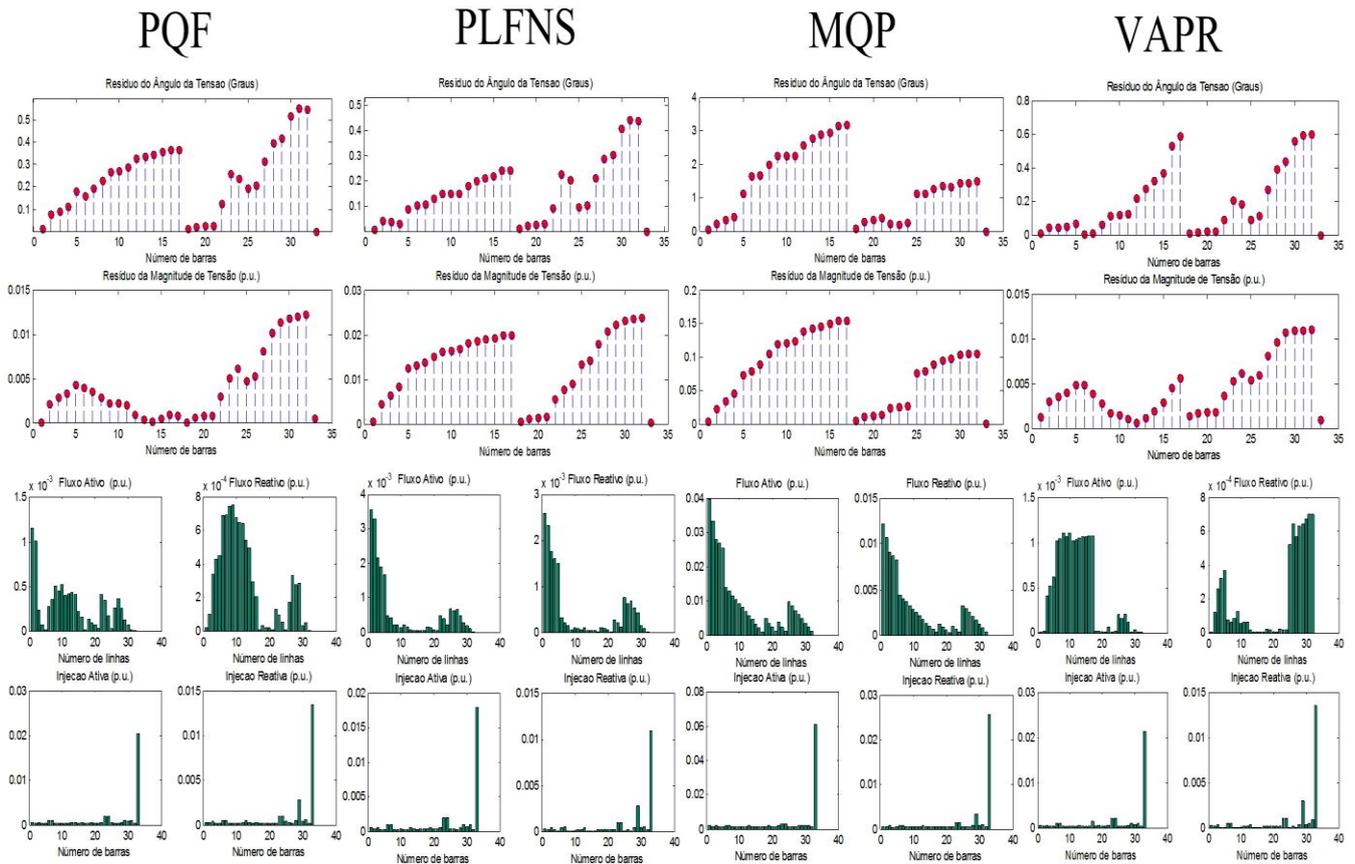


Figura 4.16: Erros absolutos por barramento para o sistema de distribuição de eletricidade.

Na Tabela 4.49, é mostrado o valor calculado a partir do resultado da estimação de estado para a medida à qual foi adicionado erro grosseiro, para os quatro estimadores de

estado avaliados. Com exceção do estimador de estado MQP, o valor do fluxo de potência ativa e reativa, no circuito considerado, foi próximo ao valor verdadeiro, determinado através de um problema de fluxo de potência.

Tabela 4.49: Medidas com presença de erros grosseiros para o sistema de distribuição de 33 barramentos.

Medida com Erro Grosseiro	Valor para o Fluxo de Potência	Valor com Erro Grosseiro	PQF	PLFNS	MQP	VAPR
$P_{33-1}$ (MW)	4.01	-4.01	4.04	4.28	-0.04	3.92
$Q_{33-1}$ (MVar)	2.430	0.00	2.43	2.69	1.22	2.43

O resíduo máximo de estimação, a cada iteração do processo de convergência, para todos os estimadores de estado avaliados, é mostrado na Tabela 4.50. Exceto o estimador de estado MQP, os demais estimadores de estado apresentam direção de convergência semelhantes. Isto pode ser justificado pela característica de robustez dos estimadores de estado PQF, PLFNS e VAPR. O último problema de programação dos dois estimadores de estado, considerando restrições Fuzzy, apresentou valor da função objetivo convergida igual a 1, indicando que todas as restrições foram atendidas satisfatoriamente. Os valores convergidos para a função objetivo dos estimadores MQP e VAPR foram, respectivamente, 17.09 e 0.10537.

Tabela 4.50: Convergência dos estimadores de estado.

Iteração	Estimador PQF	Estimador PLFNS	Estimador MQP	Estimador VAPR
1	0.1310	0.1226	0.0446	0.1310
2	0.0121	0.0154	0.0036	0.0138
3	0.0002	0.0003	0.0003	0.0002
4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

#### 4.3.4. Modelagem da Rede Elétrica Externa em Sistemas de Transmissão

Para este conjunto de testes serão considerados os sistemas IEEE 14 barras, IEEE 30 barras e IEEE118 barras, divididos em uma rede interna e em uma ou mais redes externas. Para a rede interna, considera-se a presença apenas de medidas da rede elétrica, enquanto a rede elétrica externa caracteriza-se pela presença de somente pseudo-medidas, responsáveis por tornar a rede externa totalmente observável para a rede interna, permitindo assim a estimação do seu estado. Grande parte das pseudo-medidas representadas, na rede externa, caracterizam-se por serem pseudo-medidas críticas Fuzzy ou pseudo-medidas críticas Crisps.

A construção do conjunto de medidas, pseudo-medidas Fuzzy e pseudo-medidas Crisp é realizada de acordo com o definido nos itens (4.1.1), (4.1.2) e (4.1.3), respectivamente. O valor máximo do ruído aleatório adicionado a cada medida presente nos sistemas testes é igual a  $\pm 3\sigma$ . Contudo, para o sistema IEEE 118 barras, o valor do desvio padrão de cada medida não será mais calculado de acordo com as equações (4.1) e (4.2), passando a ser estes fixos e iguais a:

- Medidas de tensão = 0.001
- Medidas de injeção e fluxo de potência = 0.01

Em função da inexistência de informações operacionais ou do levantamento de curvas típicas de operação para os três sistemas teste do IEEE, a construção das funções de pertinência das pseudo-medidas Fuzzy obedeceu alguns princípios que serão descritos na apresentação do resultado de cada simulação. Porém, em todos os testes, os valores considerados para as faixas de pertinência, procuram evitar grandes variações em relação ao valor central da pseudo-medida Fuzzy.

O valor central da função de pertinência da pseudo-medida Fuzzy é determinado a partir do resultado do problema de fluxo de potência, sendo que em todos os testes é

adicionado um erro grosseiro aleatório entre  $\pm 10\sigma$  e  $\pm 40\sigma$  ao valor do fluxo de potência, representando a incerteza das informações disponibilizadas acerca das redes externas em sistemas de transmissão de eletricidade.

Os valores em p.u., das grandezas, são determinados em uma base de potência de 100MW e tensão igual a 138 KV.

O resultado do cálculo do vetor de estado pelos estimadores de estado, considerado restrições Fuzzy, PLFNS e PQF, é comparado com o resultado do fluxo de potência e com o resultado da aplicação de estimadores de estado baseados em informações Crisps, MQP e VAPR. O valor da variância de cada pseudo-medida Crisp é descrito com a apresentação do resultado de cada simulação.

#### **4.3.4.1. IEEE 14 Barras**

O sistema IEEE 14 barras, o conjunto de medidas e pseudo-medidas Fuzzy considerados são mostrados na Figura 4.17. A construção do plano de medição e a divisão do sistema IEEE14 barras, em uma rede interna e uma rede externa, foi realizada com o auxílio do aplicativo (P.E.T, 2004), conforme mencionado anteriormente. A rede interna possui seis pares de medidas de injeção de potência ativa e reativa, nove pares de medidas de fluxo de potência ativa e reativa e uma medida de magnitude de tensão, totalizando 31 medidas. A redundância da rede interna é igual a 1.8235. Na rede externa, foram representados dois pares de pseudo-medidas Fuzzy de fluxo de potência ativa e reativa e quatro pares de pseudo-medidas Fuzzy de injeção de potência ativa e reativa. A redundância total do sistema IEEE14 barras, considerando os pontos de medição e as pseudo-medidas Fuzzy, é igual a 1.5926. A baixa redundância do sistema tem o propósito de avaliar os estimadores de estado testados em uma situação crítica de observabilidade.

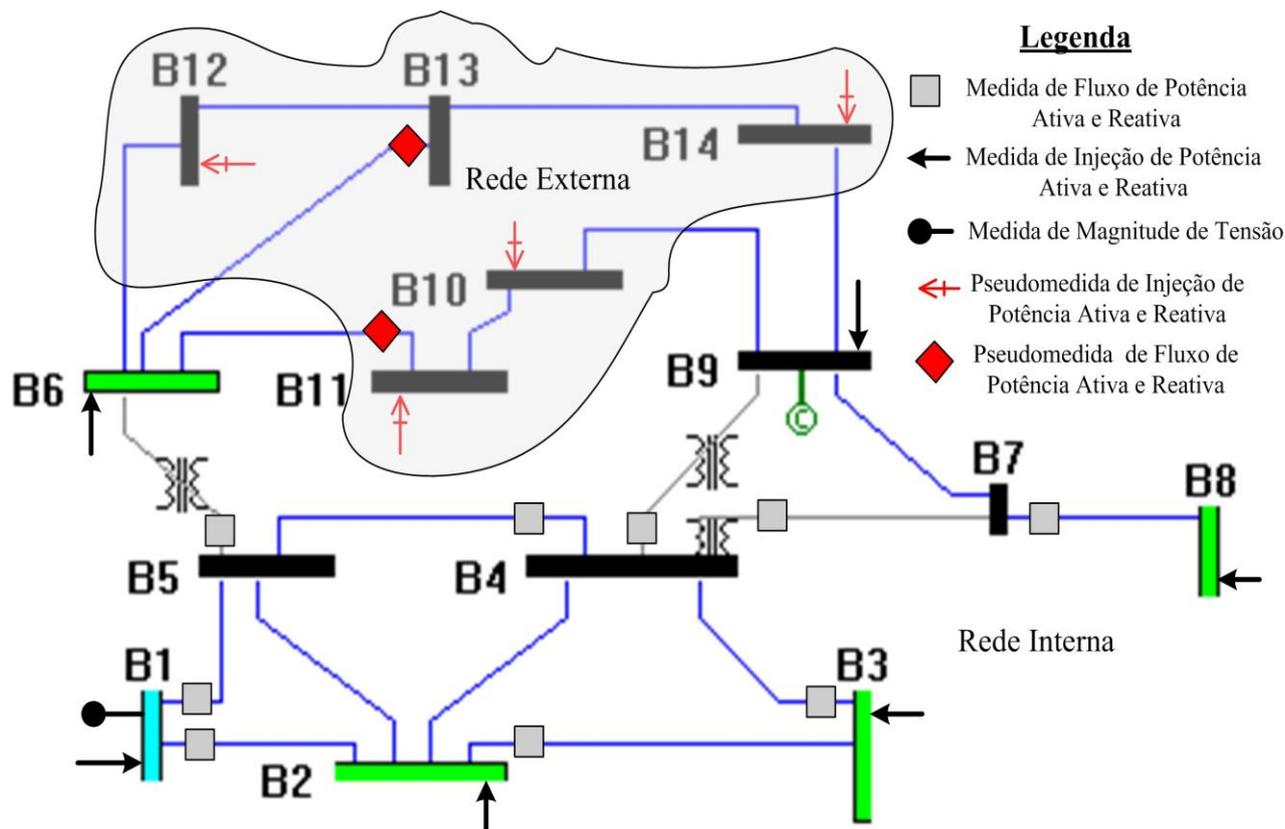


Figura 4.17: Erros absolutos: Divisão do sistema teste IEEE 14 barras em rede interna e rede externa, com o plano de medição e pseudo-medidas Fuzzy associadas.

A construção das funções de pertinência das pseudo-medidas Fuzzy obedeceu ao seguinte princípio:

“O comprimento da faixa de pertinência unitária da função de pertinência trapezoidal da pseudo-medida Fuzzy é determinado a partir do valor do desvio padrão adicionado ao valor central da mesma. O decréscimo de pertinência ocorre para variações fixas iguais a 10% do valor central”.

Desta forma, o comprimento da faixa de pertinência unitária poderá ser igual ou próximo ao valor do desvio padrão adicionado ao valor central da função de pertinência. O propósito principal é garantir que o valor verdadeiro, determinado como resultado do problema de fluxo de potência, esteja sempre compreendido dentro dos limites da função de pertinência da pseudo-medida Fuzzy.

A Tabela 4.51 mostra o valor central, com a inclusão de um erro grosseiro aleatório entre  $\pm 10\sigma$  e  $\pm 40\sigma$ , e o valor correspondente para os pontos de pertinência unitária e pertinência zero da função de pertinência das pseudo-medidas Fuzzy consideradas, sendo estes pontos definidos na Figura 4.1. Também é mostrado o valor do fluxo de potência.

Tabela 4.51: Valores dos vértices das funções de pertinência das pseudo-medidas Fuzzy.

Pseudo-medida Fuzzy	Valor Central com Erro (p.u.)	A <sub>0</sub> (p.u.)	B <sub>0</sub> (p.u.)	B <sub>1</sub> (p.u.)	A <sub>1</sub> (p.u.)	Valor do Fluxo de Potência (p.u.)
P <sub>10</sub>	-0.1164	-0.0698	-0.0815	-0.1513	-0.1630	-0.0900
Q <sub>10</sub>	-0.0474	-0.0321	-0.0368	-0.0580	-0.0627	-0.058
P <sub>11</sub>	-0.0229	-0.0137	-0.0160	-0.0298	-0.0321	-0.0320
Q <sub>11</sub>	-0.0132	-0.0073	-0.0087	-0.0177	-0.0191	-0.018
P <sub>12</sub>	-0.0551	-0.0442	-0.0497	-0.0605	-0.0660	-0.061
Q <sub>12</sub>	-0.0138	-0.0107	-0.0121	-0.0155	-0.0169	-0.016
P <sub>14</sub>	-0.2040	-0.1244	-0.1448	-0.2632	-0.2836	-0.149
Q <sub>14</sub>	-0.0374	-0.0247	-0.0284	-0.0464	-0.0501	-0.050
P <sub>6-11</sub>	0.1045	0.0648	0.0752	0.1338	0.1442	0.0791
Q <sub>6-11</sub>	0.1279	0.0831	0.0959	0.1599	0.1727	0.0971
P <sub>6-13</sub>	0.1468	0.1072	0.1218	0.1718	0.1864	0.1816
Q <sub>6-13</sub>	0.1450	0.0827	0.0971	0.1928	0.2073	0.1040

O valor da variância das pseudo-medidas Crisp, consideradas nos estimadores de estado MQP e VAPR, foi igual a:

- Pseudo-medidas Crisp de injeção de potência = 10
- Pseudo-medidas Crisp de fluxo de potência = 1

A condição inicial, para o problema de programação não linear do estimador de estado PQF, foi valores da magnitude e ângulo da tensão iguais aos resíduos obtidos na convergência do segundo problema de programação quadrática do estimador de estado PQF, enquanto para a variável lambda,  $\lambda$ , foi unitário. Tal condição inicial foi considerada para as variáveis de estado do problema de programação não-linear do estimador de estado PQF, em função das melhores estimativas obtidas. O resultado da estimação das magnitudes e ângulos da tensão, aplicando os estimadores de estado PLFNS, PQF, MQP e

VAPR, assim como o resultado obtido pela aplicação do fluxo de potência são mostrados na Figura 4.18.

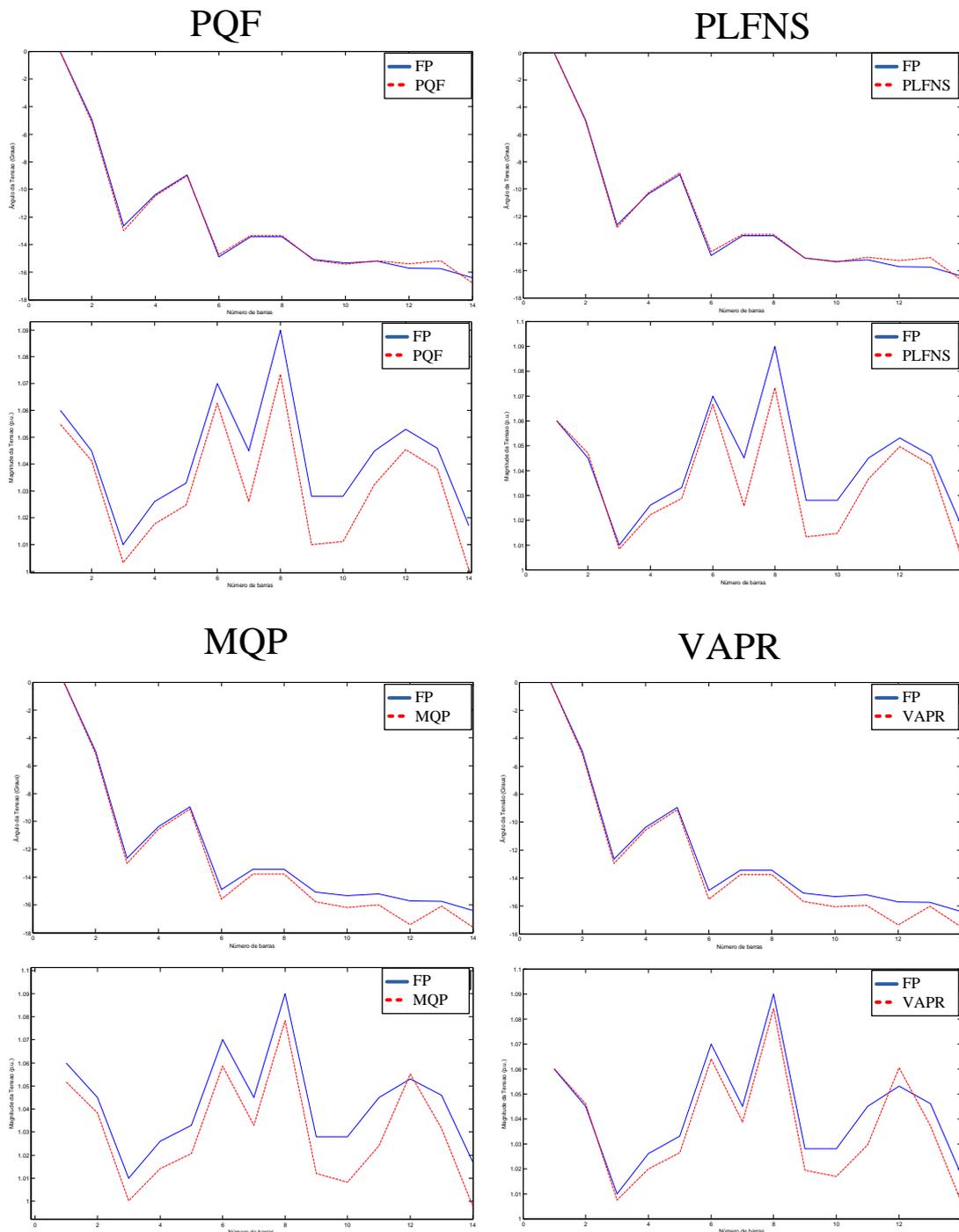


Figura 4.18: Estimativas dos ângulos e módulos das tensões nos barramentos do sistema IEEE14 barras particionado em rede interna e rede externa.

De acordo com a Figura 4.18, em todos os estimadores de estado avaliados, as piores estimativas foram verificadas para a variável magnitude da tensão. Os estimadores de

estado, considerando restrições Fuzzy, produziram boas estimativas para as variáveis de estado da rede interna e externa, tratando, satisfatoriamente, o problema da imprecisão acerca destas redes. O mesmo não se verificou nos estimadores de estado Crisp, MQP e VAPR, apresentando boas estimativas para a rede interna, porém estas ainda são inferiores aquelas fornecidas pelos estimadores considerando restrições Fuzzy; e estimativas menos confiáveis para as variáveis de estado dos barramentos pertencentes a rede externa.

O valor do erro médio quadrático ( $EMQ$ ) e o valor do erro absoluto máximo ( $Max(EA)$ ) para as grandezas de interesse são descritos na Tabela 4.52; enquanto, na Figura 4.19, é apresentado o valor dos erros absolutos por barramento do sistema. As piores estimativas foram verificadas para a variável ângulo da tensão nos estimadores de estado MQP e VAPR. Os estimadores de estado, considerando restrições Fuzzy, apresentaram baixos erros de estimação. Entretanto, o estimador de estado PQF apresentou um erro mais elevado se comparado ao estimador de estados PLFNS para a variável magnitude da tensão.

Tabela 4.52: Erros de estimação para o sistema IEEE 14 barras particionado em rede interna e rede externa.

Erros	Estimador PQF	Estimador PLFNS	Estimador MQP	Estimador VAPV
$EMQ_V$	1.4716e-004	9.6750e-005	1.8376e-004	6.3433e-005
$EMQ_\theta$	0.0581	0.0708	0.5192	0.4458
$EMQ_P$	0.0011	0.0010	0.0011	0.0011
$EMQ_Q$	0.0012	0.0021	0.0039	0.0043
$EMQ_{P_f}$	4.5140e-004	4.1261e-004	6.2242e-004	6.8601e-004
$EMQ_{Q_f}$	6.3760e-004	0.0010	0.0015	0.0017
$Max(EA_V)$	0.0190	0.0192	0.0209	0.0154
$Max(EA_\theta)$	0.5735	0.6959	1.6966	1.6252
$Max(EA_{P_i})$	0.0011	0.0011	9.1109e-004	8.7479e-004
$Max(EA_{Q_i})$	0.0011	0.0013	0.0018	0.0018
$Max(EA_{P_e})$	5.0371e-004	5.3843e-004	5.2952e-004	4.8377e-004
$Max(EA_{Q_e})$	5.0136e-004	7.3708e-004	0.0010	0.0010

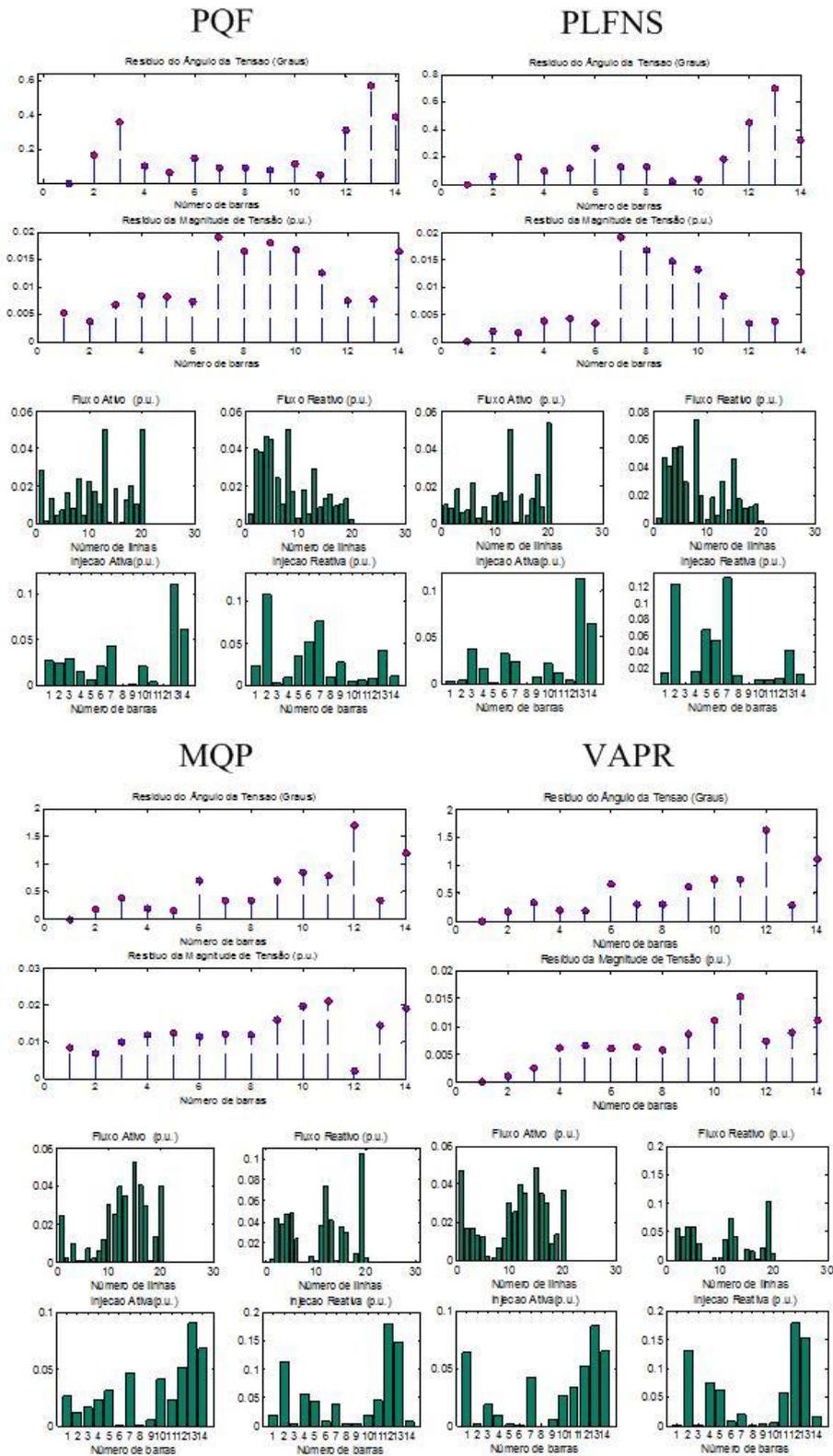


Figura 4.19: Erros absolutos por barramento para o sistema IEEE 14 barras particionado em rede interna e rede externa.

O resíduo máximo de estimação, a cada iteração do processo de convergência, para todos os estimadores de estado avaliados é mostrado na Tabela 4.53. Todos os estimadores

de estado apresentaram direção de convergência semelhantes. O estimador de estados PQF apresentou um menor número de iterações até a convergência, se comparado ao estimador de estados PLFNS, em virtude da condição inicial considerada nesta simulação. O último problema de programação dos dois estimadores de estado, considerando restrições Fuzzy, apresentou valor da função objetivo convergida igual a 1, indicando que todas as restrições foram atendidas satisfatoriamente. Os valores convergidos para a função objetivo dos estimadores MQP e VAPR foram, respectivamente, 5045.7267 e 267.7243.

Tabela 4.53: Convergência dos estimadores de estado.

Iteração	Estimador PQF	Estimador PLFNS	Estimador MQP	Estimador VAPR
1	0.3133	0.3197	0.3271	0.3230
2	0.0025	0.0484	0.0430	0.0424
3	0.0013	0.0028	0.0060	0.0006
4	0.0000	0.0006	0.0000	0.0000
5	-	0.0001	-	-

#### 4.3.4.2. IEEE 30 Barras

Conforme descrito no item (4.1.6), duas configurações para o sistema IEEE30 barras, dividido em rede interna e externa, serão consideradas. A configuração 1 tem o propósito tornar a rede externa observável, através da representação do menor número possível de pseudo-medidas Fuzzy, resultando em um sistema com baixa redundância. A configuração 2 tem o propósito de representar mais de uma rede externa no sistema IEEE30 barras, sendo que a observabilidade das redes externas são alcançadas com a representação de pseudo-medidas Fuzzy de diferentes natureza, em cada rede externa. A representação de medidas virtuais de injeção nula em uma das redes externas também é realizada.

A construção das funções de pertinência das pseudo-medidas Fuzzy obedeceu aos seguintes princípios:

“Para funções de pertinência trapezoidais, variações simétricas de  $\pm 25\sigma$  do valor central são consideradas com pertinência unitária, enquanto o decréscimo de pertinência ocorre para variações iguais a  $\pm 15\sigma$  do valor central.”

“Para funções de pertinência triangulares o decréscimo de pertinência ocorre para variações iguais a  $\pm 10\sigma$  do valor central.”

Com este princípio, assegura-se que o valor verdadeiro, determinado como resultado do problema de fluxo de potência, esteja sempre compreendido dentro dos limites da função de pertinência da pseudo-medida Fuzzy, uma vez que o valor máximo do erro grosseiro adicionado ao valor central da função de pertinência é igual a  $\pm 40\sigma$  para pseudo-medidas Fuzzy de potência e  $\pm 10\sigma$  para pseudo-medidas Fuzzy de magnitude de tensão. As funções de pertinência construídas para as pseudo-medidas Fuzzy trapezoidais apresentam, de acordo com a Figura 4.1, valor de  $p$  igual a  $\pm 25\sigma$ , enquanto  $d$  vale  $\pm 15\sigma$ . As funções de pertinência triangulares apresentam valor de  $d$  igual a  $\pm 10\sigma$ .

#### **4.3.4.2.1. Configuração 1**

O sistema IEEE 30 barras, dividido em rede interna e uma rede externa e o conjunto de medições e pseudo-medidas Fuzzy consideradas são mostrados na Figura 4.20. A divisão adotada para o sistema em rede interna e uma externa, assim como a configuração de medidas considerada para a rede interna, são sugeridas em (DO COUTTO FILHO, 2005). A rede interna possui seis pares de medidas de injeção de potência ativa e reativa, dezesseis pares de medidas de fluxo de potência ativa e reativa e uma medida de magnitude de tensão, totalizando 45 medidas. A redundância da rede interna é igual a 2.1429. Na rede externa, foram representadas sete pares de pseudo-medidas Fuzzy de fluxo de potência ativa e reativa e quatorze pares de pseudo-medidas Fuzzy de injeção de potência ativa e reativa. A soma das medidas e pseudo-medidas Fuzzy representadas é

igual a 87, resultando em uma redundância total para o sistema IEEE30 barras igual a 1.4746. A baixa redundância do sistema tem o propósito de avaliar os estimadores de estado testados em uma situação crítica de observabilidade.

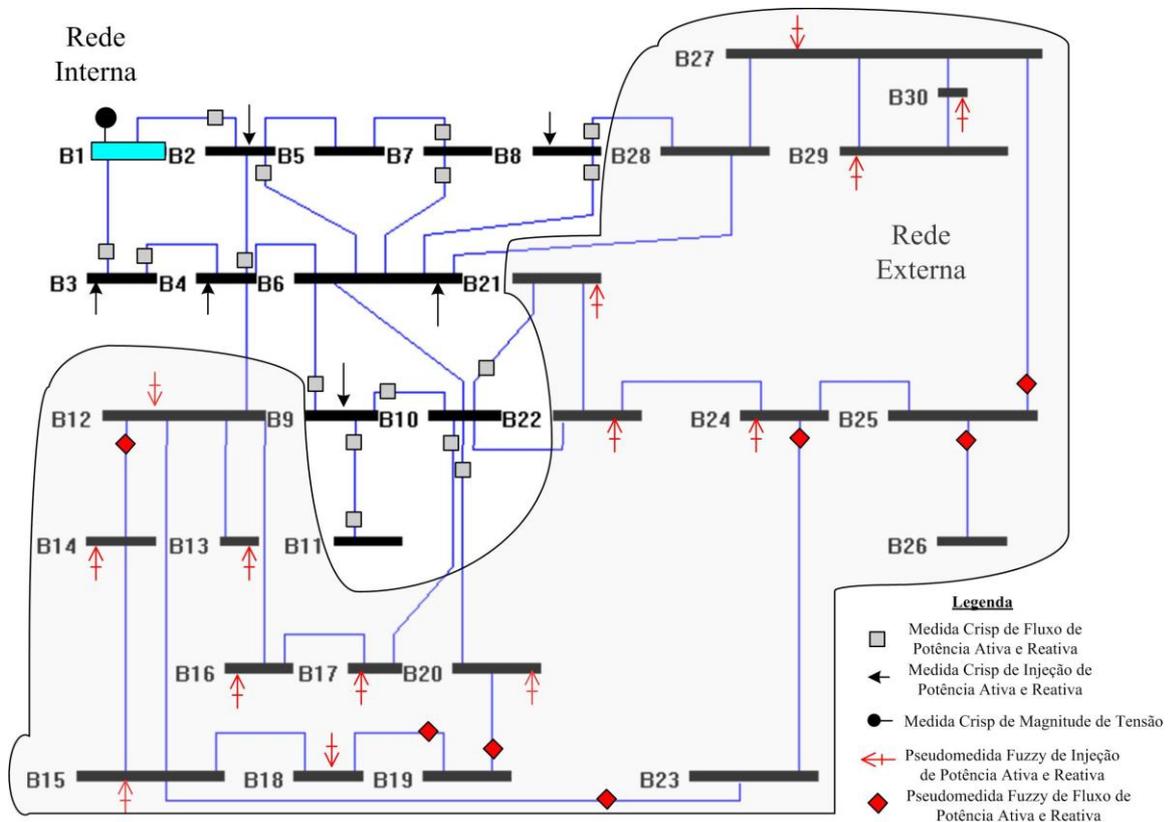


Figura 4.20: Divisão do sistema teste IEEE 30 barras - configuração 1, em rede interna e rede externa, com o plano de medição e pseudo-medidas Fuzzy associadas.

O valor da variância das pseudo-medidas Crisps de injeção e fluxo de potência consideradas nos estimadores de estado MQP e VAPR foi igual a 10.

Na Tabela 4.54, é mostrado o valor central da função de pertinência das pseudo-medidas Fuzzy que consideram a presença de erro grosseiro, e o valor não contaminado, utilizado em um problema de fluxo de potência. O valor do erro grosseiro foi gerado aleatoriamente, com valores de desvio padrão compreendidos entre  $\pm 10\sigma$  e  $\pm 40\sigma$ .

Tabela 4.54: Pseudo-medidas Fuzzy com adição de erros grosseiros ao valor central da sua função de pertinência para o sistema IEEE30 barras – configuração 1.

Pseudo-medida Fuzzy	Valor do Fluxo (p.u.)	Valor com Erro Grosseiro (p.u.)
P <sub>12</sub>	-0.112	-0.0891
Q <sub>12</sub>	-0.075	-0.1029
P <sub>13</sub>	0.370	0.4759
Q <sub>13</sub>	0.2613	0.3476
P <sub>14</sub>	-0.062	-0.0484
Q <sub>14</sub>	-0.016	-0.0138
P <sub>15</sub>	-0.082	-0.1082
Q <sub>15</sub>	-0.025	-0.0318
P <sub>16</sub>	-0.035	-0.0261
Q <sub>16</sub>	-0.018	-0.0149
P <sub>17</sub>	-0.09	-0.1149
Q <sub>17</sub>	-0.058	-0.0720
P <sub>18</sub>	-0.032	-0.0424
Q <sub>18</sub>	-0.009	-0.0067
P <sub>20</sub>	-0.022	-0.0309
Q <sub>20</sub>	-0.007	-0.0060
P <sub>21</sub>	-0.175	-0.2206
Q <sub>21</sub>	-0.112	-0.1311
P <sub>22</sub>	0.2159	0.2460
Q <sub>22</sub>	0.3413	0.2976
P <sub>24</sub>	-0.087	-0.0546
Q <sub>24</sub>	-0.067	-0.0843
P <sub>27</sub>	0.2601	0.2947
Q <sub>27</sub>	0.041	0.0501
P <sub>29</sub>	-0.024	-0.0338
Q <sub>29</sub>	-0.009	-0.0061
P <sub>30</sub>	-0.106	-0.0911
Q <sub>30</sub>	-0.019	-0.0236
P <sub>12-14</sub>	0.0576	0.0504
Q <sub>12-14</sub>	0.0266	0.0217
P <sub>19-20</sub>	-0.0334	-0.0435
Q <sub>19-20</sub>	-0.0298	-0.0208
P <sub>15-23</sub>	-0.0841	-0.0942
Q <sub>15-23</sub>	0.0271	0.0243
P <sub>25-27</sub>	-0.0675	-0.0509
Q <sub>25-27</sub>	0.0015	0.0017
P <sub>25-26</sub>	0.0354	0.0399
Q <sub>25-26</sub>	0.0237	0.0188
P <sub>18-19</sub>	0.0618	0.0491
Q <sub>18-19</sub>	0.0047	0.0041
P <sub>23-24</sub>	0.0751	0.0969
Q <sub>23-24</sub>	-0.0020	-0.0015

A condição inicial, para o problema de programação não linear do estimador de estado PQF, foi valor nulo para os ângulos das tensões, unitário para as magnitudes das tensões, e unitário para a variável lambda,  $\lambda$ . O resultado da estimação das magnitudes e ângulos da tensão, aplicando os estimadores de estado PLFNS, PQF, MQP e VAPR, assim como o resultado obtido pela aplicação do fluxo de potência, são mostrados na Figura 4.21. As piores estimativas para as variáveis de estado dos barramentos da rede interna e principalmente da rede externa foram verificados no estimador de estado MQP. Os estimadores de estado, considerando restrições Fuzzy, produziram boas estimativas para as variáveis de estado da rede interna e externa, tratando satisfatoriamente o problema da imprecisão nos dados da rede externa. As estimativas da magnitude de tensão nos barramentos 25, 26, 27, 29 e 30 são as piores estimativas dos estimadores PQF, PLFNS e VAPR, podendo ser justificadas pelas poucas pseudo-medidas Fuzzy representadas nesta porção da rede externa e o baixo valor das pseudo-medidas Fuzzy de potência reativa.

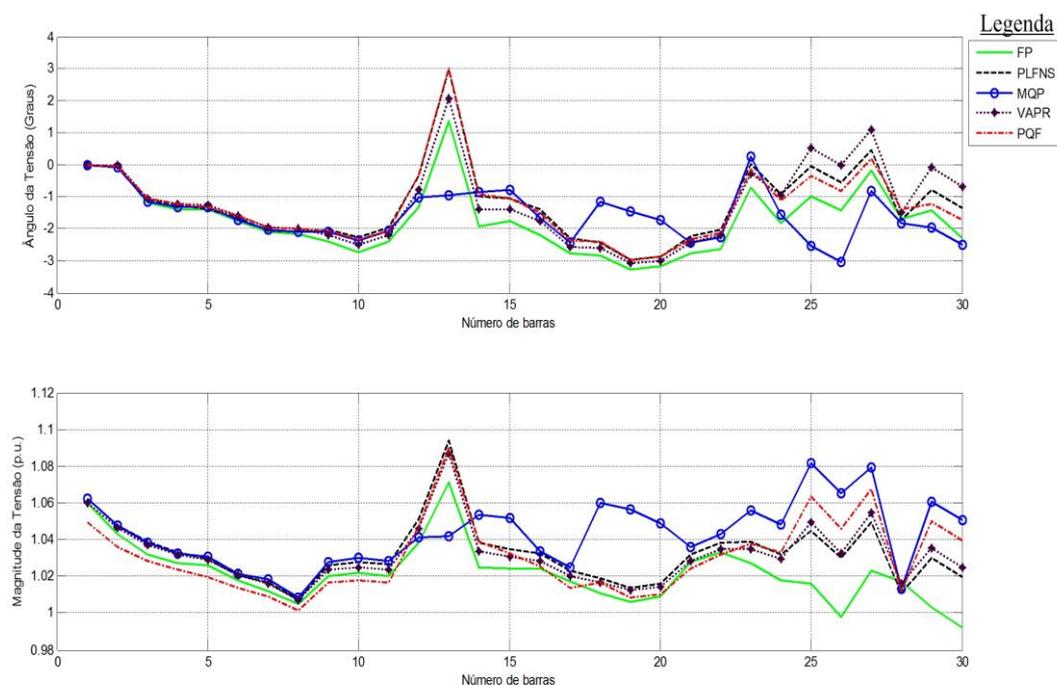


Figura 4.21: Estimativas dos ângulos e magnitudes das tensões nos barramentos para o sistema IEEE 30 barras – configuração 1, dividido em rede interna e rede externa.

O valor do erro médio quadrático ( $EMQ$ ) e o valor do erro absoluto máximo ( $Max(EA)$ ) para as grandezas de interesse são descritos na Tabela 4.55, enquanto, na Figura 4.22, é apresentado o valor dos erros absolutos por barramento do sistema. Os maiores erros foram verificados no estimador de estados MQP, sendo estes bem superiores aos erros dos demais estimadores avaliados. Os estimadores de estado, considerando restrições Fuzzy, apresentaram erros de estimação muito próximos, produzindo estimativas satisfatórias. Somente nos barramentos 25, 26, 27, 29 e 30, não se produziu uma estimativa satisfatória para a variável magnitude da tensão, contudo estes barramentos estão localizados na rede externa. Os valores elevados dos erros absolutos de magnitude de tensão, para os estimadores de estado PQF, PLFNS e VAPR, referem-se aos barramentos 25, 26, 27, 29 e 30, como se observa na Figura 4.22.

Tabela 4.55: Erros de estimação para o sistema IEEE 30 barras – configuração 1, particionado em rede interna e rede externa.

Erros	Estimador PQF	Estimador PLFNS	Estimador MQP	Estimador VAPV
$EMQ_V$	4.1392e-004	1.9949e-004	0.0010	2.1154e-004
$EMQ_\Theta$	0.3159	0.4080	0.7858	0.4503
$EMQ_P$	6.9615e-004	0.0014	0.0056	5.3128e-004
$EMQ_Q$	0.0013	0.0017	0.0051	8.7724e-004
$EMQ_{Pf}$	8.4068e-004	0.0011	0.0057	4.9386e-004
$EMQ_{Qf}$	9.8764e-004	0.0014	0.0041	5.7231e-004
$Max(EA_V)$	0.0480	0.0318	0.0672	0.0347
$Max(EA_\Theta)$	1.6593	1.6266	2.3290	1.6339
$Max(EA_{Pi})$	0.0011	0.0014	0.0036	7.9004e-004
$Max(EA_{Qi})$	0.0011	0.0017	0.0026	8.9089e-004
$Max(EA_{P_f})$	0.0011	0.0011	0.0036	6.0283e-004
$Max(EA_{Q_f})$	0.0013	0.0014	0.0023	8.4534e-004

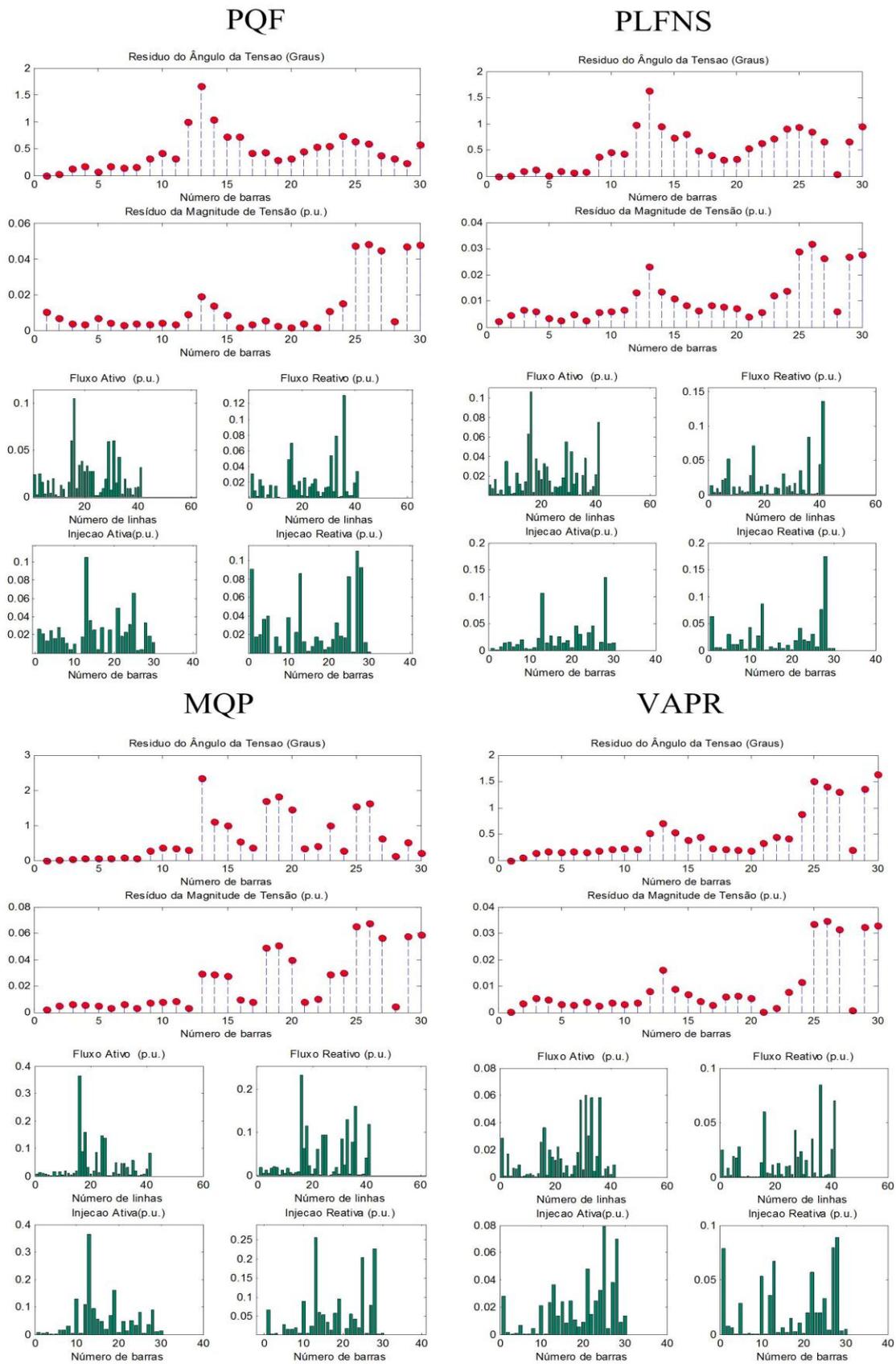


Figura 4.22: Erros absolutos por barramento para o sistema IEEE 30 barras – configuração 1, particionado em rede interna e rede externa.

O resíduo máximo de estimação, a cada iteração, do processo de convergência, para todos os estimadores de estado avaliados, é mostrado na Tabela 4.56. Todos os estimadores de estado apresentaram direção de convergência próximas, apesar do estimador MQP convergir em menor número de iterações. O último problema de programação dos dois estimadores de estado, considerando restrições Fuzzy, apresentou valor da função objetivo convergida igual a 1, indicando que todas as restrições foram atendidas satisfatoriamente. Os valores convergidos para a função objetivo dos estimadores de estado MQP e VAPR foram, respectivamente, 98134 e 125.96.

Tabela 4.56: Convergência dos estimadores de estado.

Iteração	Estimador PQF	Estimador PLFNS	Estimador MQP	Estimador VAPR
1	0.1050	0.1043	0.0796	0.0817
2	0.0202	0.0105	0.0053	0.0132
3	0.0053	0.0008	0.0001	0.0002
4	0.0004	0.0001	-	0.0000
5	0.0000	-	-	-

#### 4.3.4.2.2. Configuração 2

O sistema IEEE 30 barras, dividido em rede interna e duas redes externas, e o conjunto de medidas e pseudo-medidas Fuzzy consideradas, são mostrados na Figura 4.23. A rede interna possui oito pares de medidas de injeção de potência ativa e reativa, dezessete pares de medidas de fluxo de potência ativa e reativa e uma medida de magnitude de tensão, totalizando 51 medidas. A redundância da rede interna é igual a 1.545. Na rede externa 1, foram representadas seis pares de pseudo-medidas Fuzzy de injeção de potência ativa e reativa e duas medidas de magnitude de tensão. Na rede externa 2, foram representados dois pares de pseudo-medidas Fuzzy de injeção de potência ativa e reativa, três pares de pseudo-medidas Fuzzy de fluxo de potência ativa e reativa, três pseudo-medidas Fuzzy de magnitude de tensão e duas medidas virtuais de injeção de

potência ativa e reativa. A soma das medidas e pseudo-medidas Fuzzy representadas é igual a 82, resultando em uma redundância total para o sistema IEEE30 barras igual a 1.3898. A baixa redundância do sistema tem o propósito de avaliar os estimadores de estado testados em uma situação crítica de observabilidade. A utilização de medidas virtuais de injeção nula na rede externa foi possível, uma vez que os barramentos 7 e 11 são barramentos com injeção nula de potência. A utilização das pseudo-medidas virtuais de injeção nula segue a idéia proposta em (LIN, 1996), embora a mesma tenha sido aplicada para a solução do problema de representação da rede externa. As medidas virtuais de injeção nula de potência são representadas nos estimadores, considerando restrições Fuzzy, como restrições de igualdade do problema. Nos estimadores de estado MQP e VAPR, adotou-se para as medidas virtuais um baixo valor de variância, igual a 0.0001.

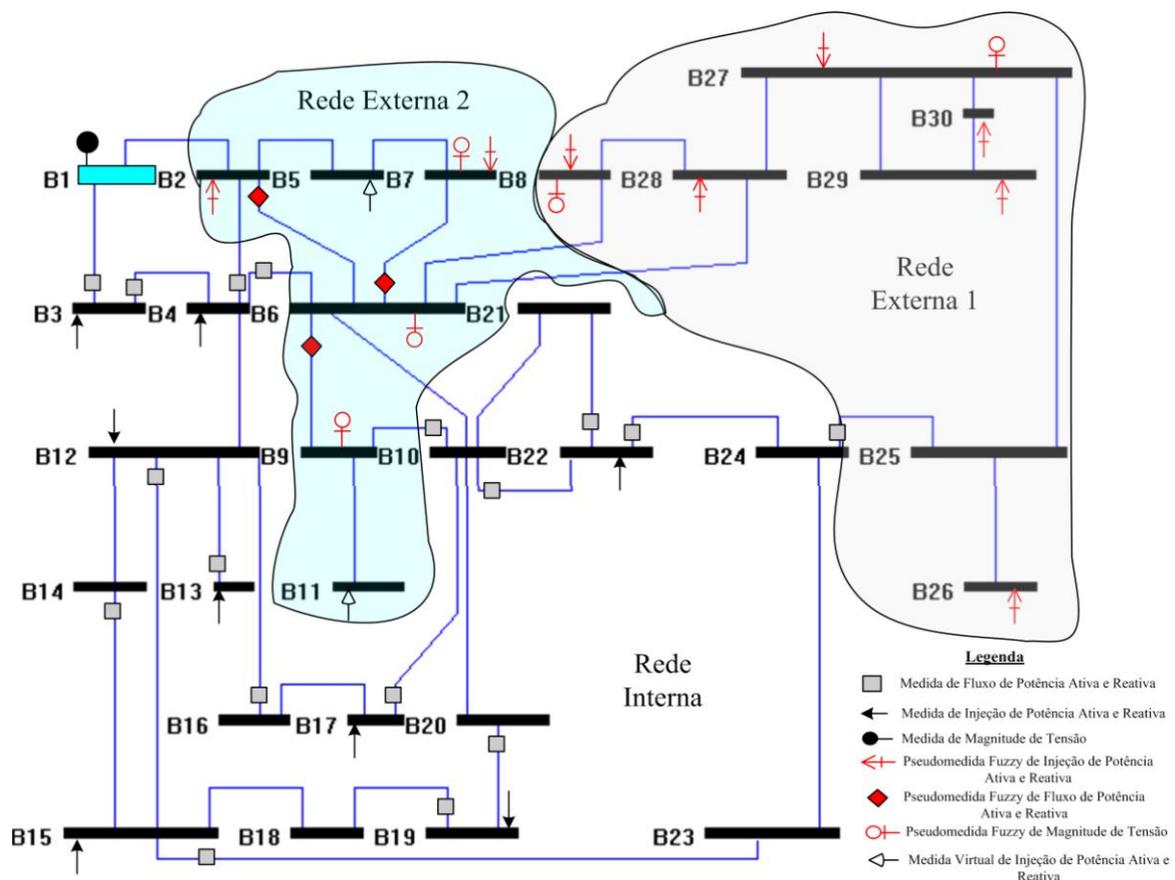


Figura 4.23: Divisão do sistema teste IEEE 30 barras - configuração 2, em rede interna e duas redes externas, com o plano de medição e pseudo-medidas Fuzzy associadas.

Na Tabela 4.57, é mostrado o valor central da função de pertinência das pseudo-medidas Fuzzy com adição de erro grosseiro, e o valor não contaminado, utilizado em um problema de fluxo de potência. O valor do erro grosseiro foi gerado aleatoriamente, com valores de desvio padrão compreendidos entre  $\pm 10\sigma$  e  $\pm 40\sigma$  para pseudo-medidas Fuzzy de potência e valor máximo de  $\pm 10\sigma$  para pseudo-medidas Fuzzy de magnitude de tensão.

Tabela 4.57: Pseudo-medidas Fuzzy com adição de erros grosseiros ao valor central da sua função de pertinência para o sistema IEEE30 barras – configuração 2.

<b>Pseudo-medida</b>	<b>Valor para o Fluxo de Potência (p.u.)</b>	<b>Valor com Erro Grosseiro (p.u.)</b>
<b>P<sub>2</sub></b>	0.1830	0.1330
<b>Q<sub>2</sub></b>	0.3668	0.4423
<b>P<sub>7</sub></b>	-0.2280	-0.1820
<b>Q<sub>7</sub></b>	-0.1090	-0.0821
<b>P<sub>8</sub></b>	-0.3000	-0.4120
<b>Q<sub>8</sub></b>	-0.0416	-0.038
<b>P<sub>26</sub></b>	-0.035	-0.039
<b>Q<sub>26</sub></b>	-0.023	-0.018
<b>P<sub>27</sub></b>	0.2601	0.312
<b>Q<sub>27</sub></b>	0.041	0.044
<b>P<sub>28</sub></b>	0.0	0.050
<b>Q<sub>28</sub></b>	0.0	0.050
<b>P<sub>29</sub></b>	-0.024	-0.019
<b>Q<sub>29</sub></b>	-0.009	-0.073
<b>P<sub>30</sub></b>	-0.106	-0.135
<b>Q<sub>30</sub></b>	-0.019	-0.015
<b>P<sub>2-6</sub></b>	0.2019	0.160
<b>Q<sub>2-6</sub></b>	0.0721	0.058
<b>P<sub>6-7</sub></b>	0.0928	0.0783
<b>Q<sub>6-7</sub></b>	0.0298	0.0313
<b>P<sub>6-9</sub></b>	0.0549	0.0486
<b>Q<sub>6-9</sub></b>	-0.0138	-0.0106
<b>V<sub>6</sub></b>	1.018	1.0018
<b>V<sub>7</sub></b>	1.012	1.0231
<b>V<sub>8</sub></b>	1.005	1.0150
<b>V<sub>9</sub></b>	1.02	1.0472
<b>V<sub>27</sub></b>	1.023	1.0112

O valor da variância das pseudo-medidas Crisps de injeção, fluxo de potência e magnitude de tensão consideradas nos estimadores MQP e VAPR foram iguais a 10.

A condição inicial para o problema de programação não linear do estimador de estado PQF, foi valores da magnitude e ângulo da tensão iguais aos resíduos obtidos na convergência do segundo problema de programação quadrática do estimador de estado PQF, enquanto para a variável  $\lambda$ , foi unitário. O resultado da estimação de estado e do fluxo de potência é mostrado na Figura 4.24. Os estimadores de estado, considerando restrições Fuzzy, produziram boas estimativas para as variáveis de estado da rede interna e redes externas, representando satisfatoriamente todas as redes. Os erros grosseiros adicionados às pseudo-medidas das redes externas, não deterioraram o resultado da estimação para a rede interna, em todos os estimadores avaliados. Entretanto, em algumas barras da rede interna, verifica-se um maior erro de estimação para o ângulo da tensão.

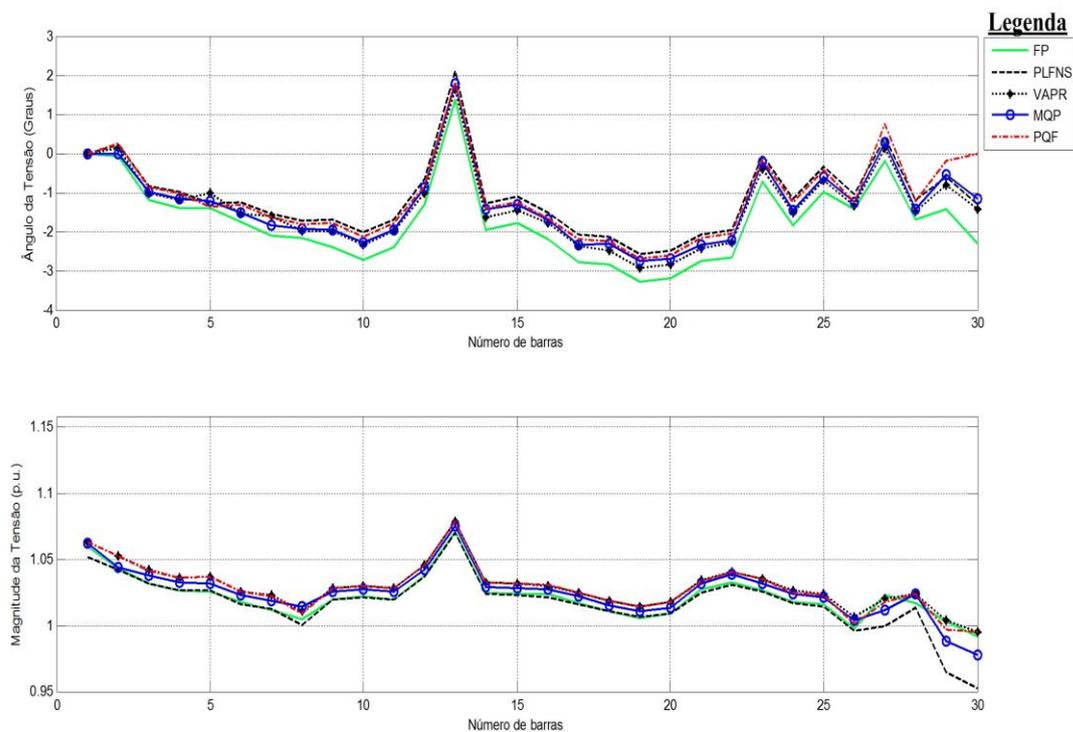


Figura 4.24: Estimativas dos ângulos e magnitudes das tensões nos barramentos para o sistema IEEE 30 barras – configuração 2, dividido em rede interna e duas redes externas.

O valor do erro médio quadrático ( $EMQ$ ) e o valor do erro absoluto máximo ( $Max(EA)$ ) para as grandezas de interesse são descritos na Tabela 4.58, enquanto na Figura 4.25 é apresentado o valor dos erros absolutos por barramento do sistema. Os estimadores de estado, considerando restrições Fuzzy, apresentaram erros de estimação muito próximos, com melhor estimativa verificada no estimador de estados VAPR. Os maiores erros absolutos, para as variáveis de estado em todos os estimadores avaliados, de acordo com a Figura 4.25, foram verificados nos barramentos 27, 29 e 30 da rede externa 1.

Tabela 4.58: Erros de estimação para o sistema IEEE 30 barras – configuração 2, particionado em rede interna e duas redes externas.

<b>Erros</b>	<b>Estimador PQF</b>	<b>Estimador PLFNS</b>	<b>Estimador MQP</b>	<b>Estimador VAPV</b>
$EMQ_V$	5.8490e-005	1.2015e-004	4.4325e-005	7.8967e-006
$EMQ_\Theta$	0.4775	0.3926	0.2127	0.1271
$EMQ_P$	0.0016	0.0013	2.6833e-004	8.4937e-004
$EMQ_Q$	6.4746e-004	7.3125e-004	0.0016	5.8247e-004
$EMQ_{Pf}$	6.7399e-004	6.2649e-004	1.1636e-004	3.9609e-004
$EMQ_{Qf}$	3.9432e-004	5.1920e-004	6.3013e-004	2.4999e-004
$Max(EA_V)$	0.0110	0.0389	0.0143	0.0103
$Max(EA_\Theta)$	2.2869	1.0086	1.1462	0.8899
$Max(EA_{P_i})$	0.0014	0.0015	5.4618e-004	9.3899e-004
$Max(EA_{Q_i})$	9.6862e-004	0.0012	0.0017	0.0012
$Max(EA_{P_{ij}})$	0.0012	0.0012	2.7302e-004	9.0407e-004
$Max(EA_{Q_{ij}})$	7.1716e-004	8.0659e-004	0.0012	5.8220e-004

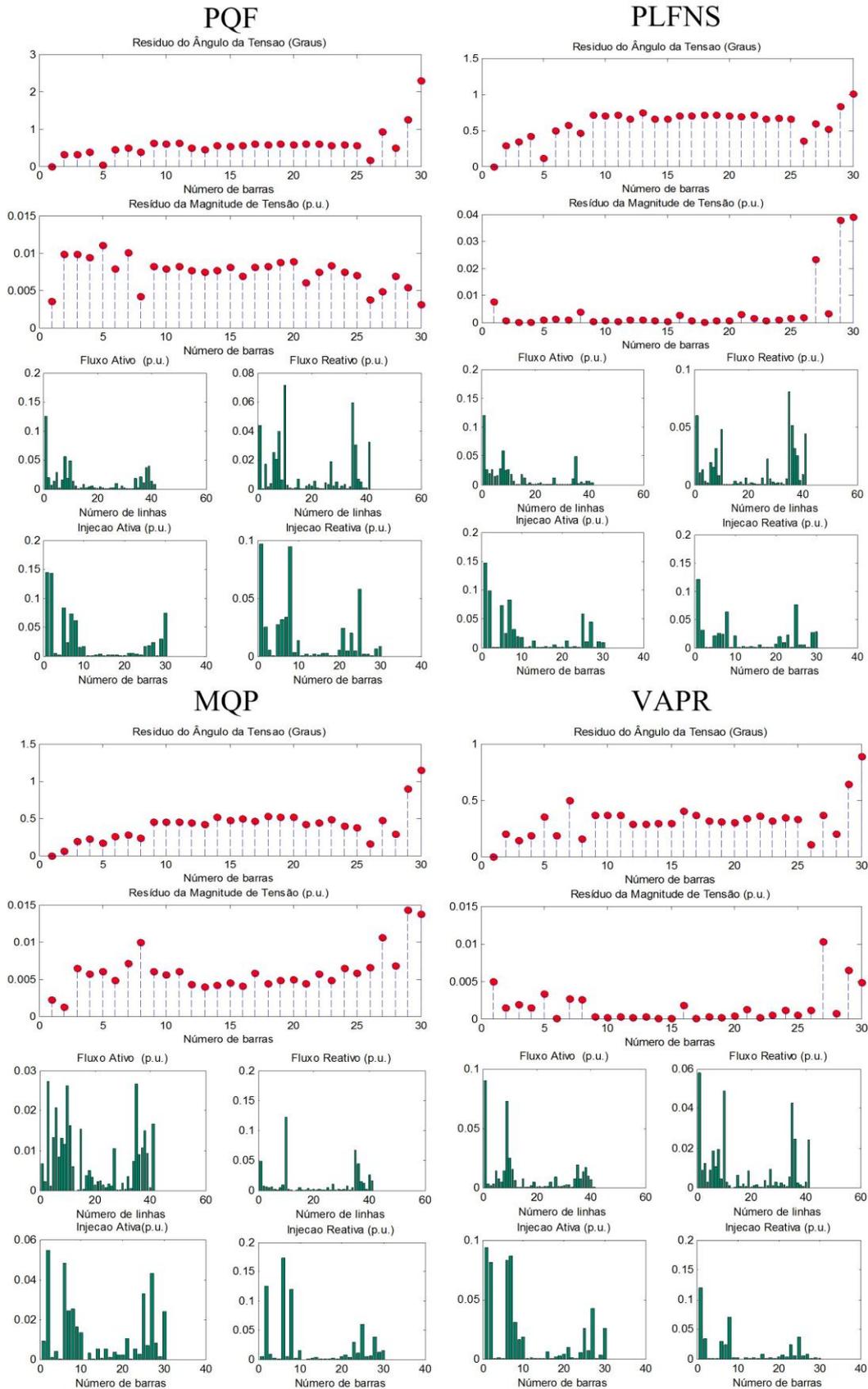


Figura 4.25: Erros absolutos por barramento para o sistema IEEE 30 barras – configuração 2, particionado em rede interna e duas redes externas.

O resíduo máximo de estimação, a cada iteração do processo de convergência, para todos os estimadores de estado avaliados, é mostrado na Tabela 4.59. Todos os estimadores de estado apresentaram direção de convergência semelhantes, apesar do estimador MQP convergir em menor número de iterações. O último problema de programação do estimador de estado PQF apresentou valor da função objetivo convergida igual a 1, indicando que todas as restrições foram atendidas satisfatoriamente, enquanto o valor convergido da função objetivo do estimador PLFNS foi igual a 0.99693, indicando que nem todas as restrições foram totalmente atendidas. Os valores convergidos para a função objetivo dos estimadores MQP e VAPR foram, respectivamente, 8.1101 e 0.27645.

Tabela 4.59: Convergência dos estimadores de estado.

Iteração	Estimador PQF	Estimador PLFNS	Estimador MQP	Estimador VAPR
1	0.0722	0.0726	0.0784	0.0742
2	0.0084	0.0066	0.0039	0.0038
3	0.0018	0.0001	0.0000	0.0044
4	0.0006	0.0000	-	0.0000
5	0.0001	-	-	-

#### 4.3.4.3. IEEE 118 Barras

O sistema IEEE 118 barras, dividido em rede interna e duas redes externas e o conjunto de medidas e pseudo-medidas Fuzzy, são mostrados na Figura 4.26. A rede interna possui 21 pares de medidas de injeção de potência ativa e reativa, 61 pares de medidas de fluxo de potência ativa e reativa e 3 medidas de magnitude de tensão, totalizando 164 medidas. A redundância da rede interna é igual a 1.21. Na rede externa 1, foram representados 13 pares de pseudo-medidas Fuzzy de injeção de potência ativa e reativa e 17 pares de pseudo-medidas Fuzzy de fluxo de potência ativa e reativa, com um total de 60 pseudo-medidas Fuzzy distintas. Na rede externa 2, foram representados 19

pares de pseudo-medidas Fuzzy de injeção de potência ativa e reativa, 9 pares de pseudo-medidas Fuzzy de fluxo de potência ativa e reativa, e 3 medidas virtuais de injeção de potência ativa e reativa, totalizando 59 pseudo-medidas Fuzzy. A soma total de todas as medidas e pseudo-medidas Fuzzy representadas é igual a 283, resultando em uma redundância total para o sistema IEEE118 barras igual a 1.204. A baixa redundância do sistema tem o propósito de avaliar os estimadores de estado em uma situação crítica de observabilidade.

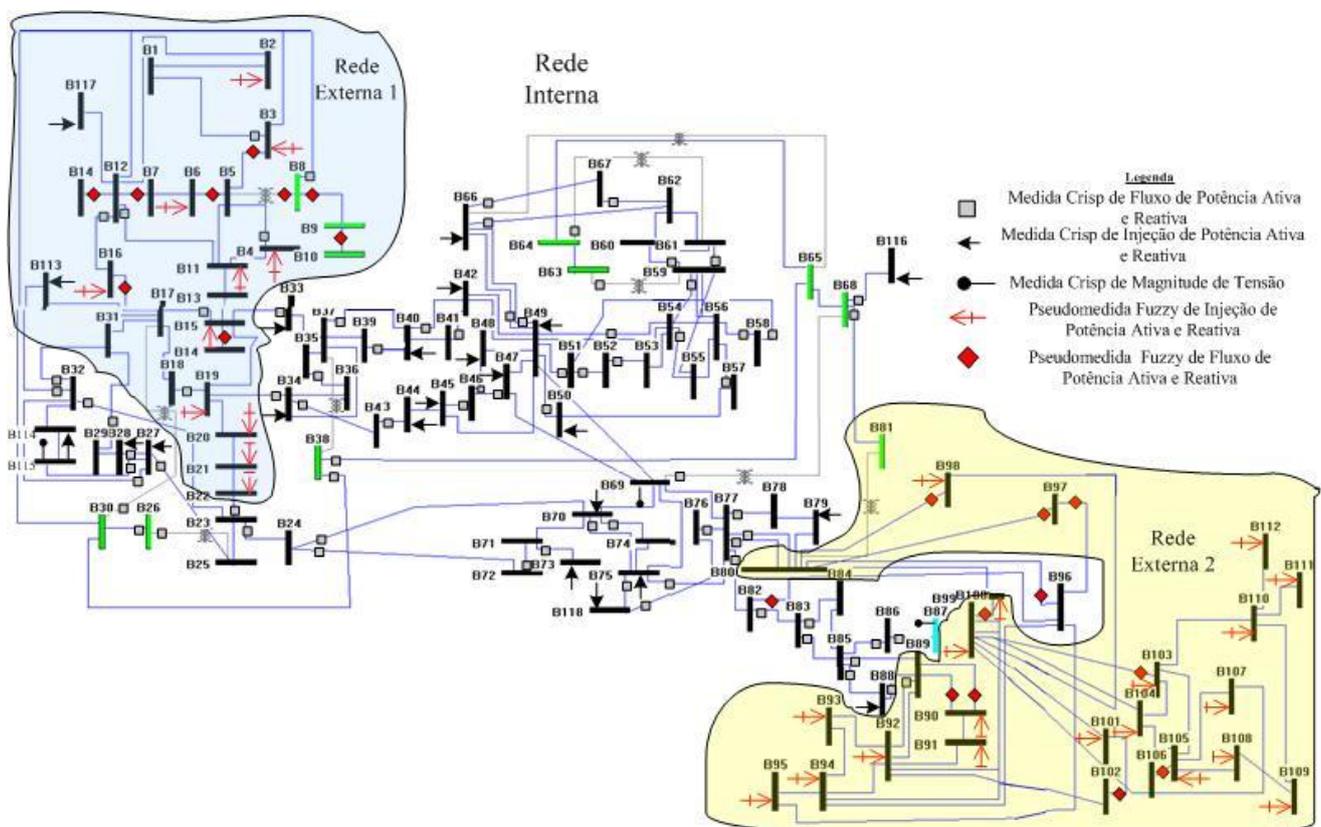


Figura 4.26: Divisão do sistema teste IEEE 118 barras, em rede interna e duas redes externas, com o plano de medição e pseudo-medidas Fuzzy associadas.

No teste realizado, os seguintes valores de erros grosseiros foram adicionados ao valor do fluxo de potência, para composição do valor central da função de pertinência das pseudo-medidas Fuzzy de potência:  $\pm 10\sigma$ ,  $\pm 20\sigma$ ,  $\pm 30\sigma$  e  $\pm 40\sigma$ . As pseudo-medidas Fuzzy

de potência foram agrupadas de acordo com o valor do erro grosseiro adicionado ao valor central das mesmas, seguindo o seguinte princípio:

- 23% das pseudo-medidas Fuzzy de potência recebem desvio padrão igual a  $\pm 30\sigma$ ;
- 27% das pseudo-medidas Fuzzy de potência recebem desvio padrão igual a  $\pm 20\sigma$ ;
- 30% das pseudo-medidas Fuzzy de potência recebem desvio padrão igual a  $\pm 10\sigma$ .

A Tabela 4.60 mostra o valor do desvio padrão adicionado ao valor do fluxo de potência para composição do valor central da função de pertinência das pseudo-medidas Fuzzy consideradas. Na Tabela 4.61, é mostrado o valor central da função de pertinência das pseudo-medidas Fuzzy, com adição de erro grosseiro, de acordo com a Tabela 4.60; e o valor não contaminado, utilizado em um problema de fluxo de potência. O resultado do fluxo de potência, para este sistema, é mostrado no Apêndice B, item B.3.

Tabela 4.60: Valor do desvio padrão adicionado ao valor central de cada pseudo-medidas Fuzzy representada no sistema IEEE118 barras.

Pseudo-medida Fuzzy		Erro Grosseiro adicionado ao valor central (valor do fluxo de potência), em desvios padrão
Rede Externa 1	Rede Externa 2	
P <sub>13</sub> , P <sub>8-9</sub> , P <sub>15-17</sub> , Q <sub>13</sub> , Q <sub>15-17</sub> , Q <sub>8-9</sub> ,	P <sub>90</sub> , P <sub>91</sub> , P <sub>89-90</sub> , Q <sub>90</sub> , Q <sub>91</sub> , Q <sub>89-90</sub> ,	$\pm 40\sigma$
P <sub>16</sub> , P <sub>21</sub> , P <sub>117</sub> , P <sub>5-8</sub> , P <sub>5-6</sub> , P <sub>1-3</sub> , P <sub>3-5</sub> , Q <sub>16</sub> , Q <sub>21</sub> , Q <sub>117</sub> , Q <sub>5-8</sub> , Q <sub>3-5</sub> , Q <sub>1-3</sub> , Q <sub>5-6</sub>	P <sub>110</sub> , P <sub>111</sub> , P <sub>112</sub> , P <sub>102-104</sub> , P <sub>103-89</sub> , P <sub>100-89</sub> , P <sub>92-104</sub> , Q <sub>110</sub> , Q <sub>111</sub> , Q <sub>112</sub> , Q <sub>92-104</sub> , Q <sub>100-89</sub> , Q <sub>102-104</sub> , Q <sub>103-89</sub>	$\pm 30\sigma$
P <sub>16-17</sub> , P <sub>18-19</sub> , P <sub>4-5</sub> , P <sub>12-7</sub> , P <sub>12-11</sub> , P <sub>8-9</sub> , P <sub>4</sub> , P <sub>11</sub> , Q <sub>16-17</sub> , Q <sub>18-19</sub> , Q <sub>4-5</sub> , Q <sub>12-7</sub> , Q <sub>12-11</sub> , Q <sub>8-9</sub> , Q <sub>4</sub> , Q <sub>11</sub>	P <sub>101</sub> , P <sub>103</sub> , P <sub>105</sub> , P <sub>107</sub> , P <sub>108</sub> , P <sub>109</sub> , P <sub>99-103</sub> , P <sub>98-99</sub> , Q <sub>101</sub> , Q <sub>103</sub> , Q <sub>105</sub> , Q <sub>107</sub> , Q <sub>108</sub> , Q <sub>109</sub> , Q <sub>99-13</sub> , Q <sub>98-99</sub>	$\pm 20\sigma$
P <sub>2</sub> , P <sub>15</sub> , P <sub>22</sub> , P <sub>12-4</sub> , P <sub>12-16</sub> , P <sub>14-15</sub> , P <sub>14</sub> , P <sub>20</sub> , P <sub>14-12</sub> , Q <sub>2</sub> , Q <sub>15</sub> , Q <sub>22</sub> , Q <sub>12-4</sub> , Q <sub>12-16</sub> , Q <sub>14-15</sub> , Q <sub>14</sub> , Q <sub>20</sub> , Q <sub>14-12</sub>	P <sub>90</sub> , P <sub>91</sub> , P <sub>92</sub> , P <sub>93</sub> , P <sub>94</sub> , P <sub>95</sub> , P <sub>100</sub> , P <sub>104</sub> , Q <sub>90</sub> , Q <sub>91</sub> , Q <sub>92</sub> , Q <sub>93</sub> , Q <sub>94</sub> , Q <sub>95</sub> , Q <sub>100</sub> , Q <sub>104</sub>	$\pm 10\sigma$

Tabela 4.61: Pseudo-medidas Fuzzy com adição de erros grosseiros ao valor central da sua função de pertinência para o sistema IEEE118 barras

Pseudo-medida	Valor com erro grosseiro (p.u.)	Pseudo-medida	Valor com erro grosseiro (p.u.)	Pseudo-medida	Valor com erro grosseiro (p.u.)
P <sub>13</sub>	0.025	P <sub>15</sub>	0.030	P <sub>99-103</sub>	0,2356
P <sub>8-9</sub>	0.1242	P <sub>22</sub>	-0,13	P <sub>98-99</sub>	0,3156
P <sub>15-17</sub>	0.040	P <sub>12-4</sub>	-0,2052	Q <sub>101</sub>	0.9696
Q <sub>13</sub>	0.025	P <sub>12-16</sub>	-0,0886	Q <sub>103</sub>	0.020
Q <sub>15-17</sub>	0.040	P <sub>14-15</sub>	0.025	Q <sub>105</sub>	-0.2713
Q <sub>8-9</sub>	0.060	P <sub>14</sub>	0.020	Q <sub>108</sub>	-0.0653
P <sub>16</sub>	-0.3250	P <sub>20</sub>	-0,18	Q <sub>109</sub>	-0.0120
P <sub>21</sub>	-0.1820	P <sub>14-12</sub>	-0,1652	Q <sub>99-13</sub>	0,1310
P <sub>117</sub>	-0.2600	Q <sub>2</sub>	0.030	Q <sub>107</sub>	0.020
P <sub>5-8</sub>	1.1543	Q <sub>15</sub>	0.030	Q <sub>98-99</sub>	0.137
P <sub>5-6</sub>	0.030	Q <sub>22</sub>	0.030	P <sub>90</sub>	-1.7930
P <sub>1-3</sub>	0.030	Q <sub>12-4</sub>	0.030	P <sub>91</sub>	-0.1100
P <sub>3-5</sub>	-0.8871	Q <sub>12-16</sub>	-0,0776	P <sub>92</sub>	-0.7150
Q <sub>16</sub>	0.020	Q <sub>14-12</sub>	-0,0565	P <sub>93</sub>	-0.1320
Q <sub>21</sub>	-0,17	P <sub>90</sub>	-1,943	P <sub>94</sub>	-0.3300
Q <sub>117</sub>	-0,08	P <sub>91</sub>	0,125	P <sub>95</sub>	-0.4620
Q <sub>5-8</sub>	-0.030	P <sub>89-90</sub>	-0.020	P <sub>100</sub>	2.3650
Q <sub>3-5</sub>	-0.1797	Q <sub>90</sub>	-0.0650	P <sub>104</sub>	-0.4180
Q <sub>1-3</sub>	0,1337	Q <sub>91</sub>	0.1904	Q <sub>92</sub>	-0.1440
Q <sub>5-6</sub>	0.0311	Q <sub>89-90</sub>	0.020	Q <sub>93</sub>	-0.2634
P <sub>16-17</sub>	0,1338	P <sub>110</sub>	-0.5070	Q <sub>94</sub>	-0.0770
P <sub>18-19</sub>	-0,2141	P <sub>111</sub>	0.4680	Q <sub>95</sub>	-0.1760
P <sub>4-5</sub>	-1,0661	P <sub>112</sub>	-0.8840	Q <sub>100</sub>	-0.1929
P <sub>12-7</sub>	0,1977	P <sub>102-104</sub>	-0,7121		
P <sub>12-11</sub>	-0,2846	P <sub>103-89</sub>	0,4128		
P <sub>8-9</sub>	0.037	P <sub>100-89</sub>	0,2395		
P <sub>4</sub>	-0.4680	P <sub>92-104</sub>	0,3895		
P <sub>11</sub>	-0.8400	Q <sub>110</sub>	-0.0260		
Q <sub>16-17</sub>	-0,0379	Q <sub>111</sub>	-0.0239		
Q <sub>18-19</sub>	-0,1552	Q <sub>112</sub>	0.3706		
Q <sub>4-5</sub>	-0,1247	Q <sub>92-104</sub>	-0.1092		
Q <sub>12-7</sub>	-0,0527	Q <sub>100-89</sub>	0,1895		
Q <sub>12-11</sub>	0,4018	Q <sub>102-104</sub>	-0,1521		
Q <sub>4</sub>	0.030	Q <sub>103-89</sub>	0,1128		
Q <sub>11</sub>	0.030	P <sub>101</sub>	-0.2640		
P <sub>2</sub>	0.030	P <sub>103</sub>	0.020		
Q <sub>14-15</sub>	0.025	P <sub>105</sub>	0.020		
Q <sub>14</sub>	0.030	P <sub>107</sub>	-0.6000		
Q <sub>20</sub>	-0.027	P <sub>108</sub>	-0.0240		
Q <sub>104</sub>	0.010	P <sub>109</sub>	-0.0960		

A modelagem das funções de pertinência das pseudo-medidas Fuzzy considerou um comprimento fixo para a faixa de pertinência unitária da função de pertinência trapezoidal, definida em  $p$ , igual a 25% do valor central da mesma, enquanto o decréscimo de pertinência, definido em  $d$ , ocorre para variações fixas iguais a 15% do valor central.

O valor do desvio padrão considerado para cada medida foi definido no item (4.2.1). O valor da variância das pseudo-medidas Crisp de injeção e fluxo de potência, consideradas nos estimadores de estado MQP e VAPR, foi igual a 10.

A condição inicial, para o problema de programação não linear do estimador de estado PQF, foi valores da magnitude e ângulo da tensão iguais aos resíduos obtidos na convergência do segundo problema de programação quadrática do estimador de estado PQF, enquanto para a variável lambda,  $\lambda$ , foi unitário. O resultado da estimação das magnitudes e ângulos da tensão, aplicando os estimadores de estado PLFNS, PQF, MQP e VAPR, assim como o resultado obtido pela aplicação do fluxo de potência, são mostrados na Figura 4.27. Os estimadores de estado, considerando restrições Fuzzy, e principalmente o estimador PLFNS, produziram boas estimativas para as variáveis de estado da rede interna e redes externas, representando satisfatoriamente todas as redes. As piores estimativas das variáveis de estado obtidas para a rede interna, com maior discrepância do valor do fluxo de potência, podem se justificar pela baixa redundância de medidores nesta rede, e não pela incerteza refletida no valor central das pseudo-medidas Fuzzy, localizadas nas redes elétricas externas.

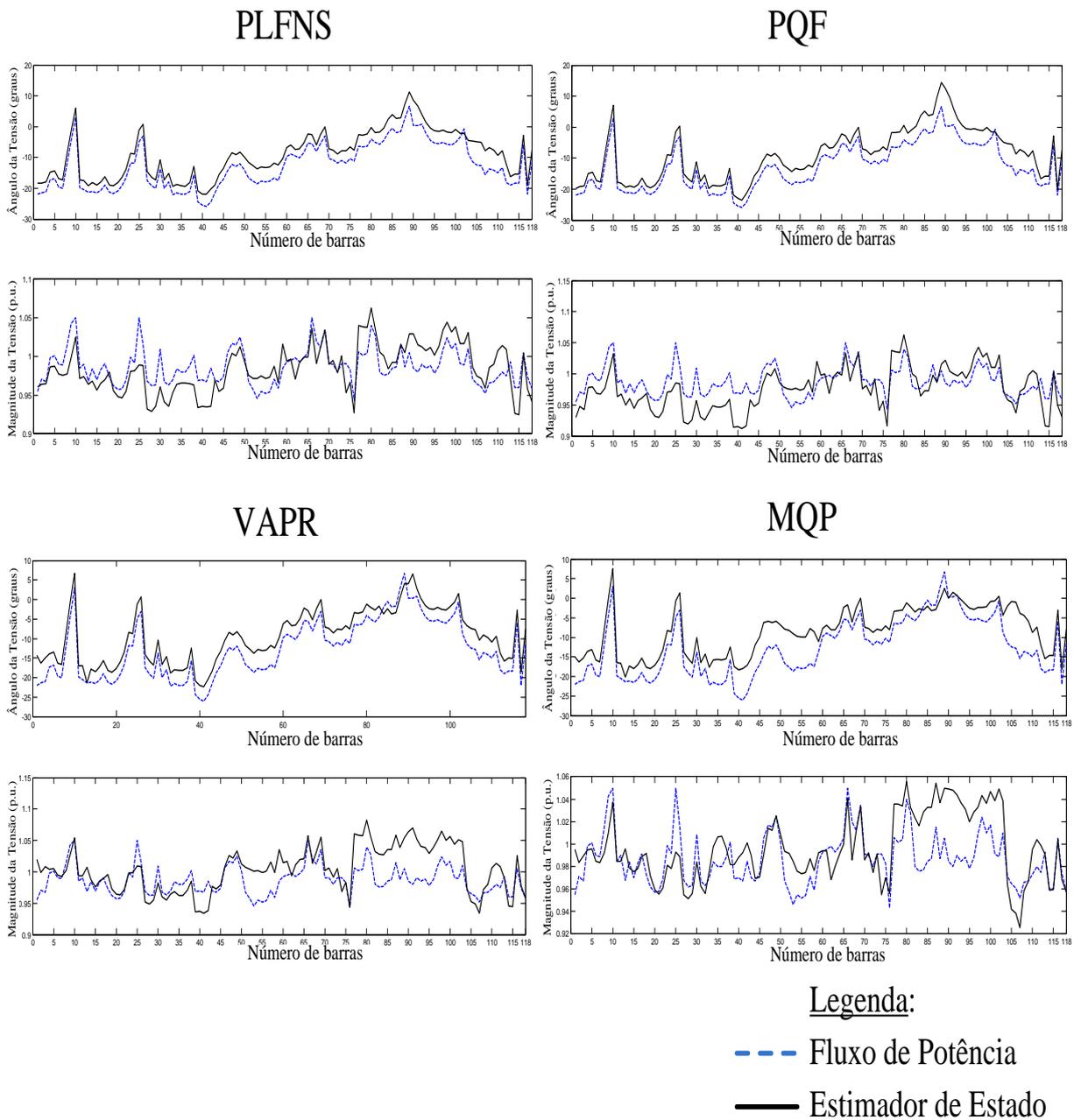


Figura 4.27: Estimativas dos ângulos e magnitudes das tensões nos barramentos para o sistema IEEE 118 barras.

O valor do erro médio quadrático ( $EMQ$ ) e o valor do erro absoluto máximo ( $Max(EA)$ ) para a rede externa 1 e 2, são descritos nas Tabelas 4.62 e 4.63. O propósito de se analisar os resíduos de estimação para as redes externas, e não para a rede interna, é averiguar a capacidade de representação do estado operacional da rede externa, a partir das pseudo-medidas Fuzzy representadas nestas redes.

Tabela 4.62: Erros de estimação para a rede externa 1 do sistema IEEE 118 barras.

Erros	Estimador PQF	Estimador PLFNS	Estimador MQP	Estimador VAPV
EMQ <sub>V</sub>	0.0002	0.0003	0.0002	0.0004
EMQ <sub>Θ</sub>	10.2529	7.9350	16.1589	14.0328
EMQ <sub>P</sub>	0.1114	0.1513	0.2039	0.3569
EMQ <sub>Q</sub>	0.4694	0.5231	0.4945	0.5318
EMQ <sub>Pf</sub>	0.2208	0.2240	0.2381	0.2251
EMQ <sub>Qf</sub>	0.0574	0.0562	0.0491	0.0542
Max(EA <sub>V</sub> )	0.0349	0.0439	0.0401	0.0648
Max(EA <sub>Θ</sub> )	4.0284	3.5328	7.0627	7.7449
Max(EA <sub>Pi</sub> )	0.0055	0.0067	0.0096	0.0131
Max(EA <sub>Qi</sub> )	0.0112	0.0118	0.0095	0.0091
Max( $EA_{P_{ij}}$ )	0.0077	0.0076	0.0072	0.0076
Max( $EA_{Q_{ij}}$ )	0.0042	0.0043	0.0044	0.0042

Tabela 4.63: Erros de estimação para a rede externa 2 do sistema IEEE 118 barras.

Erros	Estimador PQF	Estimador PLFNS	Estimador MQP	Estimador VAPV
EMQ <sub>V</sub>	0.0010	0.0006	0.0014	0.0021
EMQ <sub>Θ</sub>	28.8443	28.0705	35.0571	14.2062
EMQ <sub>P</sub>	0.6125	0.6275	0.5856	0.4529
EMQ <sub>Q</sub>	0.0761	0.0789	0.3162	0.1415
EMQ <sub>Pf</sub>	0.0216	0.0208	0.0383	0.0091
EMQ <sub>Qf</sub>	0.0043	0.0042	0.0122	0.0047
Max(EA <sub>V</sub> )	0.0329	0.0446	0.0680	0.0898
Max(EA <sub>Θ</sub> )	12.2183	8.3332	11.7194	6.2926
Max(EA <sub>Pi</sub> )	0.0179	0.0179	0.0181	0.0127
Max(EA <sub>Qi</sub> )	0.0059	0.0059	0.0142	0.0094
Max( $EA_{P_{ij}}$ )	0.0038	0.0038	0.0050	0.0030
Max( $EA_{Q_{ij}}$ )	0.0015	0.0015	0.0020	0.0015

Analisando os erros mostrados nas Tabelas 4.62 e 4.63, verificam-se melhores estimativas para a rede externa 1 em comparação com a rede externa 2 em todos os estimadores. As melhores estimativas para a rede externa 1 podem ser, em parte, justificadas pela representação de um maior número de pseudo-medidas Fuzzy de fluxo de potência. A representação de medidas virtuais na rede externa 2 também não se mostrou

uma alternativa tão eficaz, como foi verificado anteriormente na simulação com o sistema de 30 barras do IEEE. Os estimadores de estado, considerando restrições Fuzzy, apresentaram erros de estimação muito próximos, com estimativas superiores àquelas verificadas no estimador de estado MQP, e no estimador VAPR para a rede externa 1. Contudo, verificam-se em algumas barras de ambas as redes externas, erros elevados nas estimativas das magnitudes e ângulos da tensão, conforme mostrado pode ser comprovado na Figura 4.27.

O resíduo máximo de estimação, a cada iteração do processo de convergência, para todos os estimadores de estado avaliados, é mostrado na Tabela 4.64. Todos os estimadores de estado apresentaram direção de convergência semelhantes, apesar do estimador MQP convergir em menor número de iterações. Apesar do estimador de estado PQF convergir em cinco iterações, este demandou uma carga computacional superior aos demais, fato verificado na resolução do problema de programação não linear existente em seu modelo. O último problema de programação dos estimadores de estado PQF e PLFNS apresentou valor da função objetivo convergida igual a 1, indicando que todas as restrições foram atendidas satisfatoriamente. Os valores convergidos para a função objetivo dos estimadores MQP e VAPR foram, respectivamente, 39.331 e 21.9645.

Tabela 4.64: Convergência dos estimadores de estado.

<b>Iteração</b>	<b>Estimador PQF</b>	<b>Estimador PLFNS</b>	<b>Estimador MQP</b>	<b>Estimador VAPR</b>
1	0.0722	0.0726	0.0784	0.0742
2	0.0084	0.0066	0.0039	0.0038
3	0.0018	0.0001	0.0000	0.0044
4	0.0006	0.0000	-	0.0000
5	0.0001	-	-	-

---

---

# CAPÍTULO 5

---

## CONCLUSÕES

---

### 5.1 CONCLUSÕES GERAIS

A principal contribuição deste trabalho é a representação de informações qualitativas imprecisas em um problema de estimação de estado em sistemas elétricos de potência, utilizando os conceitos de conjuntos Fuzzy. Para o sucesso desta metodologia, diferentes modelos de estimação de estado híbridos, em um ambiente Fuzzy, foram desenvolvidos baseados na utilização de conceitos de programação Fuzzy, que resultaram em modelos lineares e não lineares para a solução do problema de cálculo do vetor de estado do sistema. As seguintes formulações de estimadores de estado em um ambiente Fuzzy foram desenvolvidas:

- Estimador de estado baseado em programação linear Fuzzy com função objetivo simétrica (PLFS);
- Estimador de estado baseado em programação linear Fuzzy com função objetivo não-simétrica (PLFNS);
- Estimador de estado baseado em programação quadrática Fuzzy com função objetivo não-simétrica (PQF).

Um ponto fundamental, neste trabalho, é a técnica utilizada para a modelagem das informações qualitativas e as suas respectivas imprecisões. Ao contrário dos métodos convencionais de estimação de estado, em que as informações qualitativas e as imprecisões a respeito das mesmas são representadas por pseudo-medidas Crisps, com relativamente

baixas ponderações, neste trabalho propõe-se a representação das informações qualitativas e imprecisões por meio de pseudo-medidas Fuzzy, definidas por uma função de pertinência que modela a imprecisão existente na definição da pseudo-medida, através de uma faixa de valores com grau de pertinência variável, em torno de um valor central.

Uma característica da metodologia proposta, decorrente do emprego da técnica de programação Fuzzy para solução do problema de estimação de estado, é a representação das pseudo-medidas Fuzzy por meio de restrições de desigualdade, não ponderadas. Este fato constitui uma das grandes vantagens da metodologia desenvolvida, pois contorna o problema da definição do valor da ponderação relativa as pseudo-medidas, tradicionalmente verificado em estimadores de estado MQP e VAPR. Assim, problemas de mal condicionamento numérico durante a solução do problema de cálculo do vetor de estado, que podem ocasionar divergência ou convergência para valores não satisfatórios, não são verificados nos estimadores de estado, considerando restrições Fuzzy.

As principais características de implementação, comuns a todos os estimadores de estado propostos, podem ser assim enumeradas:

- Função objetivo do problema de estimação de estado definida pela minimização de  $\lambda$ .

- Pseudo-medidas Fuzzy representadas por restrições de desigualdade no problema de estimação de estado. O número de restrições de desigualdade, a ser considerada para cada pseudo-medida Fuzzy, refere-se ao formato da função de pertinência que modela a mesma.

- Fuzzificação da função objetivo de um problema de estimação de estado MQP ou VAPR, através da solução de problemas prévios de estimação de estado baseados nestas formulações, para determinação dos seus limites de existência.

- Representação da função objetivo do problema de estimação de estado MQP ou VAPR, por meio de uma restrição de desigualdade, podendo resultar em uma restrição linear (estimador VAPR) ou não linear (estimador MQP);

- Medidas analógicas são representadas no problema de estimação de estado, considerando restrições Fuzzy, como restrições de igualdade ao problema.

A principal aplicação do estimador de estado, considerando restrições Fuzzy, está no cálculo do vetor de estado em redes de distribuição de eletricidade e na representação de redes elétricas externas em sistemas de transmissão. Outras características, como robustez a uma grande variedade de erros grosseiros em medidas analógicas, e robustez a imprecisões na definição do valor central da pseudo-medida Fuzzy, são outros pontos de grande importância, verificados pela metodologia de estimação de estado proposta neste trabalho de tese. A robustez verificada nos estimadores de estado propostos, para uma grande variedade de erros grosseiros em medidas analógicas, permite a não utilização de ferramentas de pós-processamento, contudo a aplicação destas ferramentas pode-se fazer necessária, em situações onde a robustez dos mesmos não se caracteriza. A robustez às incertezas existentes na modelagem do valor central das pseudo-medidas Fuzzy, pode ser caracterizada, como uma “dificuldade” que estes estimadores apresentam em transmitir uma informação incoerente para o estado que está sendo estimado.

A representação das pseudo-medidas Fuzzy, na solução de problemas de observabilidade, somente é possível devido a técnica de resolução do problema de programação linear ou não-linear (Método SIMPLEX ou Pontos Interiores Primal Dual) empregada na modelagem do estimador de estado, considerando restrições Fuzzy, em que as restrições de desigualdade são tratadas como restrições de igualdade ao problema, através da inclusão de variáveis de folga (LINS, 2006) e (LUENBERGER, 1984). Uma vantagem na modelagem da pseudo-medida crítica, como Fuzzy, reside no fato destas não

interferirem no resultado da estimação de estado, mesmo com elevada imprecisão na definição do seu valor central. Desta forma, conclui-se que a modelagem de pseudo-medidas Fuzzy críticas, não tem nenhuma implicação no resultado do processo de estimação de estado.

Com relação aos critérios de avaliação dos erros de estimação, erros médio quadráticos (EMQ) e erros absolutos (EA), verifica-se que os modelos de estimadores de estado, considerando restrições Fuzzy, apresentaram resultados semelhantes, sendo que, no geral, as piores situações foram verificadas no estimador de estado PLFS. Este estimador representa um modelo primário do estimador de estado PLFNS. Os valores dos EMQ foram, no geral, pequenos para o conjunto de simulações apresentadas. O estimador de estado, baseado no método dos Mínimos Quadrados Ponderados (MQP), apresentou os maiores valores de erros, caracterizando o problema da modelagem de um elevado número de pseudo-medidas Crisps para representação de informações qualitativas imprecisas. A implementação de uma técnica diferente do método das Equações Normais para solução do problema MQP, como, por exemplo, um método Ortogonal, poderia trazer melhores resultados. Os bons resultados alcançados com o estimador de estado, baseado no Menor Valor Absoluto Ponderado dos Resíduos (VAPR), pode ser justificado pela robustez que este tipo de estimador de estado apresenta a uma grande variedade de erros grosseiros em medidas ou mesmo pseudo-medidas.

Deve-se ressaltar que os relativamente pequenos erros de estimação, mostrados nos resultados do Capítulo 4, para os estimadores de estado, considerando restrições Fuzzy, referem-se aos melhores resultados obtidos pela aplicação destes. Contudo, em determinadas situações, estes podem fornecer estimativas piores que aquelas do estimador de estado MQP, ou mesmo divergência.

A aplicação dos estimadores de estado para modelagem da rede elétrica externa, em um sistema de transmissão, também mostrou-se uma boa alternativa; uma vez que permite uma modelagem completa destas redes, a partir da construção de pseudomedidas Fuzzy apenas, sem a necessidade da execução de um problema de fluxo de potência prévio, definições de barras de referência para a rede externa e ajustes de ponderações de pseudo-medidas de injeção de potência, conforme verificado na técnica de modelagem em dois passos. A metodologia desenvolvida permitiu também uma incorporação satisfatória de medidas virtuais ao problema de estimação de estado.

Outro ponto de destaque na aplicação dos estimadores de estado propostos, com relação ao problema de modelagem da rede elétrica externa, é a dificuldade que uma pseudo-medida Fuzzy, com valor central incorretamente definido, tem em deteriorar o resultado da estimação de estado para a rede interna.

Com relação à metodologia proposta, alguns pontos devem ser levantados:

- A implantação da modelagem proposta, em situações reais, mostra-se fortemente dependente das informações qualitativas disponibilizadas. Uma modelagem inconsistente para um grande número de informações qualitativas pode conduzir a estimativas do vetor de estado não coincidentes com a realidade operacional.

- A carga computacional para a solução do problema de estimação de estado em um ambiente Fuzzy é mais elevada, se comparada à utilização do fluxo de potência ou estimadores de estado MQP e VAPR. Este fato é justificado pela seqüência de problemas de programação executados durante o processo iterativo de cálculo do vetor de estado, e o grande número de restrições de desigualdade representadas nestes estimadores.

- Há necessidade da execução prévia de estimadores de estado convencionais, VAPR ou MQP, para a determinação do valor convergido de sua função objetivo, e construção da restrição de desigualdade da mesma. Caso o sistema elétrico sofra modificações em sua

topologia, inserção ou exclusão de pontos de medição, ou mesmo modificação do valor de alguma medida, tornar-se-á necessária a re-execução do estimador de estado convencional, para atualização do valor da sua função objetivo e reconstrução da restrição de desigualdade associada à mesma. A não adequação da restrição da função objetivo à nova condição, pode ocasionar problemas de divergência ou mesmo convergência para valores menos condizentes com a condição de operação. Este problema é mais acentuado no estimador de estado PLFS.

- Dentre todos os modelos de estimadores de estado, considerando restrições Fuzzy, desenvolvidos neste trabalho, o estimador de estado PQF mostra-se como a alternativa mais desfavorável para solução do problema de estimação de estado com presença de informações qualitativas, pois a solução deste estimador requer a execução de um problema de programação não-linear, fortemente dependente das condições iniciais. A carga computacional requerida pelo estimador PQF também é muito superior aos demais modelos, mesmo convergindo em um número igual de iterações. Os estimadores de estado lineares, considerando restrições Fuzzy, mostram-se insensíveis a problemas de condição inicial, exigindo menor carga computacional. O modelo do estimador PLFNS mostra-se a melhor alternativa para implementações reais.

## **5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Uma vez que o tema abordado, neste trabalho, mostra-se suficientemente rico, várias sugestões para trabalhos futuros podem ser levantadas, propondo novas aplicações para os estimadores de estado, considerando restrições Fuzzy, e/ou a melhoria das ferramentas de apoio ao emprego destes estimadores de estado.

- Aplicação dos estimadores de estado, considerando restrições Fuzzy, para solução de problemas reais, associadas às redes de distribuição de eletricidade ou sistemas de

transmissão de energia elétrica. Para estes sistemas devem ser levantados um número considerável de informações qualitativas que possam ser modeladas por números Fuzzy.

- Desenvolvimento de outra alternativa de modelagem de estimador de estado Fuzzy, envolvendo a resolução do problema de cálculo do vetor de estado com presença de informações qualitativas imprecisas, através da aplicação da técnica de aritmética Fuzzy a um problema de estimação pelo método dos Mínimos Quadrados Ponderados.

- Desenvolvimento de um modelo trifásico para estimação de estado com presença de medidas imprecisas, a partir do modelo monofásico apresentado neste trabalho, para aplicação específica em redes de distribuição de eletricidade. Este modelo deve ser capaz de representar as características peculiares verificadas nestas redes elétricas.

- Inserção e tratamento de restrições operativas de aparelhos no problema de estimação de estado considerando restrições Fuzzy. Na literatura especializada, o problema de representação de restrições operativas em estimadores de estado, baseados em programação linear ou Método dos Mínimos Quadrados, já foi bem discutida, entretanto a migração destes modelos para um ambiente Fuzzy deve ser mais bem avaliada.

- Inclusão do problema de estimação de parâmetros desconhecidos da rede elétrica no modelo do estimadores de estado, considerando restrições Fuzzy. Assim, como o realizado com as pseudo-medidas, os parâmetros desconhecidos seriam modelados como grandezas Fuzzy, e representados no problema de estimação de estado.

- Determinação de uma técnica para levantamento e tratamento de informações qualitativas a serem utilizadas pelos estimadores de estado, considerando restrições Fuzzy. Esta proposta tem por objetivo construir uma metodologia auxiliar ao problema de estimação de estado, de forma que informações qualitativas ou o conhecimento humano, caracterizado por variáveis lingüísticas, possam ser adequadamente representados em forma de funções de pertinência. Aplicação de algum método de previsão de grandezas

elétricas e construção de um conjunto de regras associadas às mesmas, podem ser viáveis no atendimento desta proposta.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AAM, S., HOLTEN, L., GJERDE, O., 1983, "Design of the Measurement System for State Estimation in the Norwegian High-Voltage Transmission Network", *IEEE Transactions on PAS*, vol. PAS - 102, no. 12, pp. 3769-3777, December.

ABBASY, N. H., 1996, "Neural Network Aided Design for Metering System of Power System State Estimation", *Proceedings of 4<sup>th</sup> IEEE AFRICON*, vol. 2, pp. 607 – 610, September.

ABUR, A., 1990, "A Bad Data Identification Method for Linear Programming State Estimation", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 5, no. 3, pp. 894-901, August.

ABUR, A., CELIK, M. K., 1991, "A Fast Algorithm for the Weighted Least Absolute Value State Estimation", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 6, no. 1, pp. 1-8, February.

ABUR, A., CELIK, M. K., 1993a, "Least Absolute Value State Estimation with Equality and Inequality Constraints", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 8, no. 2, pp. 680-686, May.

ABUR, A., EXPOSITO, A. G., 1993b, "Observability and Bad Data Identification When Using Ampere Measurements in State Estimation", In: *ISCAS - IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, vol. 4, pp. 2668-2671, May.

ABUR, A., CELIK, M. K., 1994, "Topology Error Identification by Least Absolute Value State Estimation", In: *IEEE Proceedings of the 7th Mediterranean Electrotechnical Conference*, vol. 3, pp. 972-975, April.

ABUR, A., MAGNAGO, F. H., ALVARADO, F. L., 1997, "Elimination of Leverage Measurements Via Matrix Stretching", *Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier Science LTDA, vol. 19, no. 8, pp. 557-562, May.

ABUR, A., EXPÓSITO, A. G., 2004, *Power systems state estimation: Theory and Implementation*, Marcel Dekker Inc., New York.

ALLEMONG, J. J., RADU, L., SASSON, A. M., 1982, “A Fast and Reliable State Estimation Algorithm for AEP’s New Control Center”, *IEEE Transactions on PAS*, vol. PAS-101, no. 04, pp.933-944, April.

ALMEIDA, M. A. D., SILVEIRA, D. B. F., PIRES, P. S. da M., MOTA, F. C., OLIVEIRA, R. C., MEDEIROS JR., M. F., 2003, “Estimação de Estado em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica, para Avaliação das Perdas Técnicas, com Base no Método da Soma de Potências”, In: *Anais do II CITENEL – Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica*, Caderno Perdas, pp. 744 – 749, Salvador, BA, Brasil, Novembro.

AL-OTHMAN, A. K., IRVING, M. R., 2005a, “Uncertainty Modelling in Power System State Estimation”, In: *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 152, no. 2, pp. 233 – 239, March.

AL-OTHMAN, A. K., IRVING, M. R., 2005b, “Analysis of Confidence Bounds in Power System State Estimation with Uncertainty in Both Measurements and Parameters”, *Electric Power System Research Journal*, Elsevier B. V., December.

ALVARADO, F.L., TINNEY, W.F., 1990, “State Estimation using Augmented Blocked Matrices”. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 5, no.3 pp. 911-921, August.

ALSAÇ, O., VEMPATI, N., STOTT, B., MONTICELLI, A., 1998, “Generalized State Estimation”. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 13, no.3 pp. 1069-1075, August.

ALVES DA SILVA, A. P., QUINTANA, V. H., 1995, “Pattern Analysis in Power System State Estimation”, *Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier Science Ltd, vol. 17, no. 1, pp. 51–60.

ANTONIO, A. B., TORREÃO, J. R. A., DO COUTTO FILHO, M. B., 2001, “Meter Placement for Power System State Estimation Using Simulated Annealing”, *IEEE Proceedings of Porto Power Tech. Conference*, vol. 3, 5 pp., Porto, Portugal, September.

ASADA, E., FREITAS, W., GARCIA, A., 2002, “Identificação de Erros Interativos e Conformativos em Estimação de Estado”, In: *Anais do XIV Congresso Brasileiro de Automática*, Natal, RN, pp. 1562 – 1568, Setembro.

ASADA, E., 2004, “Análise de Observabilidade e Processamento de Erros Grosseiros Conformativos Utilizando a Metaheurística Busca Tabu na Estimação de Estado Generalizada”, Tese de Doutorado, FEEC/UNICAMP, Campinas, SP.

ASCHMONEIT, F. C., PETERSON, N. M., ADRIAN, A. C., 1977, “State Estimation with Equality Constraints”, *Proceedings of PICA*, pp. 427-436.

BALDICK, R., CLEMENTS, K. A., PINJO-DZIGAL, Z., DAVIS, P. W., 1997, “Implementing Nonquadratic Objective Functions for State Estimation and Bad Data Rejection”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 12, no. 1, pp. 376-382, February.

BANSAL, R. C., 2003, “Bibliography on the Fuzzy Set Theory Applications in Power System (1994 – 2001)”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, no. 4, pp. 1291-1299, November.

BARAN, M. E., WU, F. F., 1989, “Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, no. 2, pp. 1401–1407.

BARAN, M. E., KELLEY, A. W., 1994, “State Estimation for Real-time Monitoring of Distribution Systems”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 9, no.3, pp. 1601 – 1609, August.

BARAN, M. E., KELLEY, A. W., 1995, “A Branch-Current-Based State Estimation Method for Distribution Systems”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 10, no. 1, pp. 483 – 491, February.

BARAN, M. E., JINXIANG, Z., HONGBO, Z., GARREN, K. E., 1995, “A Meter Placement Method for State Estimation”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 10, no. 3, pp. 1704 – 1710, August.

BARBOZA, M. C. S., 1999, “Mecanismos para a Integração de Informações: Fusão de Dados Quantitativos e Qualitativos com Aplicação à Estimação de Estado de Sistemas de Potência”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, Pós-Graduação em Computação, Niterói, RJ.

BARGIELA, A., IRVING, M. R., STERLING, M. J. H., 1986, “Observability Determination in Power System State Estimation Using a Network Flow Technique”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 1, no. 2, pp. 108-113, May.

BARGIELA, A., PEDRYCZ, W., TANAKA, M., 2003, “A Study of Uncertain State Estimation”, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part A: Systems and Humans*, vol. 33, no. 3, pp. 288-301, May.

BONANOMI, P., GRAMBERG, G., 1983, “Power System Data Validation and State Calculation by Network Search Techniques”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-102, no. 1, pp. 238-249, January.

BOSE, A., 1984, “Modeling of External Networks for On – Line Security Analysis”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS - 103, pp. 2117-2125, August.

BOSE, A., 1986, "The Effects of External Modeling Errors on Online Security Analysis", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS - 1, no. 1, pp. 227-232, February.

BRETAS, N. G., 1996, "Network Observability: Theory and Algorithms Based on Triangular Factorisation and Path Graph Concepts", *IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution*, vol. 143, no. 1, pp. 123-128, January.

BRETAS, N. G., LONDON, J. B. A., 1998, "Network Observability: The Critical Measurement Identification Using the Symbolic Jacobian Matrix", *Proceedings of International Conference on Power System Technology*, vol. 2, pp. 1222-1226, August.

BUNCH Jr., J. B., 1984, "Guidelines for Evaluating Distribution Automation – Final", EPRI, report no.: EL-3728, November.

CELIK, M. K., ABUR, A., 1992, "Use of Scaling in WLA V Estimation of Power System States", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 7, no. 2, pp. 684-692, May.

CESPEDES, R. G., 1990, "New Method for the Analysis of Distribution Networks", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 5, no. 1, pp. 391-396, January.

CLEMENTS, K. A., KRUMPHOLZ, G. R., DAVIS, P. W., 1981, "Power System State Estimation Residual Analysis: An Algorithm Using Network Topology", *IEEE Transactions on PAS*, vol. PAS - 100, pp. 1779-1787, April.

CLEMENTS, K. A., KRUMPHOLZ, G. R., DAVIS, P. W., 1983, "Power System State Estimation with Measurements Deficiency: An Observability/Measurement Placement Algorithm", *IEEE Transactions on PAS*, vol. PAS - 102, pp. 2012-2020, July.

CLEMENTS, K. A., WOODZELL, G. W., BURCHETT, R. C., 1990, "A New Method for Solving Equality-Constrained Power System Static State Estimation", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 5, no. 4, pp. 1260-1285, November.

CLEMENTS, K. A., DAVIS, P. W., FREY, K. D., 1995, "Treatment of Inequality Constraints in Power System State Estimation", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 10, no. 2, pp. 567-574, May.

DA SILVA, A. M. L., DO COUTTO FILHO, M. B., CANTERA, J. M. C., 1987, "An Efficient Dynamic State Estimation Algorithm Including Bad Data Processing", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 2, no. 4, pp. 1050 - 1058.

DAS, B., REDDY, J. V., 2005, "Fuzzy-logic-based Fault Classification Scheme for Digital Distance Protection", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 609-616, April.

DECKER, I. C., DOTTA, D., AGOSTINI, M. N., ZIMATH, S. L., E SILVA, A. S., 2006, "Performance of a Synchronized Phasor Measurements System in the Brazilian Power System", *Proceedings of the PSCE'06 - Power Systems Conference and Exposition*, pp. 150 – 158, Atlanta, USA, October/November.

DO COUTTO FILHO, M. B., SILVA, A. M. L., FALCÃO, D. M., 1990, "Bibliography on Power System State Estimation (1968 – 1989)", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 5, no. 3, pp. 950-961, August.

DO COUTTO FILHO, M. B., SOUZA, J. C. S., MATOS, R. S. G., SCHILLING, M. Th., 2001, "Revealing Gross Errors in Critical Measurements and Sets Via Forecasting-aided State Estimators", *Electric Power Systems Research*, Elsevier, vol. 57, no. 1, pp. 25 – 32, January.

DO COUTTO FILHO, M. B., SOUZA, J. C. S., MEZA, E. M., SCHILLING, M. Th., CAPDEVILLE, C., 2005, "Application of Genetic Algorithms for Planning Metering Systems in State Estimation", *IEEE Proceedings of the 15<sup>th</sup> PSCC*, Liege, Session 26, Paper 6, August.

DO COUTTO FILHO, M. B., SOUZA, J. C. S., SCHILLING, M. Th., 2007, “Handling Critical Data and Observability”, *Electrical Power Components and Systems*, vol. 35, no. 5, pp. 553 – 573, May.

DO COUTTO FILHO, M. B., SOUZA, J. C. S., SCHILLING, M. Th., 2007, “Sobre o Problema da Integração Generalizada de Dados”, *Sba Controle e Automação*, Sociedade Brasileira de Automática, vol. 18, no. 1, pp. 24-43, February/March.

DY LIACCO, T. E., 1978, “System security: the computer’s role”, *IEEE Spectrum*, vol. 1, pp. 43-50, June.

DY LIACCO, T. E., RAMARO, K. A., WEINER, A. W., 1973, “Network Status Analysis for Real Time Systems”, *8th PICA Conference Proceedings*, p. 356, July.

EHRENSPERGER, J. G., 2004, “*Sistema de Medição Fasorial Sincronizada – Análise do Estado da Arte e Aplicações no Monitoramento de Sistemas de Energia Elétrica*”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 83 pp., Florianópolis, SC, Maio.

EL-HAWARY, M. E., 1998, *Electric Power Applications of Fuzzy Systems*, Wiley - IEEE Press Series on Power Engineering, 376 pp., June.

EL-KEIB, A. A., SINGH, H., 1992, “Fast Linear Programming State Estimation Using the Dual Formulation”, *IEEE Transactions on Power System*, vol. 7, no. 2, pp. 620-628, May.

FALCÃO, D. M., COOPER, P. A., BRAMELLER, A., 1982, “Power System State Estimation and Bad Data Processing”, *IEEE Transactions on PAS*, vol. PAS-101, no. 2, pp. 325-333.

FALCÃO, D. M., 1985, “An Efficient Power System Tracking State Estimator Using Linear Programming”, In: *Proceedings of the IFAC Symposium on Planning and Operation of Electric Energy Systems*, Rio de Janeiro, pp. 65 – 70.

FALCÃO, D. M., ASSIS, S. M., 1988, “Linear Programming State Estimation: Error Analysis and Gross Error Identification “, *IEEE Transactions on Power System*, vol. 3, pp. 809-815, August.

FALCÃO, D. M., ARIAS, M. A., 1994, “State Estimation and Observability Analysis Based on Echelon Forms of the Linearized Measurement Models”, *IEEE Transactions on Power System*, vol. 9, no. 2, pp. 979-987, May.

GARCIA, A., MONTICELLI, A., ABREU, P., 1979, “Fast Decoupled State Estimation and Bad Data Processing”, *IEEE Transactions on PAS*, vol. PAS-98, no. 05, pp.1645-1651, September/October.

GEISLER, K.I. BOSE, A., 1983, “State Estimation Based External Network Solution For On-Line Security Analysis”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-102, no. 08, pp. 2447-2454, August.

GEISLER, K.I. BOSE, A., 1985, “State Estimation Based External Network Solutions: Field Testing”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-104, no. 08, pp. 2126-2132, August.

GIOVE, S., BORTOT, P., 2006, “A Solving Tool for Fuzzy Quadratic Optimal Control Problems”, *Working Paper Series*, Department of Applied Mathematics, University of Venice, no. 148, November.

GJELSVIK, A.; AAM, S., HOLTEN, L., 1985, “Hachtel’s Augmented Matrix Method - A Rapid Method Improving Numerical Stability in Power System Static State Estimation”, *IEEE Transactions on PAS*, vol. PAS - 104, no. 11, pp. 2987-2993, November.

GHOSH, A. K., LUBKEMAN, D. L., DOWNEY, M. J., JONES, R. H., 1997, “Distribution Circuit State Estimation Using a Probabilistic Approach”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 12, no.1, pp. 45 – 51, February.

GOMEZ-EXPÓSITO, A., VILLA, A., 2001, “Reduced Substation Models for Generalized State Estimation”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 16, no.4, pp. 839 – 846, November.

GOUVÊA, J. P. da S., SIMÕES-COSTA, A. J. A., 1998, “Estimador de Estados Ortogonal com Restrições de Igualdade”, *Sociedade Brasileira de Automática – Revista Controle & Automação*, vol. 9, no. 3, pp. 141-148.

GRANVILLE, S., 1994, “Optimal Reactive Dispatch Through Interior Point Methods”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 9, pp. 136-146, Fevereiro.

HE, Y., DENG, Y., LEI, J., ZHANG, B., 2000, “A Novel Architecture of Distribution Management Systems”, *Proceedings of IEEE 2000 Summer Meeting*, Seattle, USA.

HABIBALLAH, I. O., IRVING, M. R., 2001, “Observability Analysis for State Estimation Using Linear Programming”, *IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution*, vol. 148, no. 2, pp. 142-145, March.

HANDSCHIN, E., SCHWEPPE, F. C., KOHLAS, J., FIECHTER, A., 1975, “Bad Data Analysis for Power System State Estimation”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS - 94, no. 2, pp. 329-337, March/April.

HENRIQUES, H. O., 2003, “*Estimação de Demanda em Redes de Distribuição: Aplicação em Rastreamento e Localização de Perdas*”, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

HIYAMA, T., TOMSOVIC, K., 1999, “Current Status of Fuzzy System Applications in Power Systems”, In: *IEEE Proceedings of the SMC99*, Tokyo, Japan, pp. 527–532.

IRVING, M. R., OWEN, R. C., STERLING, M. J. H., 1978, “Power System State Estimation Using Linear Programming”, In: *Proceedings of IEE*, vol. 125, pp. 879 – 885.

JAIN, A., BALASUBRAMANIAN, R., 2004, “Power Network Observability: A Fast Solution Technique Using Graph Theory”, In: *IEEE Proceedings of POWERCON*, vol. 2, pp. 1839-1844, November.

KAGAN, N., DE OLIVEIRA, C. C. B., ROBBA, E. J., 2005, *Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*, Editora Blucher, 1º Edição, 344 p..

KATO, K., SNYDER, W. L., VEMURI, S., PAPALEXOPOULOS, A. D., OATTS, M. L., CONTAXIS, G. C., SINGH, J., SMITH, R. A., SAVULESCU, S. C., 1994, “External Network Modeling – Recent Practical Experience”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 9, no. 1, pp. 216-228, February.

KIM, H., ABUR, A., 1996, “Enhancement of External System Modeling for State Estimation”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, no. 3, pp. 1380-1386, August.

KOGLIN, H. J., 1975, “Optimal Measuring System for State Estimation”, *Proceedings of the PSCC Conference*, paper 2.3/12, Cambridge, UK, September.

KORRES, G. N., CONTAXIS, G. C., 1991, “A Reduced Model for Bad Data Processing in State Estimation”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 6, no. 2, pp. 550-557, May.

KORRES, G. N., 2002, “A Partitioned State Estimator for External Network Modeling”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 17, no. 3, pp. 834-842, August.

KOTIUGA, W. W., VIDYASAGAR, M., 1982, “Bad Data Rejection Properties of Weighted Least Absolute Value Techniques Applied to Static State Estimation”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS - 101, no. 4, pp. 844-853, April.

KRUMPHOLZ, G. R., CLEMENTS, K. A., DAVIDS, P. W., 1980, “Power System Observability: A Practical Algorithm Using Network Topology”, *IEEE Transactions on PAS*, vol. 99, pp. 1534-1542, July/August.

LABUDDA, K. D., SHAHIDEHPOUR, M., 1994, “Fuzzy Multi-Objective Approach to Power System State Estimation”, In: *International Journal of Engineering Intelligent Systems*, vol. 2, no. 2, June.

LAYNE, J. R., PASSINO, K. M., 1996, “Fuzzy Dynamic Model Based State Estimator”, In: *Proceedings of the 1996 IEEE International Symposium on Intelligent Control*, Dearborn, EUA, pp. 313-318, September.

LEÃO, J. A., 1990, “*Erros Topológicos na Estimação de Estado em Sistemas de Potência: Abordagem Geométrica, Detectabilidade e Identificação*”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Julho.

LEITE DA SILVA, A. M., DO COUTTO FILHO, M. B., CANTERA, J. M. C., 1987, “An Efficient Dynamic State Estimation Algorithm Including Bad Data Processing”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. PWRS - 2, no.4, pp. 1050 – 1058.

LI, K., 1996, “State Estimation for Power Distribution System and Measurement Impacts”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, no.2, pp. 911 – 916, May.

LIN, W. M., TENG, J. H., 1996, “State Estimation for Distribution Systems with Zero-Injection Constrains”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, no. 1, pp. 518 – 524, February.

LINS, M. P. E., CALÔBA, G. M., 2006, *Programação Linear*, Editora Interciência, 1º Edição, 299 p..

LIU, W. H. E., WU, F. F., LUN, S. M., 1992, “Estimation of Parameter Errors from Measurement Residuals in State Estimation”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 7 no. 1, pp. 81 – 89, February.

LONDON Jr., J. B .A., 2000, “*Identificação do Nível de Redundância das Medidas de um Sistema de Potência, para Efeito de Estimação de seus Estados*”, Tese de Doutorado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

LONDON, J. B. A., BRETAS, N. G., 2001, “Método para o Tratamento de Questões Qualitativas Referentes ao Processo de Estimação de Estado”, In: *XVI SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Campinas, SP, Outubro.

LU, C. N., LIU, K. C., VEMURI, S., 1990, “An External Network Modeling Approach for On-Line Security Analysis”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 5, no. 2, pp. 565-573, May.

LU, C. N., LEOU, R. C., LIU, K. C., UNUM, M., 1994, “A Load Flow and Fuzzy Linear Programming Based External Network Modeling Approach”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 9, no. 3, pp. 1293 – 1301, August.

LU, C. N., TENG, J. H., LIU, W. H. E., 1995, “Distribution System State Estimation”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 10, no. 1, February.

LUENBERGER, D. G., 1984, *Linear and Nonlinear Programming*, Addison-Wesley, 2° Edition, 491 pp..

MAGNAGO, F.H., ABUR, A., 1999 “A Unified Approach to Robust Meter Placement Against Loss of Measurements and Branch Outages”, In: *Proceedings of the 21st PICA - IEEE International Conference on Power Industry Computer Applications*, pp. 3 – 8, Santa Clara, CA, USA, July.

MARINI, R. L. V., 2005, “*Uso de Medição Fasorial Sincronizada visando a Melhoria da Estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência*”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 113 pp., Florianópolis, SC, Março.

MEDEIROS JR., M. F., ALMEIDA, M. A. D., SILVEIRA, D. B. F., 2002, “Estimação de Estado em Redes de Distribuição de Média Tensão com Base no Algoritmo da Soma de Potências; Parte I: Modelo Linearizado”, *VINDUSCON*, Salvador, BA, Brasil, Julho.

MELIPOULOS, A. P. S., ZHANG, F., 1996, “Multiphase Power Flow and State Estimation for Power Distribution Systems”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, no. 2, May.

MILI, L., VAN CUTSEM, Th., RIBBENS-PAVELLA, M., 1985, “Bad Data Identification Methods in Power System State Estimation – A Comparative Study”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS - 104, no. 11, pp. 3037-3049, November.

MILI, L., PHANIRAJ, V., ROUSSEEUW, P. J., 1990, “High Breakdown Point Estimation in Electric Power Systems”, In: *Proceedings of the 1990 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, vol. 3, pp. 1843 – 1846, New Orleans, May.

MILI, L., PHANIRAJ, V., ROUSSEEUW, P. J., 1991, “Least Median of Squares Estimation in Power System”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 6, no. 2, pp. 511 – 523, May.

MILI, L., CHENIAE, M. G., VICHARE, N. S, ROUSSEEUW, P. J., 1996, “Robust State Estimation Based on Projection Statistics”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, no. 2, pp. 1118 – 1127, May.

MIRANDA, V., MATOS, M. A. C. C., 1989, “Distribution System Planning with Fuzzy Models and Techniques”, In: *Proceedings of 1989 CIRED – 10<sup>th</sup> International Conference on Electricity Distribution*, vol. 06, pp. 472 - 476, Brighton, UK, May.

MIRANDA, V., SARAIVA, J. T., 1992, “Fuzzy Modelling of Power System Optimal Load Flow”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 7, no. 2, pp. 843-849, May.

MIRANDA, V., PEREIRA, J., SARAIVA, J. T., 1995, “Experiences in State Estimation Models for Distribution Systems Including Fuzzy Measures”, *IEEE Stockholm PowerTech*, Stockholm, Sweden, June.

MIRANDA, V., PEREIRA, J., SARAIVA, J. T., 2000, “Load Allocation in DMS with a Fuzzy State Estimator”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 15, no. 2, pp. 529-534, May.

MATLAB, 2005, The Mathworks Inc., version 7.1.0.246 (R14).

MONTICELLI, A., 1983, *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*, Editora Edgard Blucher Ltda, São Paulo, SP.

MONTICELLI, A., WU, F. F., 1985a, “A Method that Combines Internal State Estimation and External Network Modeling”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS - 104, no. 1, pp. 91-103, January.

MONTICELLI, A., WU, F. F., 1985b, “Network Observability: Theory”, *IEEE Transactions on on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS - 104, no. 5, pp. 1042-1048, May.

MONTICELLI, A., WU, F. F., 1985c, “Network Observability: Identification of Observable Islands and Measurement Placement”, *IEEE Transactions on on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS - 104, no. 5, pp. 1035-1041, May.

MONTICELLI, A., MURARI, C. A. F., WU, F. F., 1985d, “A Hybrid State Estimator: Solving Normal Equations by Orthogonal Transformations”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 105, pp. 3460-3468, December.

MONTICELLI, A., WU, F. F., YEN, M., 1986, “Multiple Bad Data Identification for State Estimation by Combinatorial Optimization”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 1, no.3, pp.361-369.

MONTICELLI, A., GARCIA, A., 1990, “Fast Decoupled State Estimators”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 5, no. 2, pp.556-564, May.

MONTICELLI, A., GARCIA, A., 1991, "Modeling Zero Impedance Branches in Power System State Estimation", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 6, no. 4, pp. 1561-1570.

MONTICELLI, A., 1999, *State Estimation in Electric Power System. A Generalized Approach*, Kluwer Academic Publishers.

MONTICELLI, A., 2000, "Electric Power System State Estimation", In: *Proceedings of IEEE*, Vol. 88, No. 2., pp. 262-282, February.

MORI, H., TANAKA, H., 1991, "A Genetic Approach to Power System Topological Observability", *Proceedings of IEEE International Synposium on Circuits and Systems*, vol. 2, pp. 1141-1144, Singapore, June.

PARK, Y. M., MOON, Y. H., CHOO, J. B., KWON, T. W., 1988, "Design of Reliable Measurement System for State Estimation", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 3, no. 3, pp. 830-836, August.

PATEL, M. Y., GIRGIS, A. A., 2006, "A Comparison of State Estimation Based External Network Modeling Methods", In: *Proceedings of PSC'06 - Power Systems Conference: Advanced Metering, Protection, Control, Communication, and Distributed Resources*, pp. 517-522, March.

PAVIC, I., HEBEL, Z., DELIMAR, M., 2001, "Power System Equivalent Based on an Artificial Neural Network", In: *Proceedings of the 23<sup>rd</sup> International Conference Information Technology Interfaces*, Pula, Croatia, pp. 359 – 365, June.

PEREIRA, J. M. C., 1995, "*Estimação de Estado em Redes de Distribuição de Energia Elétrica com Medidas Imprecisas*", Dissertação de Mestrado, FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 121 pp..

PEREIRA, J., SARAIVA, J. T., MIRANDA, V., 1997, "Combining Fuzzy and Probabilistic Data in Power System State Estimation", In: *Proceedings of 5th PMAPS –*

*International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power System*, Vancouver, Canada.

PEREIRA, J., SARAIVA, J. T., MIRANDA, V., 1999, “Estimação de Estado em Sistemas de Distribuição de Energia Incluindo Aparelhos de Corte, Divisão em Ilhas e Dados Qualitativos”, In: *Anais do 4th ELAB – Encontro Luso-Afro-Brasileiro de Planejamento e Exploração de Redes de Energia*, pp. 523 – 533, Rio de Janeiro, Brazil, Junho.

PEREIRA, J., SARAIVA, J. T., MIRANDA, V., 2000, “Some Practical Issues in the Migration of State Estimation Modules from EMS to DMS Systems”, In: *6<sup>th</sup> International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, Funchal, Portugal, September.

PEREIRA, J. M. C., 2001a, “*A State Estimation Approach for Distribution Networks Considering Uncertainties and Switching*”, Doctoral Thesis, FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 216 pp., July.

PEREIRA, J. C., SARAIVA, J. T., MIRANDA, V., COSTA, A. S., LOURENGO, E. M., CLEMENTS, K. A., 2001b, “Comparison of Approaches to Identify Topology Errors in the Scope of State Estimation Studies”, In: *Proceedings of IEEE Porto Power Tech Conference*, vol. 3, 6 pp., Porto, Portugal, September.

PEREIRA, M. A., 2000, “*Conjuntos Nebulosos e Algoritmos Genéticos Aplicados a Reconfiguração de Redes de Distribuição de Energia Elétrica*”, Tese de Doutorado, Departamento de Sistemas de Energia, Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas.

PEREIRA, L. A. C., 2008, “*Estimação de Estado Utilizando Funções Objetivo Não-Quadráticas e Contínuas*”, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

PHUA, K., DILON, T. S., 1977, “Optimal Choice of Measurements for State Estimation”, In: *Proceedings of the PICA Conference, 1977*

PIRES, R. C., SIMÕES-COSTA, A. J. A., MILI, L., 1999, “Iteratively Reweighted Least-Squares State Estimation Through Givens Rotations”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 14, no. 4, pp. 1499-1507, November.

POWER EDUCATION TOOLBOX, (P.E.T), 2004, <http://ee.tamu.edu/~abur>.

QUINTANA, V.H., SIMÕES-COSTA, A. J. A., MANDEL, A., 1982, “Power System Topological Observability Using a Direct Graph-Theoretic Approach”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 101, pp. 617-625, March.

RAHIMI, A. F., KATO, K., ANSARI, S. H., BRANDWAJN, V., CAULEY, G., SOBAJIC, D. J., 1996, “On External Network Model Development”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, no. 2, pp. 905-910, May.

RAKPENTHAI, C., PREMRUDEEPREECHACHARN, S., UATRONGJIT, S., WATSON, N. R., 2005, “Measurement Placement for Power System State Estimation using Decomposition Technique”, *Electric Power Systems Research*, Elsevier, vol. 75, no. 1, pp. 41 – 49, July.

ROCHA, H. R. O., 2005, “*Alocação de Pontos de Medição para Supervisão de Redes de Distribuição de Energia Elétrica*”, Dissertação de Mestrado, UFF, 124p., Março.

ROYTELMAN, I., SHAHIDEHPOUR, S. M., 1993, “State Estimation for Electric Power Distribution Systems in Quasi Real-Time Conditions”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no.4, pp. 2009 – 2015, October.

SARIC, A. T., CIRIC, R. M., 2003, “Integrated Fuzzy State Estimation and Load Flow Analysis in Distribution Networks”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, no. 2, pp. 571-578, April.

SABYASACHI, G., 1997, “Fuzzy Linear Regression Analysis by Symmetric Triangular Fuzzy Number Coefficients”, *Proceedings of INES'97 – International Conference on Intelligent Engineering Systems*, pp. 307-313, September.

SANTOS FILHO, C. A. N., 2006, “*Estimação de Estado via Método de Pontos Interiores com Ajuste das Restrições de Desigualdade*”, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

SASSON, A. M., EHNNANN, S. T., LYNCH, P., VAN SLYCK, 1973, “Automatic Power System Network Topology Determination”, *IEEE Transactions on PAS*, vol. PAS-92, no. 1, p.610, March/April.

SCHWEPPE, F.C., ROM, D. B., 1970, “Power System Static State Estimation – Part II: Approximate Model”, *IEEE Transactions on PAS*, vol. PAS-89, pp.125-130, January.

SCHWEPPE, F.C., ROM, D. B., 1970, “Power System Static State Estimation – Part III: Implementation”, *IEEE Transactions on PAS*, vol. PAS-89, pp.130-135, January.

SHABANI, F., PRASAD, N. R., SMOLLECK, H. A., 1996, “State Estimation with Aid of Fuzzy Logic”, *Proceedings of Fifth IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, vol. 2, New Orleans, LA, pp. 947–953, September.

SHAHIDEHPOUR, M., MARWALI, M., 2004, “Role of Fuzzy Sets in Power System State Estimation”, *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, vol. 1, no. 1, article 1003.

SHAFIU, A., JENKINS, N., STRBAC, G., 2005, “Measurement Location for State Estimation of Distribution Networks with Generation”, *IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution*, vol. 152, no. 2, pp. 240–246, March.

SIMÕES-COSTA, A. J. A., QUINTANA, V.H., 1981, “A Robust Numerical Technique for Power System State Estimation”, *IEEE Transactions on PAS*, vol. 100, no. 2, pp. 691-698.

SIM, S. I., 1991, "Implementation of a Practical Algorithm for Power System Critical Measurement by Using Network Topology", In: *Proceedings of IEEE International Synposium on Circuits and Systems*, vol. 2, pp. 904-909, June.

SINGH, D., PANDEY, J. P., CHAUHAN, D. S., 2005, "Topology Identification, Bad Data Processing, and State Estimation Using Fuzzy Pattern Matching", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, no. 3, pp. 1570-1579, August.

SINGH, H., ALVARADO, F. L., LIU, W. H. E., 1997, "Constrained LAV State Estimation Using Penalty Functions", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 12, no. 1, pp. 324-388, February.

SINGH, N., GLAVITSCH, H., 1991, "Detection and Identification of Topological Erros in Online Power System Analysis", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 6, no. 1, pp. 324-331, February.

SLUTSKER, I. W., SCUDDER, J. M., 1987, "Network Observability Analysis through Measurement Jacobian Matrix Reduction", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 2, no. 2, pp. 331 – 337, May.

SOUZA, J. C. S., DO COUTTO FILHO, M. B., SCHILLING, M. Th., CAPDEVILLE, C., 2005, "Optimal Metering Systems for Monitoring Power Networks under Multiple Topological Scenarios", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, no. 4, pp. 1700 – 1708, November.

TANAKA, H., UEJIMA, S., ASAI, K., 1982, "Linear Regression Analysis with Fuzzy Models", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. SMC - 12, no. 6, pp. 903-907, November/December.

TOMSOVIC, K., 1992, "A Fuzzy Linear Programming Approach to the Reactive Power/Voltage Control Problem", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 7, no. 1, pp. 287-293, February.

VAN LAARHOVEN, P. J. M., 1987, *Simulated Annealing: Theory and Applications*, Kluwer Academic Publishers INC., 1º Edição, 154 pp..

VÁZQUES-RODRIGUEZ, S., DURO, R. J., 2003, “A Genetic Based Technique for the Determination of Power System Topological Observability”, In: *Proceedings of the Second IEEE International Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications*, pp. 48-52, Ukraine, September.

VEMPATI, N., SILVA, C., ALSAÇ, O., STOTT, B., 2005, “Topology Estimation”, In: *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society General Meeting*, vol. 1, pp. 806-810, June.

WEI, H., SASAKI, H., YOKOYAMA, R., 1996, “An Application of Interior Point Quadratic Programming Algorithm to Power System Optimization Problems”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, no. 1, pp. 260-266, February.

WOOD, A. J., WOLLENBERG, B. F., 1984, *Power Generation, Operation and Control*, John Willey & Sons INC., 2º Edição, 480 pp..

WU, F. F., MONTICELLI, A., 1983, “A Critical Review on External Network Modeling for On-Line Security Analysis”, *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 5, October.

WU, F. F., LIU, W. H. E., 1989, “Detection of Topology Errors by State Estimation ”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 4, no.1, pp. 176 – 183, February.

ZHANG, F., CHENG, C. S., 1997, “A Modified Newton Method for Radial Distribution System Power Flow Analysis”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 12, no.1, pp. 389 – 397, February.

ZHAO, L., ABUR, A., 2005, “Multi Area State Estimation using Synchronized Phasor Measurements”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, no. 2, pp. 611-617, May.

ZIMMERMAN, H. J., 1984, *Fuzzy Set Theory – and Its Application*, 3rd Edition, Boston: Kluwer-Nijhoff Publishing, pp. 281.

YOON, Y. J., 2005, “Study of the Utilization and Benefits of Phasor Measurement Units for Large Scale Power System State Estimation”, Thesis of Master of Science, Texas A&M University, December.

---

---

# APÊNDICE A

---

## PROGRAMAÇÃO FUZZY

---

### A.1 INTRODUÇÃO

Os conjuntos Fuzzy e a lógica Fuzzy foram desenvolvidos por Lotfi Zadeh, (ZIMMERMAN, 1984), e provêm à base para geração de técnicas poderosas para a solução de problemas, com uma vasta aplicabilidade, especialmente, nas áreas de controle e tomada de decisão.

A força da lógica Fuzzy deriva da sua habilidade em inferir conclusões e gerar respostas baseadas em informações vagas, ambíguas e qualitativamente incompletas e imprecisas. Neste aspecto, os sistemas Fuzzy reproduzem o raciocínio humano. Seu comportamento é representado de maneira muito simples e natural, levando à construção de sistemas compreensíveis e de fácil manutenção.

A lógica Fuzzy é baseada na teoria dos conjuntos Fuzzy. Esta é uma generalização da teoria dos Conjuntos Tradicionais para resolver os paradoxos gerados à partir da classificação “verdadeiro ou falso” da lógica Clássica. Tradicionalmente, uma proposição lógica tem dois extremos: ou “completamente verdadeiro” ou “completamente falso”. Entretanto, na lógica Fuzzy, uma premissa varia em grau de verdade de 0 a 1, o que leva a ser parcialmente verdadeira ou parcialmente falsa.

Com a incorporação do conceito de “grau de verdade”, a teoria dos conjuntos Fuzzy estende a teoria dos conjuntos Reais. Os grupos são rotulados qualitativamente e os

elementos destes conjuntos são caracterizados de acordo com o grau de pertinência. Por exemplo, um homem de 1,75 metro e um homem de 1,70 metro são membros do conjunto “alto”, embora o homem de 1,75 metro tenha um grau de pertinência maior neste conjunto. O conceito de pessoa alta pode ser representado graficamente através de sua função de pertinência, como é ilustrado na Figura A.1.

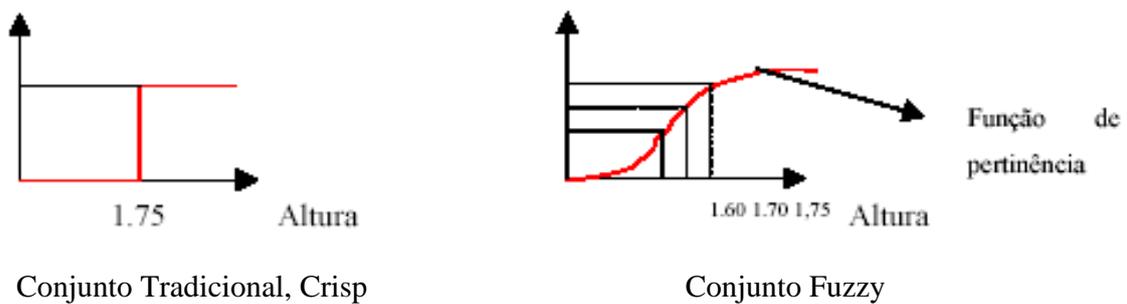


Figura A.1: Representação Fuzzy para uma pessoa alta.

Quanto ao formato da função de pertinência do conjunto Fuzzy, os mais usuais são: triangular, trapezoidal, gaussiana e sino generalizado. A escolha do formato se dá pela experiência ou por procedimentos de otimização. A Figura A.2 ilustra os formatos mencionados.

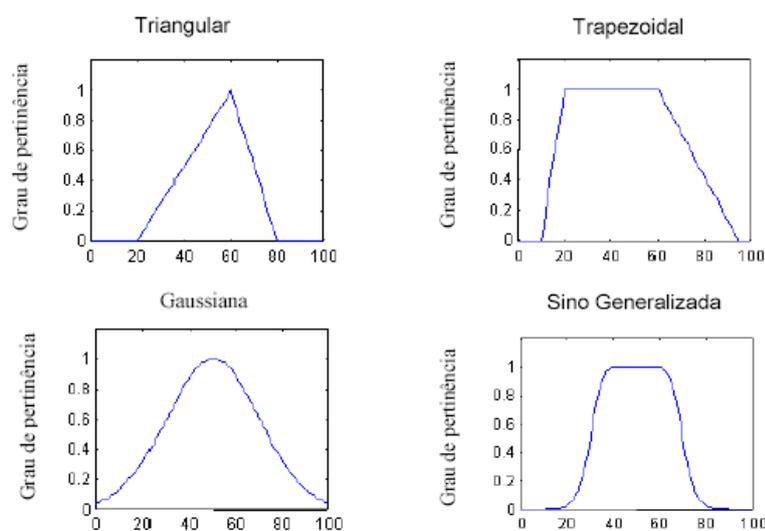


Figura A.2: Formatos típicos de funções de pertinência.

## A.2 OTIMIZAÇÃO FUZZY

Otimização Fuzzy é o nome dado a um conjunto de técnicas utilizadas em problemas de otimização com flexibilidade, aproximação ou incerteza das restrições e objetivos através do uso de números imprecisos, ou números Fuzzy.

A maioria dos modelos convencionais de otimização, programação linear, programação quadrática ou programação não linear, não contemplam certas características encontradas em problemas práticos, como:

- Incertezas nos dados;
- Restrições flexíveis (*soft constraints*);
- Múltiplos objetivos;

No tratamento de incertezas, a abordagem Fuzzy representa uma formulação generalizada de intervalos que são manipulados segundo algumas regras, similarmente ao cálculo de intervalos utilizando  $\alpha$  cuts. Na abordagem da flexibilização, o aspecto Fuzzy representa o grau de satisfação das restrições ou a meta dos objetivos, que apesar de serem essencialmente Crisps, assumem ter alguma flexibilidade que pode ser explorada para melhorar a otimização do objetivo.

A forma geral do problema de otimização Fuzzy considerando a presença de múltiplos objetivos e restrições flexíveis é definida por:

$$\begin{aligned} & \max_{x \in X} \text{imização Fuzzy } [f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)] & (A.1) \\ & \text{sujeito a: } g_i(x) \leq_{\sim} 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \end{aligned}$$

Na equação (B.1), o símbolo ( $\leq_{\sim}$ ) denota uma flexibilidade das restrições, nesse caso indicando que  $g_i(x)$  pode ser satisfeito num grau menor do que 0.

Considerando um problema de tomada de decisão em que as alternativas são todos os valores de  $x \in X$ , uma função objetivo  $F_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$  é um subconjunto de  $X$ . Para cada elemento  $F_j(f_j(x))$ ,  $x \in X$ , existe um grau de satisfação da função objetivo  $f_j$  dada pela solução alternativa  $x \in X$ , de forma que  $F_j$  assume valores em  $[0, 1]$ . Da mesma forma, um número de restrições Fuzzy,  $G_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$  pode ser definido como um subconjunto de  $X$ . Seus elementos, funções de  $G_i(g_i(x))$ , denotam o grau de satisfação da restrição Fuzzy  $g_i$  pela decisão alternativa  $x \in X$ . De acordo com o modelo de tomada de decisão de Bellman e Zadeh (ZIMMERMAN, 1984), a decisão Fuzzy  $D(x)$  é definida como a conjunção dos objetivos e restrições, ou seja, uma norma- $t$  de agregação:

$$D(x) = F_1(x) \cap F_2(x) \cap \dots \cap F_n(x) \cap G_1(x) \cap G_2(x) \cap \dots \cap G_m(x) \quad (\text{A.2})$$

A decisão alternativa ótima  $x^*$  é então o argumento que maximiza a decisão Fuzzy, conforme mostrado abaixo:

$$x^* = \arg \sup_{x \in X} D(x) \quad (\text{A.3})$$

Podemos notar que tanto os objetivos quanto as restrições são agregadas. Conseqüentemente, os objetivos e as restrições são tratados de forma equivalente. Este problema é, em geral, não linear, pois as funções de pertinência em geral são não lineares, assim como os operadores de agregação. No entanto, a escolha de determinadas funções de pertinência e agregação reduz o problema ao caso linear, conforme discutido no próximo tópico.

### **A.3 PROGRAMAÇÃO LINEAR FUZZY**

Modelos de programação linear devem ser considerados como um tipo especial de modelo de decisão. O espaço de decisão é definido pelas restrições; o objetivo é definido pela função objetivo; e o tipo de decisão considera a exatidão na solução. O modelo

clássico de programação linear, com  $n$  variáveis de decisão, uma função objetivo e  $m$  restrições, pode ser assim definido:

$$\begin{aligned} \max \text{imize} \quad & f(x) = c^T x && \text{(A.4)} \\ \text{sujeito a} \quad & Ax \leq b \\ & x \geq 0 \\ & \text{com } c, x \in R^n, b \in R^m, A \in R^{m \times n} \end{aligned}$$

Se nós assumirmos um ambiente Fuzzy para tomada de decisões no problema de programação linear, várias possíveis modificações podem existir. Primeiro, o objetivo pode não ser maximizar ou minimizar a função objetivo, mas sim alcançar algum nível de satisfação que não possa ser definido como Crisp. Segundo, as restrições podem ser flexíveis (*soft constraints*), ou seja, o sinal  $\leq$  pode não ter apenas o significado estritamente matemático, mas sim representar algum nível de satisfação, permitindo pequenas violações, e encontrando soluções aceitáveis para situações que não se verificariam na literatura clássica de programação linear. Desta forma, os coeficientes dos vetores  $b$  e  $c$  ou da matriz  $A$  podem apresentar características Fuzzy, porque são Fuzzy em sua natureza ou devido à percepção deles ser Fuzzy.

A partir destas conclusões foram desenvolvidos modelos específicos de programação linear em um ambiente Fuzzy, considerando funções objetivo Crisp ou Fuzzy. O modelo de programação linear Fuzzy difere-se do modelo clássico de programação linear por permitir muitas variações possíveis de modelos, dependendo das considerações ou características a serem modeladas da situação real. A técnica de programação linear Fuzzy oferece um grande número de caminhos que permitem que diferentes tipos de incertezas possam ser representados.

### A.3.1 Programação Linear Fuzzy com Função Objetivo Simétrica

A programação linear Fuzzy pode ser vista como um caso especial da forma geral de otimização Fuzzy, definida pela equação (A.3). O problema geral de programação linear Fuzzy com flexibilidade nos coeficientes das restrições, é formulado como:

$$\begin{aligned} -c^T x &\leq_{\sim} -z & (A.5) \\ Ax &\leq_{\sim} b \\ x &\geq 0 \end{aligned}$$

Os símbolos  $\leq_{\sim}$  e  $\geq_{\sim}$  são a versão fuzzificada de  $\leq$  e  $\geq$  e têm a seguinte interpretação lingüística; “essencialmente menor que ou igual a” e “essencialmente maior que ou igual a”. Em outras palavras, a solução do problema de programação linear tentará fazer com que o vetor solução  $x$  seja tal que o valor da função objetivo seja o mais próximo de  $z$  e que as restrições violem o mínimo possível os limites representados pelas componentes de  $b$ .

Em virtude da função objetivo e das restrições da equação (A.5) serem todas de natureza Fuzzy, as seguintes transformações podem ser aplicadas,  $\begin{pmatrix} -c \\ A \end{pmatrix} = B$  e  $\begin{pmatrix} -z \\ b \end{pmatrix} = d$ , de forma a se obter o seguinte problema de programação linear Fuzzy:

$$\begin{aligned} Bx &\leq_{\sim} d & (A.6) \\ x &\geq 0 \end{aligned}$$

Cada uma das linhas do modelo descrito em (A.6) é representado por conjuntos Fuzzy, com funções de pertinência descritas por  $\mu_i(x)$ .  $\mu_i(x)$  representa o grau que  $x$  satisfaz o objetivo e as restrições Fuzzy. De acordo com (ZIMMERMAN, 1984), a função de pertinência do conjunto de decisão Fuzzy do modelo dado em (A.6) é:

$$\mu_D(x) = \min_i \{ \mu_i(x) \} \quad (A.7)$$

A solução ótima para o problema de programação linear Fuzzy, introduzida por Bellman e Zadeh, pode ser assim enunciado e formulado matematicamente (ZIMMERMAN, 1984):

“O conjunto decisão, no qual está contida a solução, é a interseção dos conjuntos Fuzzy associados à função objetivo e às restrições. A solução do problema é o ponto com máxima pertinência ao conjunto decisão”.

$$\max_{x \geq 0} \mu_D(x) = \max_{x \geq 0} \min_i \{ \mu_i(x) \} \quad (\text{A.8})$$

O processo de maximização da função de pertinência do conjunto de decisão Fuzzy representa a defuzzificação da solução de (A.7), uma vez que o interesse não é obter uma solução ótima Fuzzy, mas sim uma solução ótima Crisp.

O valor de  $\mu_i(x)$  deve variar de 0, caso as restrições sejam fortemente violadas, a 1, caso as restrições sejam muito bem atendidas. Funções de pertinência lineares são, obviamente, apenas aproximações, mas qualquer tipo de função que seja monotonicamente crescente ou decrescente no intervalo  $|d_i, d_i + p_i|$  pode ser utilizada como função de pertinência para representação de grandezas Fuzzy. Os formatos trapezoidal, triangular e Gaussiano são os mais frequentemente utilizados para representação de funções de pertinência, porém outros formatos podem ser considerados, sendo definidos de acordo com a aplicação que se propõe.

Para o tipo mais simples de função de pertinência, ilustrada na Figura A.3, e assumindo um decremento linear para valores abaixo do intervalo de tolerância,  $d_i$ , tem-se a seguinte relação para  $\mu_i(x)$ :

$$\mu_i(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } B_i x \leq d_i \\ 1 - \frac{B_i x - d_i}{p_i} & \text{se } d_i < B_i x \leq d_i + p_i \\ 0 & \text{se } B_i x > d_i + p_i \end{cases} \quad (\text{A.9})$$

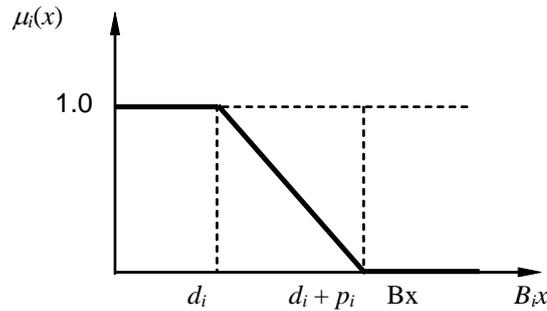


Figura A.3: Função de pertinência para uma grandeza Fuzzy qualquer.

O valor de  $p_i$  é subjetivamente escolhido constante, definindo a faixa de violações admissíveis das restrições e da função objetivo.

Introduzindo a nova variável,  $\lambda$ , a qual corresponde à minimização do conjunto de funções de pertinência do conjunto de decisão Fuzzy, descrito em (A.7), e de acordo com o enunciado de Bellman e Zadeh, o modelo equivalente crisp para o problema de programação linear Fuzzy passa a ser assim definido:

$$\begin{aligned} & \text{maximize } \lambda && \text{(A.10)} \\ & \text{sujeito a } \lambda p_i + B_i x \leq d_i + p_i, \quad i = 1, \dots, m+1 \\ & x, \lambda \geq 0 \end{aligned}$$

A solução ótima do problema descrito em (A.10) é o vetor  $(\lambda^*, x^*)$ .  $x^*$  é a solução maximizada de (A.8) para o modelo apresentado em (A.6), para as funções de pertinência especificadas em (A.9), e pode ser considerado como uma solução de compromisso na satisfação da função objetivo e restrições, enquanto  $\lambda^*$  é interpretado como o grau de compromisso alcançado pela solução. Se  $\lambda^*$  é próximo de zero, significa que não foi possível conciliar a função objetivo e restrições. Contudo, se  $\lambda^*$  é próximo da unidade, a solução satisfaz quase plenamente a função objetivo e as restrições.

Caso se verifique a existência de algumas restrições Crisp no problema,  $Dx \leq b$ , estas podem facilmente ser incorporadas à formulação descrita em (A.10). Para tal situação, tem-se o seguinte problema Crisp de programação linear Fuzzy.

$$\begin{aligned}
& \max imize \quad \lambda && (A.11) \\
& \text{sujeito a} \quad \lambda p_i + B_i x \leq d_i + p_i, \quad i = 1, \dots, m+1 \\
& \quad \quad \quad Dx \leq b \\
& \quad \quad \quad \lambda, x \geq 0 \\
& \quad \quad \quad \lambda \leq 1
\end{aligned}$$

Versões modificadas para (A.10) são encontradas quando a função de pertinência dada em (A.9) ou a norma-t utilizada para agregação é alterada.

### A.3.2 Programação Linear Fuzzy com Função Objetivo Não - Simétrica

Um modelo na qual a função objetivo a ser maximizada ou minimizada é Crisp, e na qual as restrições são todas ou parte delas Fuzzy, simétricas, torna as aproximações descritas nas equações (A.5) e (A.6) não aplicáveis. O fato da função objetivo do problema ser Crisp, cria uma assimetria no problema de programação linear Fuzzy. O problema está no escalonamento da função objetivo, com domínio não normalizado, quando agregada com restrições de domínio normalizado.

Conforme descrito em (ZIMMERMAN, 1984), o problema da função objetivo não simétrica em um problema de programação linear Fuzzy, está na determinação dos extremos de uma função Crisp acima do domínio Fuzzy. Em (ZIMMERMAN, 1984) são apresentadas aproximações para a solução de tal problema, que se baseiam nas seguintes premissas:

- Determinação do conjunto Fuzzy de decisão;
- Determinação de uma decisão máxima Crisp.

A determinação do conjunto Fuzzy de decisão corresponde a obtenção do valor ótimo para a função objetivo dentro do espaço de decisão Fuzzy; enquanto que a determinação de uma decisão máxima Crisp corresponde a obtenção de uma solução para a função objetivo Crisp nos pontos de pertinência máxima e mínima dentro do conjunto Fuzzy de decisão.

Retornando ao modelo descrito na equação (A.5) e modificando o mesmo por considerar a função objetivo como Crisp, não-simétrica, e adicionando o conjunto de restrições Crisps,  $Dx \leq b'$ , tem-se:

$$\begin{aligned} \max \text{imize} \quad & f(x) = c^T x & (A.12) \\ \text{sujeito a} \quad & A_i x \leq b_i, i = 1, \dots, m+1 \\ & Dx \leq b' \\ & x \geq 0 \end{aligned}$$

A função de pertinência dos conjuntos Fuzzy é definida analogamente a equação (A.9), como:

$$\mu_i(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } A_i x \leq b_i \\ \frac{b_i + p_i - A_i x}{p_i} & \text{se } b_i < A_i x < b_i + p_i \\ 0 & \text{se } A_i x > b_i + p_i \end{cases} \quad (A.13)$$

A representação da função de pertinência da função objetivo não simétrica, é realizada resolvendo os dois seguintes problemas de programação linear Crisp:

$$\begin{aligned} \max \text{imize} \quad & f(x) = c^T x & (A.14) \\ \text{sujeito a} \quad & A_i x \leq b_i, i = 1, \dots, m+1 \\ & Dx \leq b' \\ & x \geq 0 \end{aligned}$$

Resultando no supremo de  $f(x)$  acima desta região,  $(c^T x)_{otimo} = f_0$ .

$$\begin{aligned} \max \text{imize} \quad & f(x) = c^T x & (A.15) \\ \text{sujeito a} \quad & A_i x \leq b_i + p_i, i = 1, \dots, m+1 \\ & Dx \leq b' \\ & x \geq 0 \end{aligned}$$

Resultando em  $(c^T x)_{otimo} = f_1$ .

A função de pertinência da função objetivo não simétrica é então denotada por:

$$\mu_G(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } f_1 \leq c^T x \\ \frac{c^T x - f_0}{f_1 - f_0} & \text{se } f_0 < c^T x < f_1 \\ 0 & \text{se } c^T x \leq f_0 \end{cases} \quad (\text{A.16})$$

Com a determinação dos extremos da função objetivo Crisp, no espaço de decisão Fuzzy, simetria entre as restrições e a função objetivo foi alcançada, permitindo que uma formulação equivalente à expressa em (A.10) possa ser utilizada para resolver o problema de programação linear Fuzzy com função objetivo não-simétrica. Na equação (A.17) é mostrado o modelo equivalente:

$$\begin{aligned} \max \text{imize } & \lambda & (\text{A.17}) \\ \text{sujeito a } & \lambda(f_1 - f_0) + c^T x \leq f_1 \\ & \lambda p_i + A_i x \leq b_i + p_i, i = 1, \dots, m+1 \\ & Dx \leq b' \\ & \lambda, x \geq 0 \\ & \lambda \leq 1 \end{aligned}$$

O ponto notável no problema de programação linear Fuzzy é o fato de ser resolvido como um problema de programação linear convencional, mediante o acréscimo de apenas uma variável adicional,  $\lambda$ ; além de permitir que a função objetivo e as restrições recebam o mesmo tratamento, ou seja, são representadas por conjuntos que são processados de forma similar. Caso existam restrições não Fuzzy, essas são incluídas em (A.11) ou (A.17) como restrições de igualdade ou desigualdade.

#### **A.4 PROGRAMAÇÃO QUADRÁTICA FUZZY COM FUNÇÃO OBJETIVO NÃO - SIMÉTRICA**

O modelo para a solução de um problema de programação quadrática Fuzzy segue as premissas do modelo empregado na solução de um problema de programação linear Fuzzy

com função objetivo não simétrica, diferindo na função objetivo do problema de programação Fuzzy que é agora quadrática.

A função de pertinência dos conjuntos Fuzzy é definida analogamente a equação (A.9), como:

$$\mu_i(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } A_i x \leq b_i \\ \frac{b_i + p_i - A_i x}{p_i} & \text{se } b_i < A_i x < b_i + p_i \\ 0 & \text{se } A_i x > b_i + p_i \end{cases} \quad (\text{A.18})$$

O problema de programação quadrática Fuzzy com função objetivo não – simétrica pode ser assim enunciado:

$$\begin{aligned} \max \text{imize} \quad & z = \left( \frac{1}{2} s^T Q s \right) \\ \text{sujeito a} \quad & A_i x \leq b_i, i = 1, \dots, m+1 \\ & x \geq 0 \\ & \text{com } s, Q, x \in R^n, b \in R^m, A \in R^{m \times n} \end{aligned} \quad (\text{A.19})$$

O termo  $s$  é um vetor com os resíduos de estimação do problema de programação quadrática Crisp.  $Q$  é uma matriz positiva semidefinida, representando as ponderações do inverso das covariâncias das grandezas,  $R$ , com dimensão  $m \times 1$ .

$$Q = \left[ \frac{1}{R_1}, \frac{1}{R_2}, \dots, \frac{1}{R_m} \right]^T \quad (\text{A.20})$$

Como a função objetivo do problema é de natureza Crisp, assimetria entre a função objetivo e as restrições Fuzzy é criada, impossibilitando que ambas sejam tratadas de forma semelhante no problema de programação Fuzzy. Sendo assim, a função objetivo do problema Crisp deve ser fuzzificada, semelhante ao realizado no problema de programação linear Fuzzy com função objetivo não simétrica. A determinação dos extremos da função objetivo Crisp, não simétrica, no espaço de decisão Fuzzy, é obtido mediante a solução de dois problemas de programação quadrática Crisp.

O limite inferior ( $f_0$ ) da função objetivo não simétrica, no espaço de decisão Fuzzy, é obtido resolvendo-se o seguinte problema de programação quadrática Crisp:

$$\begin{aligned}
 f_0 = \max \text{imize} \quad & z = \left( \frac{1}{2} s^T Q s \right) \\
 \text{sujeito a} \quad & A_i x \leq b_i, \quad i = 1, \dots, m+1 \\
 & x \geq 0
 \end{aligned} \tag{A.21}$$

De forma similar, o limite superior ( $f_1$ ) da função objetivo não simétrica, no espaço de decisão Fuzzy, é obtido resolvendo-se o problema de programação quadrática Crisp abaixo, onde as variáveis submetidas a restrições de desigualdade têm seus limites deslocados em função de  $p$ .

$$\begin{aligned}
 f_1 = \max \text{imize} \quad & z = \left( \frac{1}{2} s^T Q s \right) \\
 \text{sujeito a} \quad & A_i x \leq b_i + p_i, \quad i = 1, \dots, m+1 \\
 & x \geq 0
 \end{aligned} \tag{A.22}$$

Com a determinação dos limites no espaço de decisão Fuzzy da função objetivo Crisp do problema, simetria entre o conjunto de restrições e a função objetivo é alcançada. Desta forma, resolve-se um problema de otimização na qual a função objetivo e todas as restrições de grandezas Fuzzy são lineares, exceto uma restrição que é não linear, relativa a função objetivo do problema de programação quadrática Crisp. Este problema é assim descrito:

$$\begin{aligned}
 \max \text{imize} \quad & \lambda \\
 \text{sujeito a} \quad & \lambda (f_1 - f_0) + \frac{1}{2} s^T Q s \leq f_1 \\
 & \lambda p + Ax \leq b + p \\
 & 0 \leq \lambda \leq 1 \\
 & x \geq 0
 \end{aligned} \tag{A.23}$$

O problema descrito em (A.23) apresenta uma variável de estado adicional,  $\lambda$ . A proximidade de  $\lambda$  ao valor unitário indica uma maior satisfação no atendimento às restrições.

---

---

# APÊNDICE B

---

## DADOS ELÉTRICOS DOS SISTEMAS TESTE

---

### B.1 IEEE 14 BARRAS

Tabela B.1: Dados de barra, geração e carregamento para o sistema IEEE 14 barras.

Barra	V (p.u.)	$\Theta$ (p.u.)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (MVar)	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (MVar)	$G^{sh}$ (MW)	$B^{sh}$ (MVar)
1	1.06	0	232.53	-22.51	0	0	0.0	0.0
2	1.045	-4.957	40	30.76	21.7	12.7	0.0	0.0
3	1.01	-12.633	0	20.05	94.2	19	0.0	0.0
4	1.026	-10.366	0	0	47.8	-3.9	0.0	0.0
5	1.033	-8.947	0	0	7.6	1.6	0.0	0.0
6	1.07	-14.879	0	49.12	11.2	7.5	0.0	0.0
7	1.045	-13.45	0	0	0	0	0.0	0.0
8	1.09	-13.45	0	27.96	0	0	0.0	0.0
9	1.028	-15.07	0	0	29.5	16.6	0.0	19.0
10	1.028	-15.318	0	0	9	5.8	0.0	0.0
11	1.045	-15.213	0	0	3.5	1.8	0.0	0.0
12	1.053	-15.72	0	0	6.1	1.6	0.0	0.0
13	1.046	-15.738	0	0	13.5	5.8	0.0	0.0
14	1.017	-16.394	0	0	14.9	5	0.0	0.0

Tabela B.2: Dados de linha e fluxos de potência para o sistema IEEE 14 barras.

Linha	Barra De - Para	r (p.u.)	x (p.u.)	$B^{sh}$ (p.u.)	Fluxo Ativo (MW)	Fluxo Reativo (MVar)
1	1 - 2	0.01938	0.05917	0.05280	156.09	-20.22
2	1 - 5	0.05403	0.22304	0.04920	76.43	-2.29
3	2 - 3	0.04699	0.19797	0.04380	72.64	3.62
4	2 - 4	0.05811	0.17632	0.03740	55.85	-6.35
5	2 - 5	0.05695	0.17388	0.03400	41.65	-6.57
6	3 - 4	0.06701	0.17103	0.03460	-23.85	-0.34
7	4 - 5	0.01335	0.04211	0.01280	-60.97	4.25
8	4 - 7	0.0	0.20912	0.0	27.58	-8.44
9	4 - 9	0.0	0.55618	0.0	15.55	0.35
10	5 - 6	0.0	0.25202	0.0	45.31	-12.98
11	6 - 11	0.09498	0.19890	0.0	7.91	9.71
12	6 - 12	0.12291	0.25581	0.0	8.04	3.29
13	6 - 13	0.06615	0.13027	0.0	18.16	10.4
14	7 - 8	0.0	0.17615	0.0	0	-26.8
15	7 - 9	0.0	0.11001	0.0	27.58	16.71
16	9 - 10	0.03181	0.08450	0.0	4.78	-1.68
17	9 - 14	0.12711	0.27038	0.0	8.85	-0.18
18	10 - 11	0.08205	0.19207	0.0	-4.23	-7.5
19	12 - 13	0.22092	0.19988	0.0	1.86	1.52
20	13 - 14	0.17093	0.34802	0.0	6.25	5.61

## B.2 IEEE 30 BARRAS

Tabela B.3: Dados de barra, geração e carregamento para o sistema IEEE 30 barras.

Barra	V (p.u.)	$\Theta$ (p.u.)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (MVar)	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (MVar)	$G^{sh}$ (MW)	$B^{sh}$ (MVar)
1	1.06	0	25.94	35.23	0	0	0	0
2	1.043	-0.067	60.97	0.11	21.7	12.7	0	0
3	1.032	-1.185	0	0	2.4	1.2	0	0
4	1.027	-1.394	0	0	7.6	1.6	0	0
5	1.026	-1.397	0	0	0	0	0	19.0
6	1.018	-1.761	0	0	0	0	0	0
7	1.012	-2.116	0	0	22.8	10.9	0	0
8	1.005	-2.172	0	0	30	30	0	0
9	1.02	-2.397	0	0	0	0	0	0
10	1.022	-2.729	0	0	5.8	2	0	0
11	1.02	-2.397	0	0	0	0	0	0
12	1.038	-1.311	0	0	11.2	7.5	0	0
13	1.071	1.36	37	26.13	0	0	0	0
14	1.025	-1.945	0	0	6.2	1.6	0	0
15	1.024	-1.776	0	0	8.2	2.5	0	0
16	1.024	-2.199	0	0	3.5	1.8	0	0
17	1.017	-2.782	0	0	9	5.8	0	0
18	1.011	-2.835	0	0	3.2	0.9	0	0
19	1.006	-3.272	0	0	9.5	3.4	0	0
20	1.009	-3.191	0	0	2.2	0.7	0	0
21	1.028	-2.764	0	0	17.5	11.2	0	0
22	1.033	-2.652	21.59	34.13	0	0	0	0
23	1.027	-0.712	19.2	1.16	3.2	1.6	0	0
24	1.018	-1.838	0	0	8.7	6.7	0	4.0
25	1.016	-0.987	0	0	0	0	0	0
26	0.998	-1.413	0	0	3.5	2.3	0	0

27	1.023	-0.196	26.91	-3.01	0	0	0	0
28	1.017	-1.702	0	0	0	0	0	0
29	1.003	-1.438	0	0	2.4	0.9	0	0
30	0.992	-2.308	0	0	10.6	1.9	0	0

Tabela B.4: Dados de linha e fluxos de potência para o sistema IEEE 30 barras.

Linha	Barra De-Para	r (p.u.)	x (p.u.)	$B^{sh}$ (p.u.)	Fluxo Ativo (De – Para) (MW)	Fluxo Reativo (De – Para) (MVar)	Fluxo Ativo (Para - De) (MW)	Fluxo Reativo (Para - De) (MVar)
1	1- 2	0.0192	0.0575	0.0528	10.96	24.7	-10.82	-27.58
2	1 – 3	0.0452	0.1652	0.0408	14.98	10.54	-14.82	-12.12
3	2 – 4	0.057	0.1737	0.0368	16.14	3.31	-15.99	-5.01
4	3 – 4	0.0132	0.0379	0.0084	12.42	10.92	-12.39	-10.82
5	2 – 5	0.0472	0.1983	0.0418	13.76	4.25	-13.66	-5.99
6	2 – 6	0.0581	0.1763	0.0374	20.19	7.21	-19.93	-8.55
7	4 – 6	0.0119	0.0414	0.009	21.37	18.63	-21.3	-18.33
8	5 – 7	0.046	0.116	0.0204	13.66	6.19	-13.55	-6.96
9	6 – 7	0.0267	0.082	0.017	9.28	2.98	-9.25	-3.94
10	6 – 8	0.012	0.042	0.009	24.65	25.21	-24.53	-24.73
11	6 – 9	0	0.208	0	5.49	-1.38	-5.49	1.44
12	6 – 10	0	0.556	0	3.14	-0.79	-3.14	0.84
13	9 – 11	0	0.208	0	0	0	0	0
14	9 – 10	0	0.11	0	5.49	-1.44	-5.49	1.48
15	4 – 12	0	0.256	0	-0.6	-4.4	0.6	4.45
16	12 – 13	0	0.14	0	-37	-23.62	37	26.13
17	12 – 14	0.1231	0.2559	0	5.76	2.66	-5.71	-2.56
18	12 – 15	0.0662	0.1304	0	9.85	5.97	-9.76	-5.81
19	12 – 16	0.0945	0.1987	0	9.6	3.04	-9.52	-2.85
20	14 – 15	0.221	0.1997	0	-0.49	0.96	0.49	-0.96
21	16 - 17	0.0524	0.1923	0	6.02	1.05	-5.99	-0.98
22	15 – 18	0.1073	0.2185	0	9.48	1.57	-9.38	-1.37

23	18 – 19	0.0639	0.1292	0	6.18	0.47	-6.16	-0.42
24	19 – 20	0.034	0.068	0	-3.34	-2.98	3.35	2.99
25	10 – 20	0.0936	0.209	0	5.58	3.78	-5.55	-3.69
26	10 – 17	0.0324	0.0845	0	3.02	4.84	-3.01	-4.82
27	10 – 21	0.0348	0.0749	0	-2.13	-7.15	2.14	7.18
28	10 – 22	0.0727	0.1499	0	-3.65	-5.8	3.68	5.87
29	21 – 22	0.0116	0.0236	0	-19.64	-18.38	19.71	18.52
30	15 – 23	0.1	0.202	0	-8.41	2.71	8.49	-2.56
31	22 – 24	0.115	0.179	0	-1.81	9.74	1.92	-9.58
32	23 – 24	0.132	0.27	0	7.51	-0.2	-7.44	0.35
33	24 – 25	0.1885	0.3292	0	-3.17	2.57	3.2	-2.52
34	25 – 26	0.2544	0.38	0	3.54	2.37	-3.5	-2.3
35	25 – 27	0.1093	0.2087	0	-6.75	0.15	6.8	-0.06
36	28 – 27	0	0.396	0	-6.83	-1.44	6.83	1.63
37	27 – 29	0.2198	0.4153	0	6.17	1.67	-6.08	-1.51
38	27 – 30	0.3202	0.6027	0	7.11	1.66	-6.95	-1.35
39	29 – 30	0.2399	0.4533	0	3.68	0.61	-3.65	-0.55
40	8 - 28	0.0636	0.2	0.0428	-5.47	-5.27	5.5	3.32
41	6 – 28	0.0169	0.0599	0.013	-1.33	0.84	1.33	-1.87

### B.3 IEEE 118 BARRAS

Tabela B.5: Dados de barra, geração e carregamento para o sistema IEEE 118 barras.

Barra	V (p.u)	$\Theta$ (p.u.)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (MVar)	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (MVar)
1	0.955	-21.947	0	1.51	51	27
2	0.971	-21.411	0	0	20	9
3	0.967	-21.058	0	0	39	10
4	0.998	-17.331	0	22.03	39	12
5	1.001	-16.872	0	0	0	0
6	0.99	-19.624	0	21.32	52	22
7	0.989	-20.072	0	0	19	2
8	1.015	-11.753	0	32.46	28	0
9	1.043	-4.499	0	0	0	0
10	1.05	3.082	450	-51.04	0	0
11	0.985	-19.913	0	0	70	23
12	0.99	-20.437	85	93.85	47	10
13	0.968	-21.305	0	0	34	16
14	0.984	-21.171	0	0	14	1
15	0.97	-21.514	0	17.43	90	30
16	0.983	-20.74	0	0	25	10
17	0.991	-18.925	0	0	11	3
18	0.973	-21.208	0	36.41	60	34
19	0.962	-21.676	0	-14.29	45	25
20	0.957	-20.804	0	0	18	3
21	0.958	-19.221	0	0	14	8
22	0.969	-16.671	0	0	10	5
23	0.999	-11.761	0	0	7	3
24	0.992	-11.895	0	-16.57	13	0
25	1.05	-4.837	220	166.34	0	0
26	1.015	-2.988	314	-130.37	0	0
27	0.968	-17.403	0	3.97	71	13
28	0.962	-19.127	0	0	17	7
29	0.963	-20.118	0	0	24	4
30	1.009	-13.796	0	0	0	0
31	0.967	-20.001	7	35.17	43	27
32	0.963	-17.944	0	-16.3	59	23
33	0.97	-22.12	0	0	23	9
34	0.984	-21.487	0	25.53	59	26
35	0.98	-21.934	0	0	33	9
36	0.98	-21.94	0	12.16	31	17
37	0.988	-20.986	0	0	0	0

38	1.002	-15.69	0	0	0	0
39	0.969	-24.424	0	0	27	11
40	0.97	-25.526	0	31.66	66	23
41	0.967	-25.971	0	0	37	10
42	0.985	-24.372	0	41.04	96	23
43	0.97	-21.476	0	0	18	7
44	0.967	-18.836	0	0	16	8
45	0.974	-17.049	0	0	53	22
46	1.005	-14.441	19	17.54	28	10
47	1.017	-12.223	0	0	34	0
48	1.015	-12.892	0	0	20	11
49	1.025	-12.009	204	135.01	87	30
50	1.001	-14.051	0	0	17	4
51	0.967	-16.674	0	0	17	8
52	0.957	-17.629	0	0	18	5
53	0.946	-18.607	0	0	23	11
54	0.955	-17.697	48	3.92	113	32
55	0.952	-17.988	0	4.66	63	22
56	0.954	-17.801	0	-2.28	84	18
57	0.971	-16.592	0	0	12	3
58	0.959	-17.449	0	0	12	3
59	0.985	-13.61	155	119.21	277	113
60	0.993	-9.818	0	0	78	3
61	0.995	-8.926	160	-38.94	0	0
62	0.998	-9.541	0	1.27	77	14
63	0.993	-10.188	0	0	0	0
64	0.998	-8.453	0	0	0	0
65	1.005	-5.309	391	-260	0	0
66	1.05	-5.478	392	196.3	39	18
67	1.02	-8.122	0	0	28	7
68	1.012	-5.483	0	0	0	0
69	1.035	-3	513.29	68.17	0	0
70	0.991	-10.447	0	0.66	66	20
71	0.99	-10.808	0	0	0	0
72	0.98	-11.875	0	-13.07	12	0
73	0.991	-10.98	0	1.91	6	0
74	0.991	-11.815	0	65.72	68	27
75	0.983	-10.318	0	0	47	11
76	0.943	-11.2	0	-9.47	68	36
77	1.006	-6.331	0	28.39	61	28
78	1.002	-6.613	0	0	71	26
79	1.004	-6.281	0	0	39	32
80	1.04	-4.114	477	225.06	130	26
81	1.028	-5.038	0	0	0	0
82	0.98	-5.663	0	0	54	27

83	0.976	-4.454	0	0	20	10
84	0.977	-2.017	0	0	11	7
85	0.985	-0.52	0	4.38	24	15
86	0.987	-1.89	0	0	21	10
87	1.015	-1.63	4	11.02	0	0
88	0.987	2.609	0	0	48	10
89	1.005	6.664	607	-5.91	0	0
90	0.985	0.253	0	59.31	163	42
91	0.98	0.264	0	-13.09	10	0
92	0.99	0.793	0	-11.82	65	10
93	0.985	-2.227	0	0	12	7
94	0.988	-4.387	0	0	30	16
95	0.978	-5.347	0	0	42	31
96	0.988	-5.493	0	0	38	15
97	1.009	-5.154	0	0	15	9
98	1.024	-5.669	0	0	34	8
99	1.01	-6.034	0	-17.54	42	0
100	1.017	-5.04	252	98.58	37	18
101	0.991	-3.448	0	0	22	15
102	0.989	-0.725	0	0	5	3
103	1.01	-8.781	40	75.42	23	16
104	0.971	-11.351	0	2.39	38	25
105	0.965	-12.456	0	0.29	31	26
106	0.961	-12.716	0	0	43	16
107	0.952	-15.516	0	12	50	12
108	0.966	-13.656	0	0	2	1
109	0.967	-14.108	0	0	8	3
110	0.973	-14.955	0	5.96	39	30
111	0.98	-13.31	36	-1.84	0	0
112	0.975	-18.054	0	41.51	68	13
113	0.993	-19.001	0	20.28	6	0
114	0.96	-18.28	0	0	8	3
115	0.96	-18.288	0	0	22	7
116	1.005	-5.87	0	-174.18	184	0
117	0.974	-21.978	0	0	20	8
118	0.958	-11.18	0	0	33	15

Tabela B.6: Dados de linha e fluxos de potência para o sistema IEEE 118 barras.

Linha	Barra De-Para	r (p.u.)	x (p.u.)	$B^{sh}$ (p.u.)	Fluxo Ativo (De – Para) (MW)	Fluxo Reativo (De – Para) (MVar)	Fluxo Ativo (Para - De) (MW)	Fluxo Reativo (Para - De) (MVar)
1	1-2	0.0303	0.0999	0.0254	-12.3	-13.06	12.39	11.02
2	1-3	0.0129	0.0424	0.0108	-38.7	-16.55	38.95	16.37
3	4-5	0.0018	0.0079	0.0021	-103.61	-15.47	103.8	16.14
4	3-5	0.0241	0.108	0.0284	-68.24	-13.82	69.48	16.62
5	5-6	0.0119	0.054	0.0143	88.79	2.39	-87.85	0.45
6	6-7	0.0046	0.0208	0.0055	35.85	-4.84	-35.79	4.58
7	8-9	0.0024	0.0305	1.162	-440.64	-89.73	445.25	24.43
8	8-5	0	0.0267	0	339.57	68.07	-339.57	-36.98
9	9-10	0.0026	0.0322	1.23	-445.25	-24.43	450	-51.04
10	4-11	0.0209	0.0688	0.0175	64.61	-0.07	-63.73	1.24
11	5-11	0.0203	0.0682	0.0174	77.5	1.83	-76.28	0.55
12	11-12	0.0059	0.0196	0.0051	34.61	-36.07	-34.46	36.08
13	2-12	0.0187	0.0616	0.0158	-32.39	-20.02	32.68	19.44
14	3-12	0.0484	0.16	0.0406	-9.71	-12.55	9.82	9.01
15	7-12	0.0086	0.034	0.0087	16.79	-6.58	-16.76	5.83
16	11-13	0.0222	0.0731	0.0188	35.4	11.28	-35.08	-12.01
17	12-14	0.0215	0.0707	0.0182	18.68	2.52	-18.6	-4.03
18	13-15	0.0744	0.2444	0.0627	1.08	-3.99	-1.08	-1.89
19	14-15	0.0595	0.195	0.0502	4.6	3.03	-4.57	-7.72
20	12-16	0.0212	0.0834	0.0214	7.9	5.76	-7.88	-7.75
21	15-17	0.0132	0.0437	0.0444	-103.34	-15.21	104.86	15.98
22	16-17	0.0454	0.1801	0.0466	-17.12	-2.25	17.26	-1.74
23	17-18	0.0123	0.0505	0.0129	80.27	16.62	-79.43	-14.41
24	18-19	0.0112	0.0493	0.0114	19.43	16.82	-19.35	-17.54

25	19-20	0.0252	0.117	0.0298	-10.56	5.14	10.6	-7.69
26	15-19	0.012	0.0394	0.0101	11.59	15.7	-11.54	-16.48
27	20-21	0.0183	0.0849	0.0216	-28.6	4.69	28.77	-5.88
28	21-22	0.0209	0.097	0.0246	-42.77	-2.12	43.19	1.77
29	22-23	0.0342	0.159	0.0404	-53.19	-6.77	54.23	7.69
30	23-24	0.0135	0.0492	0.0498	8.26	10.44	-8.23	-15.26
31	23-25	0.0156	0.08	0.0864	-162.41	-26.2	166.6	38.63
32	26-25	0	0.0382	0	90.03	-91.54	-90.03	97.66
33	25-27	0.0318	0.163	0.1764	143.42	30.05	-137.03	-15.29
34	27-28	0.0191	0.0855	0.0216	32.85	-0.59	-32.63	-0.44
35	28-29	0.0237	0.0943	0.0238	15.63	-6.56	-15.55	4.64
36	30-17	0	0.0388	0	230.34	56.53	-230.34	-35.09
37	8-30	0.0043	0.0504	0.514	73.06	-18.87	-72.84	-31.11
38	26-30	0.0079	0.086	0.908	223.97	-39.1	-220.08	-11.95
39	17-31	0.0474	0.1563	0.0399	14.8	8.87	-14.64	-12.16
40	29-31	0.0108	0.0331	0.0083	-8.45	-8.64	8.46	7.91
41	23-32	0.0317	0.1153	0.1173	92.92	5.07	-90.14	-6.26
42	31-32	0.0298	0.0985	0.0251	-29.83	12.39	30.17	-13.59
43	27-32	0.0229	0.0755	0.0193	12.49	1.78	-12.45	-3.44
44	15-33	0.038	0.1244	0.0319	7.39	-3.45	-7.37	0.52
45	19-34	0.0752	0.247	0.0632	-3.54	-10.41	3.6	4.61
46	35-36	0.0022	0.0102	0.0027	0.98	-0.45	-0.98	0.19
47	35-37	0.011	0.0497	0.0132	-33.98	-8.55	34.12	7.9
48	33-37	0.0415	0.142	0.0366	-15.63	-9.52	15.76	6.47
49	34-36	0.0087	0.0268	0.0057	30.11	4.74	-30.02	-5.03
50	34-37	0.0026	0.0094	0.0098	-94.55	-15.7	94.79	15.64
51	38-37	0	0.0375	0	243.67	49.21	-243.67	-26.14

52	37-39	0.0321	0.106	0.027	54.97	1.37	-53.98	-0.67
53	37-40	0.0593	0.168	0.042	44.03	-5.24	-42.85	4.57
54	30-38	0.0046	0.054	0.422	62.57	-13.47	-62.39	-27.08
55	39-40	0.0184	0.0605	0.0155	26.98	-10.33	-26.81	9.4
56	40-41	0.0145	0.0487	0.0122	15.47	1.18	-15.44	-2.21
57	40-42	0.0555	0.183	0.0466	-11.81	-6.46	11.9	2.31
58	41-42	0.041	0.135	0.0344	-21.56	-7.79	21.79	5.24
59	43-44	0.0608	0.2454	0.0607	-16.19	2.8	16.38	-7.72
60	34-43	0.0413	0.1681	0.0423	1.84	5.88	-1.81	-9.8
61	44-45	0.0224	0.0901	0.0224	-32.38	-0.28	32.63	-0.82
62	45-46	0.04	0.1356	0.0332	-36.09	-12.58	36.69	11.36
63	46-47	0.038	0.127	0.0316	-31.04	-1.24	31.4	-0.78
64	46-48	0.0601	0.189	0.0472	-14.65	-2.58	14.77	-1.83
65	47-49	0.0191	0.0625	0.0160	-9.33	-10.91	9.37	9.35
66	42-49	0.0715	0.323	0.086	-64.84	5.23	68.01	0.37
67	42-49	0.0715	0.323	0.086	-64.84	5.23	68.01	0.37
68	45-49	0.0684	0.186	0.0444	-49.54	-8.61	51.34	9.07
69	48-49	0.0179	0.0505	0.0126	-34.77	-9.17	35	8.49
70	49-50	0.0267	0.0752	0.0188	53.74	13.41	-52.95	-13.12
71	49-51	0.0486	0.137	0.0342	66.72	20.42	-64.44	-17.37
72	51-52	0.0203	0.0588	0.0139	28.59	6.24	-28.4	-6.98
73	52-53	0.0405	0.1635	0.0406	10.4	1.98	-10.35	-5.44
74	53-54	0.0263	0.122	0.031	-12.65	-5.56	12.71	3
75	49-54	0.073	0.289	0.0738	37.85	13.06	-36.66	-15.57
76	49-54	0.0869	0.291	0.073	37.83	11.18	-36.46	-13.76
77	54-55	0.0169	0.0707	0.0202	7.1	1.45	-7.09	-3.24
78	54-56	0.0027	0.00955	0.0073	18.61	4.32	-18.59	-4.95

79	55-56	0.0049	0.0151	0.0037	-21.48	-5.8	21.51	5.55
80	56-57	0.0343	0.0966	0.0242	-23.06	-9.07	23.29	7.46
81	50-57	0.0474	0.134	0.0332	35.95	9.12	-35.29	-10.46
82	56-58	0.0343	0.0966	0.0242	-6.73	-3.66	6.75	1.51
83	51-58	0.0255	0.0719	0.0179	18.85	3.13	-18.75	-4.51
84	54-59	0.0503	0.2293	0.0598	-30.29	-7.53	30.81	4.27
85	56-59	0.0825	0.251	0.0569	-27.89	-4.2	28.6	1.01
86	56-59	0.0803	0.239	0.0536	-29.24	-3.94	29.99	1.15
87	55-59	0.0474	0.2158	0.0564 6	-34.43	-8.29	35.07	5.89
88	59-60	0.0317	0.145	0.0376	-43.43	3.61	44.06	-4.42
89	59-61	0.0328	0.15	0.0388	-51.84	5.07	52.76	-4.64
90	60-61	0.0026	0.0135	0.0146	-112.12	8.52	112.46	-8.23
91	60-62	0.0123	0.0561	0.0147	-9.94	-7.1	9.95	5.73
92	61-62	0.0082	0.0376	0.0098	25.42	-13.84	-25.35	13.18
93	63-59	0	0.0386	0	151.2	23.97	-151.2	-14.79
94	63-64	0.0017	0.02	0.216	-151.2	-23.97	151.6	7.24
95	64-61	0	0.0268	0	30.64	12.52	-30.64	-12.23
96	38-65	0.0090	0.0986	1.046	-181.28	-22.14	184.31	-50.04
97	64-65	0.0027	0.0302	0.38	-182.24	-19.76	183.14	-8.3
98	49-66	0.018	0.0919	0.0248	-132.09	4.28	135.09	8.34
99	49-66	0.018	0.0919	0.0248	-132.09	4.28	135.09	8.34
100	62-66	0.0482	0.218	0.0578	-37.23	-17.24	38	14.66
101	62-67	0.0258	0.117	0.031	-24.37	-14.39	24.57	12.13
102	65-66	0	0.037	0	8.41	-122.22	-8.41	127.72
103	66-67	0.0224	0.1015	0.0268	53.23	19.26	-52.57	-19.13
104	65-68	0.0014	0.016	0.638	15.14	-79.55	-15.11	15.03
105	47-69	0.0844	0.2778	0.0709	-56.07	11.69	58.83	-10.08

106	49-69	0.0985	0.324	0.0828	-46.69	10.72	48.95	-12.08
107	68-69	0	0.037	0	-122.66	-59.36	122.66	66.07
108	69-70	0.03	0.127	0.122	108.69	10.46	-105.3	-8.64
109	24-70	0.0022	0.4115	0.1019	-6.04	-4.67	6.04	-5.2
110	70-71	0.0088	0.0355	0.0088	16.84	-2.85	-16.82	2.1
111	24-72	0.0488	0.196	0.0488	1.26	3.36	-1.24	-8.03
112	71-72	0.0446	0.18	0.0444	10.81	0.95	-10.76	-5.03
113	71-73	0.0087	0.0454	0.0118	6	-3.05	-6	1.91
114	70-74	0.0401	0.1323	0.0337	16.29	-6.38	-16.17	3.46
115	70-75	0.0428	0.141	0.036	0.13	3.74	-0.11	-7.2
116	69-75	0.0405	0.122	0.124	110.89	7.36	-106.17	-5.77
117	74-75	0.0123	0.0406	0.0103	-51.83	35.26	52.32	-34.63
118	76-77	0.0444	0.148	0.0368	-60.32	-21.37	62.33	24.57
119	69-77	0.0309	0.101	0.1038	63.58	6.45	-62.37	-13.31
120	75-77	0.0601	0.1999	0.0498	-34.32	-2.15	35.05	-0.34
121	77-78	0.0037	0.0124	0.0126	46.13	19.92	-46.04	-20.88
122	78-79	0.0055	0.0244	0.0065	-24.96	-5.12	25	4.63
123	77-80	0.017	0.0485	0.0472	-95.84	-37.7	97.6	37.76
124	77-80	0.0294	0.105	0.0228	-144.01	-20.66	144.69	20.68
125	79-80	0.0156	0.0704	0.0187	-64	-36.63	64.83	38.42
126	68-81	0.0018	0.0202	0.808	-46.44	-115.62	46.57	33.04
127	81-80	0	0.037	0	-46.57	-33.04	46.57	34.18
128	77-82	0.0298	0.0853	0.0817	-2.29	27.91	2.59	-35.1
129	82-83	0.0112	0.03665	0.0379	-47.17	23.84	47.51	-26.37
130	83-84	0.0625	0.132	0.0258	-25.18	10.4	25.69	-11.8
131	83-85	0.043	0.148	0.0348	-42.33	5.96	43.16	-6.43
132	84-85	0.0302	0.0641	0.0123	-36.69	4.8	37.12	-5.06

133	85-86	0.035	0.123	0.0276	17.17	-7.35	-17.05	5.09
134	86-87	0.0283	0.2074	0.0445	-3.95	-15.09	4	11.02
135	85-88	0.02	0.102	0.0276	-50.31	7.57	50.85	-7.51
136	85-89	0.0239	0.173	0.047	-71.15	0.65	72.4	3.73
137	88-89	0.0139	0.0712	0.0193	-128.85	-2.49	100.24	7.7
138	89-90	0.0518	0.188	0.0528	58.23	-4.73	-56.49	5.82
139	89-90	0.0238	0.0997	0.106	110.84	-5.44	-107.95	7.08
140	90-91	0.0254	0.0836	0.0214	1.43	4.42	-1.42	-6.46
141	89-92	0.0099	0.0505	0.0548	201.66	-2.11	-197.67	17
142	89-92	0.0393	0.1581	0.0414	63.63	-5.07	-62.05	7.3
143	91-92	0.0387	0.1272	0.0327	-8.58	-6.63	8.62	3.59
144	92-93	0.0258	0.0848	0.0218	57.65	-10.61	-56.75	11.44
145	92-94	0.0481	0.158	0.0406	52.19	-14.17	-50.78	14.82
146	93-94	0.0223	0.0732	0.0188	44.75	-18.44	-44.22	18.36
147	94-95	0.0132	0.0434	0.0111	40.91	11.37	-40.67	-11.63
148	80-96	0.0356	0.182	0.0494	18.7	23.42	-18.36	-26.77
149	82-96	0.0162	0.053	0.0544	-9.42	-15.74	9.46	10.62
150	94-96	0.0269	0.0869	0.023	19.81	-7.19	-19.69	5.32
151	80-97	0.0183	0.0934	0.0254	26.17	28.11	-25.91	-29.44
152	80-98	0.0238	0.108	0.0286	28.92	8.32	-28.71	-10.44
153	80-99	0.0454	0.206	0.0546	19.53	8.17	-19.32	-12.95
154	92-100	0.0648	0.295	0.0472	31.56	-16.54	-30.77	15.39
155	94-100	0.0178	0.058	0.0604	4.27	-53.36	-3.81	48.81
156	95-96	0.0171	0.0547	0.0147	-1.33	-19.37	1.4	18.15
157	96-97	0.0173	0.0885	0.024	-10.81	-22.32	10.91	20.44
158	98-100	0.0397	0.179	0.0476	-5.29	2.44	5.31	-7.3
159	99-100	0.018	0.0813	0.0216	-22.68	-4.59	22.77	2.79

160	100-101	0.0277	0.1262	0.0328	-16.8	22.92	17.04	-25.14
161	92-102	0.0123	0.0559	0.0146	44.71	-8.4	-44.46	8.14
162	101-102	0.0246	0.112	0.0294	-39.04	10.14	39.46	-11.14
163	100-103	0.016	0.0525	0.0536	121.75	-22.15	-119.4	24.36
164	100-104	0.0451	0.204	0.0541	56.18	10.65	-54.73	-9.41
165	103-104	0.0466	0.1584	0.0407	32.45	13.87	-31.85	-15.83
166	103-105	0.0535	0.1625	0.0408	43.35	12.85	-42.25	-13.48
167	100-16	0.0605	0.229	0.062	60.36	9.48	-58.14	-7.12
168	104-105	0.0099	0.0378	0.0099	48.58	2.63	-48.33	-2.61
169	105-106	0.014	0.0547	0.0143	8.86	3.88	-8.85	-5.15
170	105-107	0.053	0.183	0.0472	26.75	-2.37	-26.35	-0.55
171	105-108	0.0261	0.0703	0.0184	23.97	-11.13	-23.77	9.92
172	106-107	0.053	0.183	0.0472	23.98	-3.73	-23.65	0.55
173	108-109	0.0105	0.0288	0.0076	21.77	-10.92	-21.71	10.39
174	103-110	0.0391	0.1813	0.0461	60.6	8.35	-59.15	-6.15
175	109-110	0.0278	0.0762	0.0202	13.71	-13.39	-13.61	11.77
176	110-111	0.022	0.0755	0.02	-35.7	0.96	36	-1.84
177	110-112	0.0247	0.064	0.062	69.46	-30.61	-68	28.51
178	17-113	0.0092	0.0301	0.0077	2.14	-7.65	-2.14	6.91
179	32-113	0.0615	0.203	0.0518	4.03	-17.77	-3.86	13.37
180	32-114	0.0135	0.0612	0.0163	9.39	1.77	-9.38	-3.22
181	27-115	0.0164	0.0741	0.0197	20.7	5.06	-20.62	-6.53
182	114-115	0.0023	0.0104	0.0028	1.38	0.22	-1.38	-0.47
183	68-116	0.0004	0.00405	0.164	184.21	159.96	-184	-174.18
184	12-117	0.0329	0.14	0.0358	20.15	5.2	-20	-8
185	75-118	0.0145	0.0481	0.0119	41.28	38.74	-40.79	-38.25
186	76-118	0.0164	0.0544	0.0136	-7.68	-24.11	7.79	23.25

#### B.4 REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE 33 BARRAMENTOS

O sistema teste de 33 barramentos e 32 circuitos foi apresentado inicialmente em (BARAN, 1989). Este sistema de distribuição apresenta tensão nominal de 12.66 KV, com carregamento de 5084.26 KW e 2547.32 KVAR na base de tensão considerada. Os valores base para a tensão e a potência são, respectivamente, 12.66 kV e 1MW. A barra 33 representa uma subestação abaixadora, e ponto de partida do alimentador, sendo a barra de referência angular.

Tabela B.7: Dados dos circuitos, em p.u., e fluxo de potência, em kW/kvar, para a rede de distribuição de 33 barramentos.

Linha	Barra De - Para	r (p.u.)	x (p.u.)	bsh (p.u.)	Fluxo (kW) (De - Para)	Fluxo (kVar) (De - Para)	Fluxo (kW) (Para -De)	Fluxo (kVar) (Para - De)
1	33 - 1	0.0922	0.0470	0.0784	3920.0	2430.0	-3900.0	-2430.0
2	1 - 2	0.4930	0.2511	0.0689	3440.0	2210.0	-3390.0	-2180.0
3	2 - 3	0.3660	0.1864	0.0473	2360.0	1680.0	-2340.0	-1670.0
4	3 - 4	0.3811	0.1941	0.0445	2220.0	1590.0	-2203.0	-1580.0
5	4 - 5	0.8190	0.7070	0.0429	2140.0	1550.0	-2105.0	-1520.0
6	5 - 6	0.1872	0.6188	0.0219	1090.0	530.0	-1092.4	-520.0
7	6 - 7	0.7114	0.2351	0.0179	890.0	420.0	-888.0	-420.0
8	7 - 8	1.0300	0.7400	0.0138	690.0	320.0	-680.0	-320.0
9	8 - 9	1.0440	0.7400	0.0125	620.0	300.0	-620.4	-290.0
10	9 - 10	0.1966	0.0650	0.0112	560.0	270.0	-560.0	-270.0
11	10 - 11	0.3744	0.1238	0.0103	510.0	240.0	-510.0	-240.0
12	11 - 12	1.4680	1.1550	0.0091	450.0	210.0	-450.0	-210.0
13	12 - 13	0.5416	0.7129	0.0078	390.0	170.0	-390.0	-170.0
14	13 - 14	0.5910	0.5260	0.0054	270.0	90.0	-270.0	-90.0
15	14 - 15	0.7463	0.5450	0.0042	210.0	80.0	-210.0	-80.0
16	15 - 16	1.2990	1.7210	0.0030	150.0	60.0	-150.0	-60.0
17	16 - 17	0.7320	0.5740	0.0018	090.0	40.0	-90.0	-40.0
18	1 - 18	0.1640	0.1565	0.0072	360.0	160.0	-360.0	-160.0
19	18 - 19	1.5042	1.3554	0.0054	270.0	120.0	-270.0	-120.0

20	19 - 20	0.4095	0.4784	0.0036	180.0	80.0	-180.0	-80.0
21	20 - 21	0.7089	0.9373	0.0018	90.0	40.0	-90.0	-40.0
22	2 - 22	0.4512	0.3083	0.0188	940.0	460.0	-940.0	-460.0
23	22 - 23	0.8980	0.7091	0.0169	850.0	410.0	-840.0	-400.0
24	23 - 24	0.8960	0.7011	0.0084	420.0	200.0	-420.0	-200.0
25	5 - 25	0.2030	0.1034	0.0190	950.0	970.0	-950.0	-970.0
26	25 - 26	0.2842	0.1447	0.0178	890.0	950.0	-880.0	-940.0
27	26 - 27	1.0590	0.9337	0.0165	820.0	920.0	-810.0	-910.0
28	27 - 28	0.8042	0.7006	0.0151	750.0	890.0	-750.0	-880.0
29	28 - 29	0.5075	0.2585	0.0125	630.0	810.0	-620.0	-810.0
30	29 - 30	0.9744	0.9630	0.0084	420.0	210.0	-420.0	-210.0
31	30 - 31	0.3105	0.3619	0.0054	270.0	140.0	-270.0	-140.0
32	31 - 32	0.3410	0.5302	0.0012	60.0	40.0	-60.0	-40.0

Tabela B.8: Dados de barra, carregamento e injeção na rede de distribuição de 33 barramentos.

Barra	V (p.u)	$\theta$ (p.u)	Injeção Ativa (kW)	Injeção Reativa (kVar)	Carga Ativa (kW)	Carga Reativa (kVar)	$G^{sh}$ (kW)	$B^{sh}$ (kVar)
1	0.9954	0.0228	0	0	100.0	60.0	0.0	0.0
2	0.9735	0.152	0	0	90.0	40.0	0.0	0.0
3	0.9617	0.2568	0	0	120.0	80.0	0.0	0.0
4	0.9501	0.3643	0	0	60.0	30.0	0.0	0.0
5	0.9212	0.2146	0	0	60.0	20.0	0.0	0.0
6	0.9157	-0.1572	0	0	200.0	100.0	0.0	0.0
7	0.9081	-0.0976	0	0	200.0	100.0	0.0	0.0
8	0.8982	-0.2158	0	0	60.0	20.0	0.0	0.0
9	0.889	-0.3177	0	0	60.0	20.0	0.0	0.0
10	0.8877	-0.3056	0	0	45.0	30.0	0.0	0.0
11	0.8853	-0.2862	0	0	60.0	35.0	0.0	0.0
12	0.8756	-0.4367	0	0	60.0	35.0	0.0	0.0
13	0.872	-0.5675	0	0	120.0	80.0	0.0	0.0
14	0.8698	-0.6303	0	0	60.0	10.0	0.0	0.0
15	0.8676	-0.669	0	0	60.0	20.0	0.0	0.0
16	0.8644	-0.7979	0	0	60.0	20.0	0.0	0.0

17	0.8634	-0.814	0	0	90.0	40.0	0.0	0.0
18	0.9946	0.0065	0	0	90.0	40.0	0.0	0.0
19	0.9892	-0.0945	0	0	90.0	40.0	0.0	0.0
20	0.9882	-0.1238	0	0	90.0	40.0	0.0	0.0
21	0.9872	-0.1546	0	0	90.0	40.0	0.0	0.0
22	0.968	0.1047	0	0	90.0	50.0	0.0	0.0
23	0.9578	-0.0321	0	0	420.0	200.0	0.0	0.0
24	0.9528	-0.0998	0	0	420.0	200.0	0.0	0.0
25	0.9182	0.2783	0	0	60.0	25.0	0.0	0.0
26	0.9141	0.3692	0	0	60.0	25.0	0.0	0.0
27	0.8961	0.5026	0	0	60.0	20.0	0.0	0.0
28	0.8831	0.6298	0	0	120.0	70.0	0.0	0.0
29	0.8775	0.8039	0	0	200.0	600.0	0.0	0.0
30	0.8709	0.6637	0	0	150.0	70.0	0.0	0.0
31	0.8694	0.6253	0	0	210.0	100.0	0.0	0.0
32	0.869	0.6124	0	0	60.0	40.0	0.0	0.0
33	1	0	3920.0	2430.0	0.0	0.0	0.0	0.0

---

---

# APÊNDICE C

---

## EQUAÇÕES GERAIS

---

### C.1 EXPRESSÕES GERAIS

Neste apêndice são apresentadas as expressões empregadas para modelagem do conjunto de medidas, bem como a contribuição de cada medida a matriz Jacobiana  $H$  do problema de estimação de estado. As variáveis de estado do problema são as magnitudes e ângulos de fase das tensões,  $V$  e  $\theta$ . No conjunto de medições são consideradas medidas de fluxo de potência ativa e reativa, injeção de potência ativa e reativa e magnitude de tensão. As expressões também são válidas para a modelagem de pseudo-medidas Crisps. As equações para o cálculo da injeção e fluxo de potência ativa e reativa são mostradas em (MONTICELLI, 2000) e (ABUR,2004).

As expressões gerais para modelagem de medidas de fluxo de potência ativa e reativa, entre duas barras  $k$  e  $m$ , são:

$$P_{km} = V_{km}^2 g_{km} - V_k V_m g_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) - V_k V_m b_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) \quad (C.1)$$

$$Q_{km} = -V_{km}^2 (b_{km} + b_{km}^{sh}) + V_k V_m b_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) - V_k V_m g_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) \quad (C.2)$$

Onde:

$g_{km}$  : Condutância do trecho de linha  $k - m$ ;

$b_{km}$  : Susceptância do trecho de linha  $k - m$ ;

$b_{km}^{sh}$  : Susceptância shunt adicional no trecho de linha  $k - m$ .

Para as equações representativas de medidas de injeção de potência ativa e reativa, têm-se as seguintes expressões:

$$P_k = V_k \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) + B_{km} \sin(\theta_k - \theta_m)) \quad (C.3)$$

$$Q_k = V_k \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) - B_{km} \cos(\theta_k - \theta_m)) \quad (C.4)$$

Onde:

$G_{km}$ : Elemento  $k - m$  da matriz de Condutância da rede elétrica;

$B_{km}$ : Elemento  $k - m$  da matriz de Susceptância da rede elétrica;

$Y_{km} = G_{km} + B_{km}$ ; onde  $Y_{km}$  é o elemento  $k - m$  da matriz de Admitância Nodal.

As contribuições à matriz Jacobiana do problema de estimação de estado, referente às medidas de fluxo de potência ativa e reativa, entre duas barras  $k - m$ , são:

$$\frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_k} = V_k V_m g_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) - V_k V_m b_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) \quad (C.5)$$

$$\frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_m} = V_k V_m g_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) + V_k V_m b_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) \quad (C.6)$$

$$\frac{\partial P_{km}}{\partial V_k} = 2V_k g_{km} - V_m g_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) - V_m b_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) \quad (C.7)$$

$$\frac{\partial P_{km}}{\partial V_m} = V_k g_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) - V_k b_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) \quad (C.8)$$

$$\frac{\partial Q_{km}}{\partial \theta_k} = V_k V_m b_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) - V_k V_m g_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) \quad (C.9)$$

$$\frac{\partial Q_{km}}{\partial \theta_m} = V_k V_m b_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) + V_k V_m g_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) \quad (C.10)$$

$$\frac{\partial Q_{km}}{\partial V_k} = -2V_k (b_{km} + b_{km}^{sh}) + V_m b_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) - V_m g_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) \quad (C.11)$$

$$\frac{\partial Q_{km}}{\partial V_m} = +V_k b_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) - V_k g_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) \quad (C.12)$$

Para as medidas de injeção de potência ativa e reativa em uma barra  $k$ , insere-se as seguintes contribuições na matriz Jacobiana do problema:

$$\frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} = -V_k^2 B_{kk} - V_k \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \text{sen}(\theta_k - \theta_m) - B_{km} \cos(\theta_k - \theta_m)) \quad (\text{C.13})$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} = V_k V_m (G_{km} \text{sen}(\theta_k - \theta_m) - B_{km} \cos(\theta_k - \theta_m)) \quad (\text{C.14})$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial V_k} = V_k G_{kk} + \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) + B_{km} \text{sen}(\theta_k - \theta_m)) \quad (\text{C.15})$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial V_m} = V_k (G_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) + B_{km} \text{sen}(\theta_k - \theta_m)) \quad (\text{C.16})$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} = -V_k^2 G_{kk} + V_k \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) + B_{km} \text{sen}(\theta_k - \theta_m)) \quad (\text{C.17})$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} = -V_k V_m (G_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) + B_{km} \text{sen}(\theta_k - \theta_m)) \quad (\text{C.18})$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial V_k} = -V_k B_{kk} + \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \text{sen}(\theta_k - \theta_m) - B_{km} \cos(\theta_k - \theta_m)) \quad (\text{C.19})$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial V_m} = V_k (G_{km} \text{sen}(\theta_k - \theta_m) - B_{km} \cos(\theta_k - \theta_m)) \quad (\text{C.20})$$

Os elementos correspondentes às medidas de tensão são:

$$\frac{\partial V_k}{\partial \theta_k} = 0 \quad (\text{C.21})$$

$$\frac{\partial V_k}{\partial \theta_m} = 0 \quad (\text{C.22})$$

$$\frac{\partial V_k}{\partial V_k} = 1 \quad (\text{C.23})$$

$$\frac{\partial V_k}{\partial V_m} = 0 \quad (\text{C.24})$$

$$\frac{\partial V_m}{\partial \theta_k} = 0 \quad (\text{C.25})$$

$$\frac{\partial V_m}{\partial \theta_m} = 0 \quad (\text{C.26})$$

$$\frac{\partial V_m}{\partial V_k} = 0 \quad (C.27)$$

$$\frac{\partial V_m}{\partial V_m} = 1 \quad (C.28)$$