

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

NASTASHA SALAME DA SILVA

**ESTIMAÇÃO DE ESTADOS HIERÁRQUICA
CONSIDERANDO A COESTIMAÇÃO DE ESTADOS E
TOPOLOGIA NO NÍVEL DE SUBESTAÇÃO**

Florianópolis

2015

NASTASHA SALAME DA SILVA

**ESTIMAÇÃO DE ESTADOS HIERÁRQUICA
CONSIDERANDO A COESTIMAÇÃO DE ESTADOS E
TOPOLOGIA NO NÍVEL DE SUBESTAÇÃO**

Tese submetida ao Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica
para a obtenção do Grau de Doutor
em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Antonio José Alves
Simões Costa, Ph.D. - UFSC

Florianópolis

2015

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Silva, Nastasha Salame da

Estimação de estados hierárquica considerando a
coestimação de estados e topologia no nível de subestação /
Nastasha Salame da Silva ; orientador, Antonio José Alves
Simões Costa - Florianópolis, SC, 2015.
189 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica.

Inclui referências

1. Engenharia Elétrica. 2. Estimação de estados
hierárquica. 3. Coestimação de estados e topologia. 4.
Estimação de estados em sistemas elétricos de potência. 5.
Modelagem em tempo real de sistemas de potência. I. Simões
Costa, Antonio José Alves. II. Universidade Federal de
Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica. III. Título.

NASTASHA SALAME DA SILVA

**ESTIMAÇÃO DE ESTADOS HIERÁRQUICA
CONSIDERANDO A COESTIMAÇÃO DE ESTADOS E
TOPOLOGIA NO NÍVEL DE SUBESTAÇÃO**

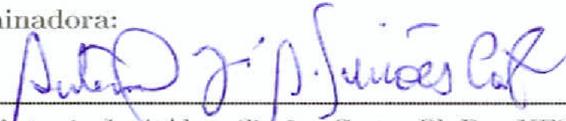
Esta Tese foi julgada aprovada para a obtenção do Título de “Doutor em Engenharia Elétrica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Florianópolis, 06 de março 2015.

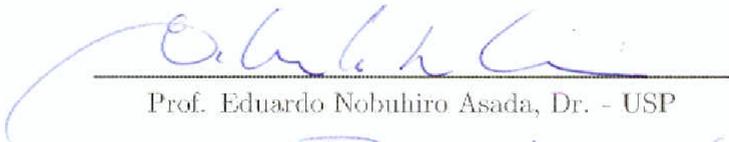


Prof. Carlos Galup Montoso, Dr.
Coordenador do Curso

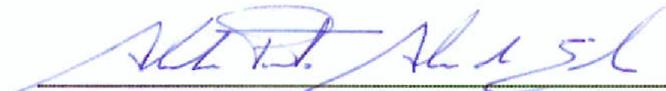
Banca Examinadora:



Prof. Antonio José Alves Simões Costa, Ph.D. - UFSC
Orientador



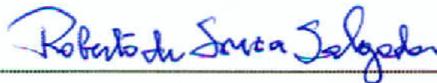
Prof. Eduardo Nobuhiro Asada, Dr. - USP



Prof. Alexandre Pinto Alves da Silva, Ph.D - GE Global Research



Prof. Jacqueline Gisele Rolim, Dr. - UFSC



Prof. Roberto de Souza Salgado, Ph.D. - UFSC

Ao meu eterno companheiro de aventuras, David.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado forças para concluir esta jornada. Aos meus pais, por terem me dado toda a estrutura e apoio para que eu chegasse até aqui. Às minhas irmãs, pelos momentos de alegria e companheirismo. Ao meu marido, pelo incentivo e suporte para que esta jornada se tornasse mais leve.

Aos Professores membros da banca, Eduardo Nobuhiro Asada, Alexandre Pinto Alves da Silva, Jacqueline Gisele Rolim e Roberto de Souza Salgado, e ao Professor Julio Cesar Stacchini de Souza, pela generosidade e tempo dedicados a fazer deste um trabalho melhor. Ao meu orientador, Professor Simões, pelo conhecimento transmitido e dedicação durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

Aos Professores do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da UFSC, em especial aos professores do Laboratório de Sistemas de Potência (LABSPOT), pelos ensinamentos compartilhados no decorrer desses anos. À querida Professora Elizete, pelas palavras de apoio e incentivo ao longo de todos esses anos.

Aos meus colegas e amigos do LABSPOT, pelos momentos de alegria, dificuldades e amizade que compartilhamos.

À CAPES pelo suporte financeiro concedido através da bolsa de estudo, o qual permitiu a realização deste trabalho.

A dream doesn't become reality through magic; it takes sweat, determination and hard work.

Colin Powell

Resumo da Tese apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

ESTIMAÇÃO DE ESTADOS HIERÁRQUICA CONSIDERANDO A COESTIMAÇÃO DE ESTADOS E TOPOLOGIA NO NÍVEL DE SUBESTAÇÃO

Nastasha Salame da Silva

Março/2015

Orientador: Prof. Antonio José Alves Simões Costa, Ph.D. - UFSC.

Área de Concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Palavras-chave: Estimação de estados hierárquica, coestimação de estados e topologia, estimação de estados em sistemas elétricos de potência, modelagem em tempo real de sistemas de potência, análise de segurança em sistemas de potência.

Número de Páginas: 189

Este trabalho de doutorado apresenta uma estrutura hierárquica para estimação descentralizada de estados na qual o nível inferior é conduzido em cada subestação modelada do sistema elétrico de potência. Neste nível local é aplicado um algoritmo de Coestimação não linear, capaz de estimar não somente os estados, mas também a topologia da subestação em questão. O nível hierárquico superior, implementado nos Centros de Operação Regional, é responsável pela coordenação das estimativas locais, mediante o processamento das medidas de fluxo de potência ativa nas linhas de transmissão que conectam as subestações. Adicionalmente, um segundo módulo de estimação no nível superior permite agregar as contribuições de medidas fasoriais de tensão e corrente. O estimador associado a este módulo é linear, como resultado da representação das medidas fasoriais na forma retangular. Para preservar as propriedades estatísticas da solução, os componentes retangulares são processados em bloco por um estimador ortogonal, o que garante a correta representação das respectivas correlações. A arquitetura de estimação proposta reduz consideravelmente o crescente trânsito de informações entre as subestações e os centros de operação e controle. Estudos de caso utilizando diferentes sistemas-teste em que cada subestação é modelada no nível de seção de barra são realizados para ilustrar e validar a metodologia proposta.

Abstract of Thesis presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor in Electrical Engineering.

HIERARCHICAL STATE ESTIMATION BASED ON STATE AND TOPOLOGY COESTIMATION AT BUS SECTION LEVEL

Nastasha Salame da Silva

March/2015

Advisor: Prof. Antonio José Alves Simões Costa, Ph.D. - UFSC.

Area of Concentration: Electric Energy Systems.

Keywords: Hierarchical state estimation, state and topology coestimation, power system state estimation, power system real-time modeling, power system security analysis.

Number of Pages: 189

This doctoral work presents a hierarchical structure for decentralized power system state estimation whose lower level is conducted at each power network substation. The local level modeling is based on a nonlinear Coestimation algorithm which provides not only the nodal state variables, but also the substation topology. The higher hierarchical level, performed at the Regional Control Center, coordinates the local estimates by processing the power flow measurements taken on the transmission lines connecting the substations, followed by a second stage module based on a block orthogonal estimator that adds the contribution of fasor measurements provided by Phasor Measurement Units. In addition to other attractive features, the proposed estimation architecture also allows a substantial reduction on the amount of data transmitted from substations to control centers. The proposed methodology is tested through a number of case studies performed on different test-systems networks modeled at bus section level.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Representação da triangularização de \mathbf{U} através de rotações de Givens [1].	48
Figura 2	Características dos métodos de MQP e MVAP, respectivamente	78
Figura 3	Exemplo de um sistema dividido em três áreas conexas.	93
Figura 4	Ilustração de estrutura hierárquica de dois níveis.	95
Figura 5	Algoritmo Proposto por Van Cutsem et al. [2]	97
Figura 6	Algoritmo Proposto por Lo et al. [3,4]	98
Figura 7	Algoritmo Proposto por Yang et al. [5,6]. (EEL - estimador de estados linear; EEN - estimador de estados não-linear)	100
Figura 8	Exemplo de sistema conexo composto por três subestações.	107
Figura 9	Sistema de potência com SCADA e PMU instalados [7].	110
Figura 10	Arquitetura E1FC de estimação para nível de coordenação.	112
Figura 11	Arquitetura E2CB de estimação para nível de coordenação.	112
Figura 12	Arquitetura proposta para estimação de estados hierárquica em dois níveis.	115
Figura 13	Sistema-teste criado para validação da arquitetura proposta.	116
Figura 14	Sistema-teste IEEE 14 barras expandido no nível de seção de barra.	127
Figura 15	Métrica dos erros nos fluxos de potência ativa (a) e reativa (b) nas linhas de transmissão para medidas convencionais para o sistema-teste IEEE 14.	134
Figura 16	Métrica dos erros das magnitudes (a) e ângulos (b) das tensões nodais considerando PMUs instaladas nas barras 1, 2, 3, 6 e 8 para o estimador convencional para o sistema-teste IEEE 14.	137
Figura 17	Métrica dos erros nos fluxos de potência ativa (a) e reativa (b) nas linhas de transmissão considerando PMUs instaladas nas barras 1, 2, 3, 6 e 8 para o estimador convencional para o sistema-teste IEEE 14.	138

Figura 18	Métrica dos erros das magnitudes (a) e ângulos (b) das tensões nodais considerando PMUs instaladas em todas as SEs para o estimador convencional para o sistema-teste IEEE 14.	139
Figura 19	Métrica dos erros nos fluxos de potência ativa (a) e reativa (b) nas linhas de transmissão considerando PMUs instaladas em todas as SEs para o estimador convencional para o sistema-teste IEEE 14.	140
Figura 20	Métrica dos erros das magnitudes (a) e ângulos (b) das tensões nodais considerando PMUs instaladas nas barras 1, 2, 3, 6 e 8 com estimador ortogonal em blocos para o sistema-teste IEEE 14.	142
Figura 21	Métrica dos erros nos fluxos de potência ativa (a) e reativa (b) nas linhas de transmissão considerando PMUs instaladas nas barras 1, 2, 3, 6 e 8 com estimador ortogonal em blocos para o sistema-teste IEEE 14.	143
Figura 22	Métrica dos erros das magnitudes (a) e ângulos (b) das tensões nodais considerando PMUs instaladas em todas as SEs do sistema com estimador ortogonal em blocos para o sistema-teste IEEE 14.	144
Figura 23	Métrica dos erros nos fluxos de potência ativa (a) e reativa (b) nas linhas de transmissão considerando PMUs instaladas em todas as SEs do sistema com estimador ortogonal em blocos para o sistema-teste IEEE 14. ...	145
Figura 24	Comparativo das métricas dos erros das magnitudes (a) e ângulos (b) das tensões nodais considerando PMUs instaladas em todas as SEs do sistema considerando as duas abordagens de EEH para o sistema-teste IEEE 14.146	
Figura 25	Sistema-teste IEEE 9 barras modelado no nível de subestação.	147
Figura 26	Métrica dos erros nas magnitudes (a) e nos ângulos (b) das tensões nas barras para medidas convencionais para o sistema-teste IEEE 9.	148
Figura 27	Métrica dos erros nas magnitudes (a) e nos ângulos (b) das tensões nas barras considerando PMUs instaladas nas barras 1, 2 e 3 para o sistema-teste IEEE 9.	149
Figura 28	Métrica dos erros nas magnitudes (a) e nos ângulos (b) das tensões nas barras considerando PMUs instaladas	

	em todas as SEs para o sistema-teste IEEE 9.	150
Figura 29	Sistema-teste IEEE 9 barras.	173
Figura 30	Sistema-teste IEEE 14 barras.	181

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Resultados obtidos para as grandezas nodais do sistema-teste.	117
Tabela 2	Resultados de fluxo de potência nos ramos convencionais para o sistema-teste.....	117
Tabela 3	Resultados de fluxo de potência nos ramos chaveáveis para o sistema-teste.	118
Tabela 4	Resultados da Coestimação de Estados & Topologia para a SE 1.....	118
Tabela 5	Resultados da Estimação de Estados para as Barras de Referência de cada SE.	119
Tabela 6	Resultados da Estimação de Injeção de Potência de cada SE.	120
Tabela 7	Resultados da Estimação de Estados nas Linhas de Transmissão.....	120
Tabela 8	Evolução da Topologia da Rede durante o processo iterativo para os casos A1 e A2.....	128
Tabela 9	Resultados obtidos considerando-se apenas medidas convencionais: coestimador de estados e topologia (nível local).	129
Tabela 10	Medidas de fluxo de potência nas linhas de transmissão que conectam as SEs.	132
Tabela 11	Resultados obtidos considerando-se apenas medidas convencionais após re-alimentação dos dados para o estimador local e para as barras 7 e 8.....	136
Tabela 12	Fração de tempo necessária para execução da arquitetura de estimação hierárquica proposta para o sistema IEEE 14 barras.....	151
Tabela 13	Fração de tempo necessária para execução da arquitetura de estimação hierárquica proposta para o sistema IEEE 9 barras.....	152
Tabela 14	Medidas e suas correspondentes covariâncias para o sistema-teste 9 barras: Nível de Subestação.	174
Tabela 15	Medidas e suas correspondentes covariâncias para o sistema-teste 9 barras: Nível de Coordenação.	177
Tabela 16	Medidas e suas correspondentes covariâncias para o	

	sistema-teste 14 barras: Nível de Subestação.....	182
Tabela 17	Medidas e suas correspondentes covariâncias para o sistema-teste 14 barras: Nível de Coordenação.....	188

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- CET** Coestimação de Estados e Topologia
- COR** Centro de Operação Regional
- DCh** Dispositivo Chaveável
- E1C** Estimador de um Estágio Centralizado
- E1FC** Estimador Hierárquico com Estimador Convencional no COR capaz de Processar Informação *A Priori*
- E2C** Estimador de dois Estágios Centralizado
- E2CB** Estimador Hierárquico com Estimador em dois Estágios no COR
- EE** Estimação de Estados
- EEG** Estimação de Estados Generalizada
- EEH** Estimação de Estados Hierarquizada
- EESB** Estimação de Estados em Nível de Seção de Barra
- EESP** Estimação de Estados em Sistemas de Potência
- EG** Erro Grosseiro
- IED** *Intelligent Electronic Devices*
- KKT** Karush-Kuhn-Tucker
- MO** Métodos Ortogonais
- MPDPI** Método Primal-Dual de Pontos Interiores
- MQP** Mínimos Quadrados Ponderados
- MVAP** Mínimos Valores Absolutos Ponderados
- PMU** *Phasor Measurement Unit*
- SE** Subestação
- SB** Seção de Barra

SCADA *Supervisory Control and Data Acquisition*

SPQR Soma Ponderada dos Quadrados dos Resíduos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	27
1.1 Contextualização do Problema	27
1.2 Revisão Bibliográfica	29
1.2.1 Importância das Subestações no Novo Contexto de Análise de Sistemas Elétricos	29
1.2.2 Estimação de Estados Generalizada e Análise de Topologia	31
1.2.3 Estimação de Estados Hierárquica	32
1.3 Objetivos e Contribuições Realizadas na Pesquisa de Douto- rado	32
1.4 Estrutura da Tese	33
2 EE CONVENCIONAL	37
2.1 Introdução	37
2.2 Estimação de Estados	37
2.2.1 Configurador de Redes	38
2.2.2 Modelo de Medição	38
2.2.3 Formulação do Problema de EESP via Método dos Míni- mos Quadrados Ponderados	39
2.2.4 Solução da EESP via Método da Equação Normal	40
2.2.4.1 Observabilidade	41
2.2.4.2 Inclusão de Informação <i>A Priori</i>	42
2.2.5 Solução da EESP via Método de Tableau Esperso	42
2.2.6 Formulação do Problema de EESP via Método dos Míni- mos Valores Absolutos Ponderados	44
2.3 Método sequencial-ortogonal via rotações de Givens	46
2.3.1 Formulação do Problema de EESP via Método de Givens com Três Multiplicadores	48
2.4 Método de Givens em Blocos	50
2.4.1 Formulação do Problema de EESP via Rotações de Givens em Blocos	54
2.5 Análise de erros grosseiros	58
2.5.1 Detecção, identificação e eliminação de erros grosseiros para método de Tableau Esperso	59

2.5.2	Detecção, identificação e eliminação de erros grosseiros para método de Givens com três multiplicadores	61
2.5.2.1	Identificação	62
2.5.2.2	Remoção	64
2.6	Conclusões	64
3	EE NO NÍVEL DE SB	65
3.1	Introdução	65
3.2	Modelagem dos Ramos Chaveáveis	65
3.3	Estimação de Estados Generalizada	67
3.4	Estimação de Estados no Nível de Seção de Barra	68
3.4.1	Formulação do Problema de EESB via Mínimos Quadrados Ponderados	69
3.4.2	Solução da EESB via Método de Tableau Esparsa	70
3.5	Análise de Erros Utilizando Informação <i>A Priori</i>	71
3.5.1	Matriz de Covariância dos Multiplicadores de Lagrange ...	72
3.5.2	Informação <i>A Priori</i> e Projeção de λ no Domínio $D(\mathbf{V}_S)$.	74
3.6	Conclusões	75
4	CET	77
4.1	Introdução	77
4.2	Comparação entre as Estratégias MQP e MVAP	77
4.3	Coestimação de Estados e Topologia	79
4.3.1	Diferença entre tratar a matriz h_o como restrição de igualdade e via termo da função objetivo	79
4.3.2	Formulação do problema	81
4.3.3	Considerações	82
4.3.3.1	Determinação do fator de peso	83
4.3.3.2	Tratamento de valores absolutos no processo de otimização	83
4.3.3.3	Informação <i>a priori</i> para prevenir falta de observabilidade	84
4.3.3.4	Insensibilidade a pontos de alavancamento	84
4.3.4	Formulação revisada para o problema de CET	84
4.3.5	Solução da CET via MPDPI	85
4.3.5.1	Teste de Convergência	87
4.4	Atualização da topologia	87
4.5	Algoritmo de Coestimação de Estados e Topologia	89
4.6	Conclusões	90

5 ESTIMAÇÃO DE ESTADOS HIERARQUIZADA	91
5.1 Introdução	91
5.2 Noções Gerais sobre a Organização de Sistemas Hierarquizados	92
5.3 Estrutura local na Estimação Hierárquica	94
5.4 Algoritmos de Estimação de Estados Hierárquica	94
5.4.1 Algoritmo Proposto por Van Cutsem et al.	95
5.4.2 Algoritmo Proposto por Lo et al.	96
5.4.3 Algoritmo Proposto por Yang et al.	97
5.4.4 Algoritmo Proposto por Expósito e Villa Jaén	99
5.5 Conclusões	101
6 ESTIMAÇÃO DE ESTADOS HIERÁRQUICA EM DOIS NÍ- VEIS	103
6.1 Introdução	103
6.2 Novo Cenário para as Subestações	103
6.3 EEH em dois Níveis	104
6.4 Coestimação de Estados e Topologia em Nível de Seção de Barra	105
6.4.1 Análise de erros grosseiros no nível de Seção de Barra uti- lizando a CET	108
6.5 Estimação de Estados no Centro de Operação Regional	108
6.5.1 Análise de informações provenientes de PMUs	110
6.5.2 Análise de erros grosseiros para estimador ortogonal em blocos	113
6.6 Arquitetura Proposta para EEH em dois Níveis	114
6.7 Exemplo Ilustrativo com Sistema-teste de 4 Barras	114
6.8 Conclusões	120
7 RESULTADOS OBTIDOS	123
7.1 Introdução	123
7.2 Metodologia de Simulação	124
7.3 Resultados Obtidos para o Sistema IEEE 14 Barras	126
7.3.1 Coestimação de estados e topologia no nível local	127
7.3.2 Coordenação das Estimativas Locais Considerando-se A- penas Medidas Convencionais	132
7.3.3 Resultados Obtidos Considerando-se a Inclusão de Medidas PMU de Tensão como informação <i>a priori</i> ao Sistema	134
7.3.3.1 Medidas PMU nas Barras 1, 2, 3, 6 e 8	135

7.3.3.2	Medidas PMU em Todas as Subestações	138
7.3.4	Resultados Obtidos Considerando-se a Adição de Medidas PMU ao Sistema: Estimador de Segundo Estágio	139
7.3.4.1	Medidas PMU nas Barras 1, 2, 3, 6 e 8	141
7.3.4.2	Medidas PMU em Todas as Subestações	142
7.4	Resultados Obtidos para o Sistema IEEE 9 Barras	143
7.4.1	Resultados Considerando-se Apenas Medidas Convencionais	145
7.4.2	Resultados Obtidos Considerando-se a Adição de Medidas PMU	146
7.4.2.1	Medidas PMU nas Barras 1, 2 e 3	147
7.4.2.2	Medidas PMU em Todas as Subestações	148
7.5	Desempenho computacional	149
7.5.1	Tempo de execução dos estimadores propostos	149
7.5.2	Sistema-teste de 14 barras	151
7.5.3	Sistema-teste de 9 barras	151
7.6	Análise preliminar de erros grosseiros	152
7.6.1	Resultados Considerando-se Erros Grosseiros na CET	153
7.6.2	Resultados Considerando-se Erros Grosseiros no Estimador Ortogonal Convencional	155
7.6.3	Resultados Considerando-se Erros Grosseiros no Estimador Ortogonal em Blocos	155
7.7	Análise dos Resultados	156
7.8	Conclusões	157
8	CONCLUSÕES FINAIS	159
8.1	Introdução	159
8.2	Proposta para a Estimação de Estados Hierárquica em dois Níveis	159
8.3	Etapas Desenvolvidas do Trabalho	160
8.4	Sugestões para Trabalhos Futuros	161
	REFERÊNCIAS	163
	APÊNDICE A - Dados do sistema-teste IEEE 9 barras	173
	APÊNDICE B - Dados do sistema-teste IEEE 14 barras	181

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do Problema

A modelagem em tempo real de sistemas elétricos de potência tem por objetivo fornecer uma base de dados confiável que permita ao operador conhecer as condições de operação da rede, tornando possível uma análise confiável da segurança da condição de operação do sistema elétrico.

A estimação de estados em sistemas de potência (EESP) é a ferramenta fundamental para a modelagem em tempo real. Tradicionalmente, a EESP é realizada considerando-se a modelagem barra-ramo da rede, na qual os arranjos das subestações são previamente identificados, verificando-se a conectividade interna através do estado de suas chaves e disjuntores, sendo então definidas as *barras* do sistema. Este modelo permite evitar a representação explícita de dispositivos chaveáveis e o surgimento de problemas numéricos advindos da utilização de valores significativamente pequenos ou muito grandes de impedância como artifício para a representação dos *status* destes dispositivos.

Contudo, o avanço da tecnologia e sua implementação no sistema elétrico fez com que informações importantes relacionadas aos arranjos e dispositivos chaveáveis internos às subestações passassem a ser relevantes, as quais a EESP tradicional não contempla.

Tendo em vista a crescente necessidade de métodos para validação em tempo real da topologia de redes elétricas, Monticelli e Garcia [8,9] propuseram uma modelagem exata para representar tais dispositivos na EESP. Nesta abordagem, os fluxos de potência através dos ramos com dispositivos chaveáveis são incluídos como novas variáveis de estado, juntamente com as tensões complexas de todas as barras do sistema. Este tipo de abordagem deu origem à *Estimação de Estados Generalizada* (EEG) [10], a qual permite a representação explícita de ramos contendo dispositivos chaveáveis para estudos de EESP.

Posteriormente, Clements e Simões Costa [11] mostraram como informações referentes às condições operacionais (*status*) dos dispositivos chaveáveis podem ser incluídas no problema de estimação de estados (EE) de forma similar ao tratamento dado às barras de injeção nula, isto é, como restrições de igualdade. Esta nova abordagem para estimação de estados considerando subestações, ainda que na literatura pertinente não tenha uma nomenclatura específica, deve ser destacada da EEG, por tratar as informações referentes aos dispositivos chaveáveis.

veis não como pseudo-medidas, mas sim restrições de igualdade do problema de otimização. Sendo assim, esta metodologia será tratada nesta tese como “Estimação de Estados no Nível de Seção de Barra”. Como consequência disso, novos nós elétricos devem ser incluídos na representação da rede, de forma a abranger também os ramos com dispositivos chaveáveis, aumentando-se, portanto, a dimensão da rede modelada.

A possibilidade de se representar explicitamente dispositivos chaveáveis no problema de EESP foi fundamental para a continuidade e aprofundamento dos estudos em EE, possibilitando estudos com relação a erros de topologia, que na EESP tradicional eram desconsiderados.

Como resultado da necessidade de se estimar não somente os estados, mas também a topologia do sistema, diversas propostas foram desenvolvidas e estão presentes na literatura pertinente [11–15]. Contudo, tais propostas em geral exigem a execução de dois processos, um para a obtenção da estimação de estados e outro para a estimação da topologia. Vosgerau et al. [16–18] propõem uma nova abordagem unificadora, na qual o processo de estimação de estados e o de estimação da topologia são realizados concomitantemente, dando origem à Coestimação de Estados e Topologia. Esta abordagem, embora ainda preliminarmente baseada em modelagem linear do sistema elétrico de potência, foi fundamental para estudos de viabilidade para este tipo de estimação, uma vez que existe uma excelente correlação entre o status de um ramo chaveável e a existência de fluxo de potência ativa através deste [12]. Posteriormente, esta abordagem foi expandida para o modelo não linear, e portanto mais realístico, da rede elétrica em [19], confirmando assim a aplicabilidade e vantagens da estimação concomitante de estados e topologia.

Por outro lado, em um cenário onde a modelagem das subestações passa a ser relevante e onde se dissemina a aplicação cada vez maior de dispositivos eletrônicos inteligentes nas subestações [20–23], surge o problema de como transmitir e processar esse volume crescente de dados de forma centralizada nos Centro de Operação Regionais (CORs) do sistema elétrico sem se correr o risco de sobrecarga nos sistemas de telecomunicações de concessionárias e operadoras.

A partir destas constatações, este trabalho de pesquisa propõe a aplicação de uma estrutura hierárquica em dois níveis para a estimação de estados, levando-se em conta a crescente importância das subestações no sistema elétrico. Nesta proposta, as subestações são tratadas como unidades independentes entre si, capazes de realizar o processo de Coestimação de Estados e Topologia. Os resultados obtidos neste estágio são levados ao nível hierárquico superior, constituído pelos CORs,

onde são submetidos a um processo de coordenação das estimativas locais, conduzido no estágio final da estimação de estados hierarquizada.

1.2 Revisão Bibliográfica

Nesta seção é apresentada uma revisão bibliográfica dos tópicos mais relevantes associados a esta pesquisa. Referências bibliográficas relevantes envolvendo a representação da rede no nível de seção de barras e a estimação de estados generalizada são brevemente discutidos.

1.2.1 Importância das Subestações no Novo Contexto de Análise de Sistemas Elétricos

As transformações apresentadas na área de proteção e monitoração têm causado impacto direto na operação das subestações (SEs) [20]. Isso ocorre principalmente pelo fato de cada vez mais se fazer uso de equipamentos digitais, que implementam uma variedade de funções de monitoração e controle das subestações, bem como a sua automatização.

Este aumento do número de informações disponíveis no nível de seção de barra, aliado a estudos de estimação de estados generalizada e à possibilidade de se estimar também a topologia da rede, fez com as subestações começassem a ganhar cada vez mais importância na análise de sistemas de potência [21–25].

O processo de modernização das subestações também se deve ao fato de que grande parte das subestações em operação ao redor do mundo foram construídas por volta de 30 anos atrás e estão defasadas em relação às tecnologias atuais, devendo ser portanto atualizadas ou substituídas [23]. Como resultado, o processo de modernização das subestações considera a implementação de dispositivos eletrônicos inteligentes (cuja sigla IED vem do inglês *Intelligent Electronic Devices*), tornando as subestações cada vez mais independentes [21, 23, 24].

Para possibilitar a operação e controle de subestações com diferentes tecnologias, de forma a fornecer dados que possam ser processados de forma adequada pelos operadores, foi criada a norma internacional IEC 61850. Esta norma estabelece um padrão a ser seguido na transmissão de informações provenientes dos diferentes modelos de subestação existentes, possibilitando assim a interação entre os diferentes tipos de dados e tornando possível o seu processamento eficiente, o que

tem um impacto positivo sobre o processo de tomada de decisões pelos operadores [21–25].

A crescente importância do papel das subestações para a análise de sistemas de potência foi levantada em diversos artigos na literatura. Um dos autores que mais se dedicaram a este tema foi Kezunovic [20–23]. Seus artigos abordam o impacto dos avanços da tecnologia sobre a operação de SEs e enfatizam o papel destes componentes na moderna operação de sistemas elétricos de potência.

Seguindo a mesma tendência, Bose [24] apresenta uma visão de como as novas tecnologias existentes, bem como as previstas para o futuro, influenciam a tomada de decisão ao levar em consideração a disponibilidade de novos dispositivos inteligentes. Tendo em vista que novas tecnologias implicam na instalação de mais sensores e na maior necessidade de comunicação, deve-se buscar soluções para melhor processar este grande volume de informações. Fica portanto cada vez mais evidente a necessidade de se descentralizar a operação do sistema elétrico [23–25].

As novas SEs de alta tensão apresentam grandes diferenças em relação às tradicionais, dentre as quais pode-se destacar a instalação de equipamentos inteligentes dotados de microprocessadores, que permitem a coleta e armazenamento digital de todas as informações pertinentes à SE [23, 24]. Além disso, verifica-se uma crescente disponibilidade de medidores PMUs em diversas SEs. Como resultado, abre-se a possibilidade de um grau cada vez maior de automação no nível de seção de barra, já que as informações e controles podem ser sincronizados com alta precisão através de GPS [23–25].

Esse volume crescente de informações necessita ser processado, porém a transmissão desta massa de dados para os CORs pode se tornar um desafio para os sistemas de comunicação [23].

Estas tendências reforçam a necessidade cada vez maior de se processar de forma descentralizada as informações geradas nas subestações. Algumas propostas neste sentido podem ser encontradas em [21–28], referências que têm como motivação comum o fato de que é preciso reduzir a massa de informações a serem transmitidas para o centro de operações do sistema.

1.2.2 Estimação de Estados Generalizada e Análise de Topologia

A modelagem de redes elétricas no nível de seção de barras foi inicialmente abordada no início da década de 90 por Monticelli e Garcia [8, 29]. Nestas referências os ramos que contêm dispositivos chaveáveis passam a ser explicitamente representados em problemas de estimação de estados através da definição dos fluxos de potência nestes ramos como variáveis de estado. Tal abordagem deu origem ao conceito de Estimação de Estados Generalizada (EEG) [10].

Em [30], Monticelli trata a EESP de modo amplo, abordando a estimação convencional e generalizada, trabalhando com o estimador baseado no método do mínimos quadrados ponderados (MQP). As novas variáveis de estado são apresentadas e incluídas no problema de EE, sendo também abordadas diferentes metodologias para solução do problema, entre elas o uso de métodos ortogonais. Os autores também levam em consideração aspectos relacionados à observabilidade do sistema.

O avanço dos estudos de EEG tornou possível o surgimento de novos e mais eficientes métodos para a identificação de erros de topologia na modelagem em tempo real. Diversos artigos presentes na literatura tratam deste problema [11–15]. Em [11], Clements e Simões Costa introduzem os conceitos de *restrições operacionais e restrições estruturais*, ao formular a EESP com um problema de otimização com restrições, dado origem à *Estimação de Estados no Nível de Seção de Barra* (EESB). Tais propostas, assim como as contidas em [10, 30], levam em consideração a identificação de erros de topologia a partir de um modelo mais detalhado para as partes afetadas da rede elétrica, após tais erros terem sido detectados no modelo barra-ramo convencional.

Em [31], é introduzida uma nova formulação potencialmente capaz de promover a estimação simultânea de estados e topologia de uma rede elétrica. Esta proposta foi operacionalizada em [16–18] no nível da rede elétrica global, com base em um modelo linear para a rede elétrica e a partir da identificação de regiões de anomalia. Estas são expandidas até o nível de seção de barra e sobre este modelo detalhado é aplicada a metodologia denominada *Coestimação de Estados e Topologia* (CET), que permite a estimação simultânea tanto das variáveis de estados quanto da topologia da rede. O método de coestimação apresentou resultados muito promissores quando aplicados a redes contendo diferentes topologias de SE [16–18]. Tal abordagem foi então expandida para a modelagem não linear do sistema elétrico em [19], consolidando

a aplicabilidade da CET em sistemas mais realísticos.

Os princípios básicos e algoritmos de CET são o objetivo do Capítulo 4 deste documento, tendo em vista o papel central que desempenham na presente proposta de doutorado.

1.2.3 Estimação de Estados Hierárquica

A estimação de estados em seu modo tradicional é feita de forma centralizada. Contudo, no caso de redes elétricas continentais, de porte muito grande, o volume de informações a serem processadas no COR fez com que surgissem diferentes propostas para a descentralização da estimação de estados.

No início da década de 80, Van Cutsem et al. [2] propuseram uma metodologia hierárquica para a estimação de estados. Tal abordagem divide o sistema em diversas regiões menores, conexas entre si, cada qual com seu próprio estimador, cujos resultados são posteriormente coordenados mediante outro processo de estimação de estados conduzido em um nível hierárquico superior. Este trabalho serviu de motivação para diversos outros na área de estimação de estados hierárquica [3, 5, 6, 32–36].

Considerando o cenário atual de crescente instrumentação e automação das SEs discutido nas seções anteriores, a proposta de se estimar os estados de uma dada rede de forma descentralizada vem se tornando cada vez mais atrativa. Com isso, busca-se processar o maior volume de informações localmente e enviar para os centros de operação apenas as informações necessárias para realizar a coordenação das estimativas locais.

No Capítulo 5, diferentes métodos para a estimação hierárquica são revistos, tendo em conta sua aplicabilidade no contexto do trabalho proposto para a tese de doutorado.

1.3 Objetivos e Contribuições Realizadas na Pesquisa de Doutorado

Os objetivos específicos propostos para esta tese de doutorado são:

- Formular a coestimação de estados e topologia para aplicação direta a sistemas constituídos por SEs individuais;
- Desenvolver uma ferramenta de estimação de estados hierárqui-

zada em dois níveis sendo o nível local implementado nas subestações e o nível central implementado nos centros de operação regional de sistemas de energia elétrica.

O cumprimento desses objetivos visa oferecer alternativas para solucionar o problema do crescente fluxo de informação requerido para absorção de novas tecnologias empregadas para a operação de grandes sistemas elétricos. O trabalho também contempla a crescente importância atribuída às SEs no novo cenário do sistema elétrico global, bem como a disponibilidade cada vez maior de dispositivos inteligentes presentes em sua arquitetura.

Tendo isto em vista, a coestimação de estados e topologia surge como uma ferramenta eficaz, capaz de processar concomitantemente a topologia e os estados de um dado sistema elétrico. Partindo-se da pressuposição realística de que cada subestação contém informações suficientes para garantir a sua observabilidade, é viável conjecturar sobre a aplicação do método de coestimação de estados e topologia a subestações individuais. Sendo assim, todas as informações relevantes ao processo de estimação de estados passam a ser processadas localmente, enviando-se para os CORs apenas as informações necessárias para concatenar de forma centralizada as estimações individuais. Como resultado deste processo conduzido em dois níveis, obtém-se o modelo em tempo real da rede elétrica como um todo.

Propõe-se, portanto, uma estrutura hierarquizada em dois níveis, na qual o volume de informações que transitarão pela rede será reduzido e pré-processado. Como será visto nos capítulos que se seguem, esta descentralização permite inclusive o processamento local de anomalias e erros grosseiros. O segundo nível faz uso dos conceitos de Estimação de Estados Hierarquizada, que são revistos e expandidos no Capítulo 5.

Um estudo de viabilidade da proposta aqui apresentada foi feito para o sistema modelado na forma linear em [27], sendo posteriormente estendido para a abordagem não linear em [28]. Tais artigo apresentam parcialmente a metodologia e os resultados realizados durante o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa.

1.4 Estrutura da Tese

Os Capítulos 2, 3, 4 e 5 apresentam uma revisão de conceitos, técnicas e metodologias que servem de suporte para o desenvolvimento desta proposta de doutorado. O Capítulo 6 apresenta as novas técnicas

e abordagens desenvolvidas neste trabalho de pesquisa. No Capítulo 7 são apresentados os resultados obtidos. A descrição mais detalhada do conteúdo desses capítulos será apresentada na sequência.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão a respeito da estimação de estados em sistemas de potência. Primeiramente é feita uma revisão a respeito da estimação de estados convencional e a formulação do problema de estimação, seguidos pela apresentação de conceitos de métodos ortogonais de EE.

A apresentação da estimação de estados generalizada e a modelagem de dispositivos chaveáveis, juntamente com o conceito de estimação de estados em nível de seção de barra (que é a abordagem adotada neste trabalho de pesquisa) estão presentes no Capítulo 3.

No Capítulo 4, o método de coestimação de estados e topologia proposto em [19] e aperfeiçoado neste trabalho é apresentado.

O Capítulo 5 apresenta uma revisão sobre métodos de estimação de estados de forma hierarquizada. Para tal, é feita uma revisão de conceitos básicos sobre a estrutura hierárquica, bem como a apresentação de algumas abordagens presentes na literatura.

No Capítulo 6, as bases conceituais da proposta deste trabalho de pesquisa são apresentadas, visando a formulação da estimação de estados hierárquica em dois níveis. Os níveis hierárquicos abordados envolvem a relação entre as subestações e os centros de operação regional. A proposta de aplicação da coestimação unicamente no nível de seção de barras é então apresentada. Como resultado, propõe-se uma arquitetura para esta nova abordagem de estimação de estados hierarquizada, utilizando-se um estimador de dois estágios para o nível superior. Por fim, é apresentado um exemplo ilustrativo das etapas de estimação hierárquica proposta, utilizando-se um sistema-teste simples composto por 4 subestações com configurações diferentes.

O Capítulo 7 apresenta os resultados obtidos para sistemas-teste do IEEE expandidos no nível de seção de barra, através de diversas simulações, considerando diferentes cenários. Ao final, são apresentados resultados preliminares, obtidos para o sistema-teste do Capítulo 6, considerando a existência de erros grosseiros (EGs) no plano de medição para três cenários distintos: análise de EGs na CET; EGs em medidas de fluxo de potência ativa nas linhas de transmissão (a ser operacionalizado pelo estimador de primeiro estágio do COR), e; EGs em medidas provenientes de PMUs (estimador de segundo estágio do COR).

Por fim, no Capítulo 8 são apresentadas as conclusões a respeito dos estudos e desenvolvimentos propostos neste trabalho de doutorado,

bem como algumas propostas para a continuidade da pesquisa.

2 ESTIMAÇÃO DE ESTADOS CONVENCIONAL

2.1 Introdução

O desempenho das funções básicas de avaliação de segurança da operação de sistemas elétricos de potência, realizado através da Monitoração de Segurança e da Análise de Segurança, depende da disponibilidade de informações confiáveis a respeito do ponto de operação atual do sistema. Para tal, é fundamental a existência de ferramentas capazes de atualizar em tempo real as informações sobre as condições de operação do sistema elétrico. A *Estimação de Estados em Sistemas de Potência* é a ferramenta capaz de estimar as variáveis relevantes do sistema a partir de medidas coletadas em tempo real através do sistema de aquisição de dados (sistema SCADA).

O objetivo da EESP é fornecer uma base de dados em tempo real confiável a partir de medidas redundantes realizadas em vários pontos da rede. Mais especificamente, o estimador de estados determina valores para as tensões complexas em todas as barras do sistema, a partir das quais pode-se obter virtualmente qualquer variável de interesse relativa às condições operativas do sistema.

Diversos métodos estão disponíveis na literatura para a Estimação de Estados (EE) em sistemas elétricos de potência. A escolha do método de EE, bem como o tipo de modelagem do sistema (barra-ramo ou seção de barra) deve ser pautado pelo nível de detalhamento nas informações fornecidas, robustez e confiabilidade do algoritmo utilizado e esforço computacional requerido, entre outros fatores.

Este capítulo apresenta alguns conceitos fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho relacionados à EESP e análise de topologia, visando a modelagem em tempo real de sistemas elétricos de potência representados de forma convencional.

2.2 Estimação de Estados

A modelagem da rede em tempo real pode ser dividida no processamento lógico (de quantidades binárias que refletem o *status* de ramos chaveáveis) e numérico (de variáveis representadas em ponto flutuante, como fluxos e injeções de potência, magnitudes das tensões nodais, etc.). Durante a EE convencional, a topologia e os parâmetros da rede são em geral considerados conhecidos e os dados analógicos são

processados usando a modelagem barra-ramo da rede elétrica. Para esta abordagem da EE, os dados lógicos do sistema são analisados pelo Configurador de Redes e os numéricos pelo Estimador de Estados [30].

2.2.1 Configurador de Redes

A função do configurador de redes é determinar a topologia atual da rede a partir do processamento das medidas digitais referentes ao status das chaves e disjuntores. Além destas medidas, que estão sujeitas a variações e tornam-se disponíveis através do sistema SCADA, o Configurador de Redes utiliza também os dados armazenados em um banco de dados estático que descreve a conexão dos equipamentos do sistema (geradores, transformadores, cargas, capacitores, linhas, etc) com as seções de barramento. Seções de barramento que estão em um mesmo nível de tensão podem ser interconectadas pelo fechamento de chaves e disjuntores. Para diferentes combinações de status dos disjuntores, resultarão, em geral, diferentes topologias da rede [1].

A saída do configurador é fornecida sob a forma tradicional de um modelo descrito por barras e ramos, isto é, corresponde ao diagrama unifilar do sistema de potência. Cada barra deve ser identificada juntamente com sua geração, suas cargas e dispositivos em derivação. A conectividade entre as barras devido à presença de linhas de transmissão e transformadores deve também ser descrita. O configurador deve igualmente identificar ilhamentos e descartar as ilhas que não tem geração, incluindo barras e ramos isolados.

A presença de erros nas medidas digitais relativas aos status das chaves e disjuntores faz com que a topologia resultante do configurador de rede seja incorreta, o que resulta em erros de topologia [70].

2.2.2 Modelo de Medição

Considerando-se um sistema de potência com N barras e m medidas, tem-se o seguinte modelo de medição:

$$\mathbf{z}_m = \mathbf{z}_0 + \boldsymbol{\eta}_m \quad (2.1)$$

onde \mathbf{z}_m é o vetor de medidas que compõem o plano de medição, \mathbf{z}_0 é o vetor com os valores verdadeiros das quantidades medidas e $\boldsymbol{\eta}_m$ é o vetor de erros aleatórios de medição.

Na prática, os valores verdadeiros das variáveis de estado do

sistema são desconhecidos. Sendo assim, para se estimar tais valores deve-se fazer algumas suposições sobre o modelo de medição e utilizar a relação entre as quantidades medidas e os estados. Para tal, supõe-se que o vetor de erros de medição $\boldsymbol{\eta}_m$ apresenta a distribuição normal, com média zero e matriz de covariância \mathbf{R}_m , e que os erros de medição são não correlacionados, isto é:

$$E\{\boldsymbol{\eta}_m\} = 0 \quad e \quad E\{\boldsymbol{\eta}_m \boldsymbol{\eta}_m^T\} = \mathbf{R}_m = \text{diag}\{\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_m^2\} \quad (2.2)$$

onde σ_i^2 é a variância da medida i e $E\{\cdot\}$ é o operador Valor Esperado.

O vetor com os valores verdadeiros das quantidades medidas, \mathbf{z}_0 , pode sempre ser expresso em termos das variáveis de estado:

$$\mathbf{z}_0 = \mathbf{h}_m(\mathbf{x}) \quad (2.3)$$

sendo $\mathbf{h}_m(\mathbf{x})$ um vetor composto por m funções não-lineares do estado do sistema e \mathbf{x} o vetor de variáveis de estado, de dimensão igual a $n = 2N - 1$ e formado pelos módulos e ângulos de fase das tensões nodais. Na definição das variáveis de estado, está implícita a definição da referência angular, ou seja, um dos ângulos de fase das tensões nodais deve ser considerado igual a 0 radianos.

2.2.3 Formulação do Problema de EESP via Método dos Mínimos Quadrados Ponderados

A abordagem clássica para o problema de estimação de estados utiliza formulação baseada no Método dos Mínimos Quadrados Ponderados (MQP). De acordo com o método MQP, o vetor de estados estimados $\hat{\mathbf{x}}$ é determinado de forma a minimizar a soma ponderada do quadrado dos resíduos de estimação. Estes são definidos pela equação (2.4):

$$\mathbf{r}_m = \mathbf{z}_m - \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}}) \quad (2.4)$$

Consequentemente, a função-objetivo a ser minimizada pelo método MQP é definida como:

$$J(\hat{\mathbf{x}}) = [\mathbf{z}_m - \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}})]^T \mathbf{R}_m^{-1} [\mathbf{z}_m - \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}})] \quad (2.5)$$

Observa-se portanto que a ponderação dos resíduos quadráticos na função-objetivo é realizada pela matriz \mathbf{R}_m^{-1} , cujos elementos diagonais são iguais ao inverso da variância de cada medidor. Isso implica em que quanto mais preciso for o medidor, maior a ponderação do respec-

tivo resíduo, aumentando assim a relevância da medida correspondente na solução da EE.

2.2.4 Solução da EESP via Método da Equação Normal

Este método é também conhecido como Método de Gauss-Newton [30], por utilizar o algoritmo de Newton e a aproximação de Gauss para a matriz Hessiana do problema de otimização. Considerando-se a formulação do problema de EESP apresentado na Subseção 2.2.2, aplica-se as condições de otimalidade para o problema de minimização da equação (2.5), obtendo-se:

$$\left. \frac{\partial J}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{0} \quad \Rightarrow \quad \mathbf{H}_m^T(\hat{\mathbf{x}})\mathbf{R}_m^{-1}[\mathbf{z}_m - \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}})] = \mathbf{0} \quad (2.6)$$

onde $\mathbf{H}_m(\hat{\mathbf{x}}) = \left. \frac{\partial \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}}$ é a matriz Jacobiana de $\mathbf{h}_m(\mathbf{x})$.

A equação (2.6) é composta por um conjunto de equações escalares não-lineares de difícil solução. Para contornar esta dificuldade, busca-se a simplificação do problema através da linearização de $\mathbf{h}_m(\mathbf{x})$ em torno de um ponto \mathbf{x}^k , ou seja:

$$\mathbf{h}_m(\mathbf{x}) \approx \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}}^k) + \mathbf{H}_m(\hat{\mathbf{x}}^k)(\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}^k) \quad (2.7)$$

Substituindo a equação (2.7) na equação (2.1), obtém-se:

$$\mathbf{z}_m - \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}}^k) = \mathbf{H}_m(\hat{\mathbf{x}}^k)(\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}^k) + \boldsymbol{\eta}_m \quad (2.8)$$

ou ainda:

$$\Delta \mathbf{z}_m = \mathbf{H}_m(\hat{\mathbf{x}}^k)\Delta \mathbf{x} + \boldsymbol{\eta}_m \quad (2.9)$$

onde a equação (2.9) expressa a relação entre o vetor de medidas incrementais $\Delta \mathbf{z}$ e o vetor de correção dos estados, $\Delta \mathbf{x}$.

Esta análise resulta na nova definição da função objetivo, agora escrita para o modelo de medição linearizado, que pode ser assim representada:

$$J(\Delta \mathbf{x}) = [\Delta \mathbf{z}_m - \mathbf{H}_m(\hat{\mathbf{x}}^k)\Delta \mathbf{x}]^T \mathbf{R}_m^{-1}[\Delta \mathbf{z}_m - \mathbf{H}_m(\hat{\mathbf{x}}^k)\Delta \mathbf{x}] \quad (2.10)$$

Pode-se agora aplicar as condições de otimalidade para a equação (2.10), de se obtém:

$$\left. \frac{\partial J}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{0} \quad \Rightarrow \quad \mathbf{H}_m^T(\hat{\mathbf{x}})\mathbf{R}_m^{-1}[\Delta \mathbf{z}_m - \mathbf{H}_m(\hat{\mathbf{x}}^k)\Delta \mathbf{x}] = \mathbf{0} \quad (2.11)$$

ou, alternativamente:

$$[\mathbf{H}_m^T(\hat{\mathbf{x}})\mathbf{R}_m^{-1}\mathbf{H}_m(\hat{\mathbf{x}}^k)]\Delta \mathbf{x} = \mathbf{H}_m^T(\hat{\mathbf{x}})\mathbf{R}_m^{-1}\Delta \mathbf{z}_m \quad (2.12)$$

A equação (2.12) é denominada *Equação Normal de Gauss*, e representa o sistema linear a ser resolvido a cada iteração para a determinação do incremento do vetor de estado $\Delta \mathbf{x}$. A matriz de coeficientes no lado esquerdo da equação (2.12) é denominada *Matriz Ganho*.

2.2.4.1 Observabilidade

A capacidade de se estimarem os estados de um sistema de potência está relacionada à quantidade de medidas existentes e seus posicionamentos na rede. Apenas se existir um conjunto suficiente de medidas adequadamente distribuído sobre a rede para se estimarem os estados, pode-se dizer que o sistema é observável [61–63]. Por mais que o sistema elétrico opere normalmente em condições observáveis, a possibilidade de falhas no plano de medição, nos equipamentos e no sistema de transmissão de dados, fazem com que seja necessária a análise para estes pontos críticos de operação. Tal análise da rede inclui testes de observabilidade do sistema, identificação de ilhas observáveis e alocação de pseudo-medidas.

Há duas classes de métodos de análise de observabilidade de um sistema de potência: a abordagem topológica, na qual utilizam-se técnicas combinatórias e conceitos de teoria de grafos para extrair conclusões sobre o posto da matriz Jacobiana (\mathbf{H}_m); e a numérica, que utiliza técnicas numéricas baseadas em cálculos em ponto flutuante para concluir sobre a *observabilidade numérica*. A literatura relacionada à análise de observabilidade apresenta estudos do ponto de vista topológico [13, 38]. Alguns autores abordam esta questão de maneira híbrida [64, 65], utilizando ferramentas numéricas e topológicas. Trabalhos que tratam da observabilidade do ponto de vista exclusivamente numérico normalmente utilizam a modelagem barra-ramo do sistema elétrico. Além disso, a análise da observabilidade numérica da rede em sua maioria baseia-se em operações de fatoração ou transformações aplicadas à da matriz ganho [61–63, 66–69].

2.2.4.2 Inclusão de Informação *A Priori*

A disponibilidade de informações *a priori* tem por objetivo oferecer subsídios para a EESP. Ela oferece ao estimador um conhecimento prévio possivelmente existente a respeito das variáveis de estado.

A presença de informações *a priori* contribui para a estabilidade numérica do problema, além de auxiliar na manutenção da observabilidade do sistema, aspecto que pode ser relevante na análise de sistemas em nível de seção de barra [37]. Tais informações são modeladas como variáveis aleatórias e podem ser incluídas diretamente na função objetivo do problema de EE apresentado pela equação (2.10). Sendo assim, a nova função objetivo, levando em consideração as informações *a priori*, é acrescida do seguinte termo [15]:

$$\frac{1}{2} \mathbf{p}^T \boldsymbol{\Sigma}_0^{-1} \mathbf{p} \quad (2.13)$$

onde $\mathbf{p} = (\hat{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}})$ é um vetor $n \times 1$ e $\bar{\mathbf{x}}$ é o vetor que contém as informações *a priori* sobre as variáveis de estado e $\boldsymbol{\Sigma}_0$ é a matriz de covariância correspondente.

Aplicando-se as condições de otimalidade ao problema aumentado acrescido pelo termo apresentado em (2.13), obtemos a seguinte equação [15]:

$$[\mathbf{H}_m^T \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{H}_m + \boldsymbol{\Sigma}_0^{-1}] \Delta \mathbf{x} = \mathbf{H}_m^T \mathbf{R}_m^{-1} \Delta \mathbf{z}_m + \boldsymbol{\Sigma}_0^{-1} \Delta \bar{\mathbf{x}} \quad (2.14)$$

onde $\Delta \bar{\mathbf{x}} \triangleq (\bar{\mathbf{x}} - \mathbf{x}^k)$, e (2.14) representa a nova *Equação Normal de Gauss* que deverá ser resolvida a cada iteração.

Uma outra consequência importante do uso de informações *a priori*, é a que estas eliminam a necessidade de se definir múltiplas referências angulares quando topologias analisadas na modelagem em tempo real levam a ilhamentos no sistema. Informações *a priori* atuam como pseudomedidas de baixa exatidão e, em casos nos quais não há problemas com a observabilidade, seus valores exercem pequena influência sobre os estados estimados [38].

2.2.5 Solução da EESP via Método de Tableau Esperso

Visando a melhoria da estabilidade numérica dos métodos de solução da EESP, foi desenvolvido o Método de Tableau Esperso (também conhecido como Método da Matriz Aumentada ou Método de Hachtel),

que possui grau de estabilidade numérica intermediária entre o método da equação normal de Gauss [39] e os estimadores ortogonais a serem descritos na Seção 2.3.

A equação dos resíduos de estimação (2.4), descrita previamente, é reproduzida abaixo:

$$\mathbf{r}_m = \mathbf{z}_m - \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}}) \quad (2.15)$$

Levando-se em conta a equação (2.15), o problema de estimação de estados é então formulado como um problema de otimização restrita, cuja função objetivo é a soma ponderada dos quadrados dos resíduos e as restrições são impostas pelo modelo de medição, ou seja:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar} \quad & \frac{1}{2} \mathbf{r}_m^T \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{r}_m \\ \text{sujeito a} \quad & \mathbf{z}_m - \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}}) - \mathbf{r}_m = 0 \end{aligned} \quad (2.16)$$

Com isso, a função Lagrangeana resultante do problema formulado na equação (2.16), é dada por:

$$\mathcal{L}(\hat{\mathbf{x}}, \mathbf{r}_m, \boldsymbol{\lambda}_m) = \frac{1}{2} \mathbf{r}_m^T \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{r}_m + \boldsymbol{\lambda}_m^T [\mathbf{z}_m - \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}}) - \mathbf{r}_m] \quad (2.17)$$

onde $\boldsymbol{\lambda}_m$ é o vetor dos multiplicadores de Lagrange correspondente à equação que relaciona os resíduos às quantidades medidas e aos estados.

Aplicando-se as condições de otimalidade de primeira ordem, obtém-se o seguinte conjunto de equações não lineares:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{L}(\hat{\mathbf{x}}, \mathbf{r}_m, \boldsymbol{\lambda}_m)}{\partial \mathbf{r}_m} &= \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{r}_m - \boldsymbol{\lambda}_m = 0 \\ \frac{\partial \mathcal{L}(\hat{\mathbf{x}}, \mathbf{r}_m, \boldsymbol{\lambda}_m)}{\partial \boldsymbol{\lambda}_m} &= \mathbf{z}_m - \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}}) - \mathbf{r}_m = 0 \\ \frac{\partial \mathcal{L}(\hat{\mathbf{x}}, \mathbf{r}_m, \boldsymbol{\lambda}_m)}{\partial \hat{\mathbf{x}}} &= -\mathbf{H}_m^T(\hat{\mathbf{x}}) \boldsymbol{\lambda}_m = 0 \end{aligned} \quad (2.18)$$

Da primeira equação acima, $\mathbf{r}_m = \mathbf{R}_m \boldsymbol{\lambda}_m$. Reescrevendo as demais equações de otimalidade considerando este resultado, temos:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \boldsymbol{\lambda}} &= \mathbf{R}_m \boldsymbol{\lambda}_m - \mathbf{z}_m + \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}}) = 0 \\ \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \hat{\mathbf{x}}} &= -\mathbf{H}_m^T(\hat{\mathbf{x}}) \boldsymbol{\lambda}_m = 0 \end{aligned} \quad (2.19)$$

A solução do sistema de equações (2.18) é obtida aplicando-se o método de Newton, resultando na equação matricial (2.20):

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R}_m & \mathbf{H}_m(\hat{\mathbf{x}}) \\ \mathbf{H}_m^T(\hat{\mathbf{x}}) & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda}_m \\ \Delta \hat{\mathbf{x}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_m - \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}}) \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Como no caso do método da Equação Normal, o problema é também resolvido de forma iterativa. Entretanto, a presente abordagem tem como benefício o fato de evitar o cálculo explícito da matriz ganho, o que melhora sensivelmente o condicionamento numérico do problema [39].

A inclusão de informações *a priori* na equação (2.16), pode ser feita da mesma forma que apresentado na Subseção 2.2.4, resultando no novo problema de minimização restrito a ser resolvido, apresentado pela equação (2.21).

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \frac{1}{2} \mathbf{r}_m^T \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{r}_m + \frac{1}{2} \mathbf{p}^T \boldsymbol{\Sigma}_0^{-1} \mathbf{p} \\ \text{Sujeito a :} \quad & \mathbf{z}_m - \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}}) - \mathbf{r}_m = 0 \end{aligned} \quad (2.21)$$

Após a aplicação das condições de otimalidade para solução do problema e da linearização do conjunto de equações resultantes, obtém-se o seguinte sistema de equações lineares representados na forma matricial [38]:

$$\begin{pmatrix} -\boldsymbol{\Sigma}_0^{-1} & \mathbf{H}_m^T(\hat{\mathbf{x}})^k \\ \mathbf{H}_m(\hat{\mathbf{x}}^k) & \mathbf{R}_m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \hat{\mathbf{x}} \\ \boldsymbol{\lambda}_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{\Sigma}_0^{-1} \mathbf{p}^k \\ \mathbf{z}_m - \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}}^k) \end{pmatrix} \quad (2.22)$$

Com isso, os estados atualizados a cada iteração serão dados por:

$$\hat{\mathbf{x}}^{k+1} = \hat{\mathbf{x}}^k + \Delta \hat{\mathbf{x}} \quad (2.23)$$

2.2.6 Formulação do Problema de EESP via Método dos Mínimos Valores Absolutos Ponderados

Dentre as abordagens para solução de problemas de EESP com base em critérios não-quadráticos, a mais conhecida é o *Método dos Mínimos Valores Absolutos Ponderados* (MVAP). Tal método consiste na formulação do problema de EESP considerando a norma l_1 dos resíduos de estimação e possui importantes propriedades para rejeição de erros grosseiros [40].

De acordo com a formulação MVAP, o problema de otimização restrito passa a ser expresso por:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i=1}^m w_i |r_{m_i}| \\ \text{s. a: } \quad & \mathbf{z}_m = \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}}) + \mathbf{r}_m \end{aligned} \quad (2.24)$$

onde \mathbf{w} é o vetor dos pesos associados aos valores medidos, sendo cada elemento de \mathbf{w} dado por $w_i = \frac{1}{\sigma_i^2}$ e σ_i^2 a variância da i -ésima medida.

Para evitar problemas decorrentes da descontinuidade das derivadas dos módulos de r_{m_i} , utiliza-se um artifício matemático. Este consiste na introdução de duas variáveis não-negativas, $\boldsymbol{\eta}$ e $\boldsymbol{\rho}$, correspondentes à parte positiva e negativa do vetor \mathbf{r}_m , respectivamente. O novo problema de otimização é dado por:

$$\begin{aligned} \min \quad & \mathbf{w}^t(\boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{\rho}) \\ \text{s. a: } \quad & \mathbf{z}_m = \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}}) + (\boldsymbol{\eta} - \boldsymbol{\rho}) \end{aligned} \quad (2.25)$$

$$\boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\rho} \geq 0 \quad (2.26)$$

Considerando a utilização de método Primal-Dual de Pontos Interiores e a não negatividade de $\boldsymbol{\eta}$ e $\boldsymbol{\rho}$, acrescentam-se barreiras logarítmicas ao problema de otimização (2.25). Levando-se também em conta a linearização de $\mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}})$, tem-se:

$$\min \quad \mathbf{w}^T(\boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{\rho}) - \mu \sum_{i=1}^m (\ln \eta_i + \ln \rho_i) \quad (2.27)$$

$$\text{s. a: } \quad (\mathbf{H}_m \quad \mathbf{I} \quad -\mathbf{I}) \begin{pmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \boldsymbol{\eta} \\ \boldsymbol{\rho} \end{pmatrix} = \Delta \mathbf{z}_m \quad (2.28)$$

onde μ é o parâmetro da barreira logarítmica [41, 42].

De modo análogo ao apresentado na Subseção 2.2.5, para a solução do problema de otimização aqui apresentado deve-se encontrar a função Lagrangeana da equação (2.27), aplicar as condições de otimalidade de primeira ordem e resolver o conjunto de equações não-lineares através de sucessivas iterações. A direção de busca é dada pelas condições de otimalidade de primeira ordem de Karush-Kuhn-Tucker. A aplicação do método de Newton para resolver o sistema de equações não lineares resultantes fornece:

$$\nabla^2 \mathcal{L}|_k \Delta \mathbf{y} = -\nabla \mathcal{L}|_k,$$

que leva à seguinte equação matricial:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{H}_m^T \\ \mathbf{0} & \mathbf{D}_{\sigma_\eta} & \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{D}_{\sigma_\rho} & -\mathbf{I} \\ \mathbf{H}_m & \mathbf{I} & -\mathbf{I} & \mathbf{0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \boldsymbol{\eta} \\ \Delta \boldsymbol{\rho} \\ \Delta \boldsymbol{\lambda}_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \boldsymbol{\mu} \mathbf{e} - \mathbf{D}_\eta \boldsymbol{\sigma}_\eta \\ \boldsymbol{\mu} \mathbf{e} - \mathbf{D}_\rho \boldsymbol{\sigma}_\rho \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} \quad (2.29)$$

onde $\mathbf{D}_{(\cdot)}$ representa a matriz diagonal, $\boldsymbol{\sigma}_\eta = \mathbf{w} + \boldsymbol{\lambda}_m$ e $\boldsymbol{\sigma}_\rho = \mathbf{w} - \boldsymbol{\lambda}_m$.

Uma vez obtida a direção de busca mediante a solução da equação (2.29), a atualização das variáveis é feita com o auxílio do cálculo dos passos primal e dual. Este cálculo tem por objetivo garantir a não-negatividade das variáveis primais $\boldsymbol{\eta}$ e $\boldsymbol{\rho}$, além das variáveis duais $\boldsymbol{\sigma}_\eta$ e $\boldsymbol{\sigma}_\rho$, durante o processo iterativo:

$$\begin{aligned} \alpha_p &= \min \left\{ \min_{\Delta \eta_i < 0} \frac{\eta_i}{\Delta \eta_i}, \min_{\Delta \rho_i < 0} \frac{\rho_i}{\Delta \rho_i}, 1 \right\} \\ \alpha_d &= \min \left\{ \min_{\Delta \sigma_{\eta_i} < 0} \frac{\sigma_{\eta_i}}{\Delta \sigma_{\eta_i}}, \min_{\Delta \sigma_{\rho_i} < 0} \frac{\sigma_{\rho_i}}{\Delta \sigma_{\rho_i}}, 1 \right\} \end{aligned} \quad (2.30)$$

Após o cálculo dos passos primal e dual, a atualização das variáveis

$$\mathbf{y} = [\mathbf{x} \quad \boldsymbol{\eta} \quad \boldsymbol{\rho} \quad \boldsymbol{\lambda}_m]^T$$

é feita pela aplicação dos procedimentos do método primal-dual de pontos interiores [41]:

$$\mathbf{y}^{k+1} = \mathbf{y}^k + \kappa \alpha \Delta \mathbf{y} \quad (2.31)$$

onde $\kappa = 0,9995$ garante que a solução esteja dentro da região viável e α representa α_p para as variáveis primais e α_d para as variáveis duais.

O parâmetro de barreira é atualizado com base na brecha de dualidade [41]:

$$\mu = \frac{\boldsymbol{\eta}^k T \boldsymbol{\sigma}_\eta^k + \boldsymbol{\rho}^k T \boldsymbol{\sigma}_\rho^k}{2\beta n} \quad (2.32)$$

onde $\beta = 10$ e n é o número de restrições.

2.3 Método sequencial-ortogonal via rotações de Givens

A maior robustez numérica apresentada pelos métodos ortogonais em relação ao método da equação Normal de Gauss motivou a sua aplicação a problemas de EESP [1, 43, 44].

No método ortogonal baseado nas rotações de Givens, a cada iteração as medidas são processadas sequencialmente. O subproblema linearizado solucionado na i -ésima iteração é escrito, por conveniência, na forma dada pela equação (2.33), em que considera-se que o número de medidas já processadas é igual ao número de estados.

$$\Delta \mathbf{z}^i = \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}^i) \Delta \hat{\mathbf{x}}^i + \varepsilon \quad (2.33)$$

onde $\Delta \mathbf{z}^i$ representa o vetor incremental de medidas com dimensão $n \times 1$, $\Delta \hat{\mathbf{x}}^i$ é o vetor de correção de estados a serem estimados com a mesma dimensão de $\Delta \mathbf{z}^i$, $\mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}^i)$ representando a matriz de observação (matriz quadrada de dimensões $n \times n$) e ε é o vetor de erros de medição.

Considerando z_1 uma nova medida a ser processada, a equação (2.5) torna-se:

$$\bar{J} = \left\| \left[\begin{array}{c} \mathbf{H}^T \\ h_1^T \end{array} \right] \Delta \hat{\mathbf{x}} - \left[\begin{array}{c} \Delta \mathbf{z} \\ \Delta z_1 \end{array} \right] \right\|^2 \quad (2.34)$$

onde \mathbf{H}^T e $\Delta \mathbf{z}$ correspondem às medidas já processadas, $\Delta z_1 = h_1^T \Delta \mathbf{x} + \varepsilon_1$ é a forma incremental da relação entre a nova medida e os estados e $\|\dots\|^2$ representa a Norma Euclidiana.

A vantagem de se utilizar métodos ortogonais está no fato de que ao se aplicar transformações ortogonais, a norma Euclidiana não é alterada [1, 44]. Assim, o valor de $\bar{J}(x)$, não se altera quando transformações ortogonais representadas por \mathbf{Q} são aplicadas ao argumento da norma da equação (2.34). Suponha que \mathbf{Q} é concebida de tal forma a triangularizar a matriz Jacobiana aumentada, isto é:

$$\mathbf{Q} \left[\begin{array}{c} \mathbf{H}^T \\ h_1^T \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \mathbf{U} \\ \mathbf{0} \end{array} \right] \quad (2.35)$$

enquanto que sua aplicação ao vetor de medidas incrementais resulta em:

$$\mathbf{Q} \left[\begin{array}{c} \Delta \mathbf{z} \\ \Delta z_1 \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \mathbf{w} \\ \tilde{e}_1 \end{array} \right] \quad (2.36)$$

Nas equações acima, a matriz \mathbf{U} é uma matriz triangular superior, $\mathbf{0}$ é um vetor nulo (linha), \mathbf{w} é um vetor $n \times 1$ e \tilde{e}_1 é um escalar.

O vetor $\Delta \hat{\mathbf{x}}$ que minimiza de $\bar{J}(x)$ é então obtido simplesmente resolvendo-se a equação (2.37) por substituição inversa.

$$\mathbf{U} \Delta \hat{\mathbf{x}} = \mathbf{w} \quad (2.37)$$

De posse da solução de (2.37), a estimativa do vetor de estados após o

processamento da nova medida é atualizada como:

$$\hat{\mathbf{x}}^{i+1} = \hat{\mathbf{x}}^i + \Delta \hat{\mathbf{x}} \quad (2.38)$$

Há diversas maneiras de se definir transformação ortogonal \mathbf{Q} que sistematicamente triangularizam a matriz de observação aumentada de acordo com a eq. (2.35). Como os estimadores seqüenciais processam as medidas e as equações correspondentes uma de cada vez, é vantajoso que a matriz a ser triangularizada via transformações ortogonais seja operada por linhas [45]. Um método adequado para isto é o algoritmo de Givens e é descrito em detalhes na Subseção 2.3.1 a seguir, a qual descreve o método de Givens sem raízes quadradas, que será utilizado na formulação do estimador de primeiro estágio no Centro de Operação Regional apresentado no Capítulo 6 desta tese.

2.3.1 Formulação do Problema de EESP via Método de Givens com Três Multiplicadores

O algoritmo de Givens consiste em aplicar rotações sucessivas entre os elementos de um vetor linha p e as linhas de uma matriz triangular superior \mathbf{U} até que os elementos de \mathbf{p} sejam completamente zerados. A Figura 1 ilustra este procedimento [1].

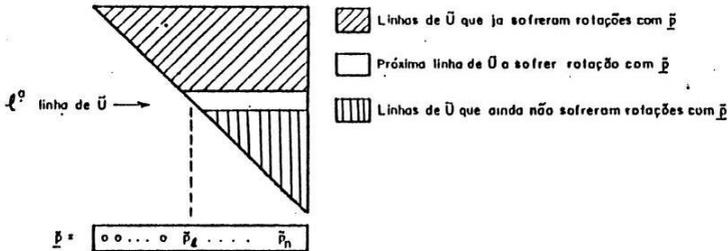


Figura 1 – Representação da triangularização de \mathbf{U} através de rotações de Givens [1].

Neste trabalho utilizam-se as rotações rápidas de Givens propostas primeiramente em [46] e aplicadas à EESP em [45] e [47]. De acordo com esta formulação, a matriz \mathbf{U} é decomposta da seguinte forma:

$$\mathbf{U} = \mathbf{D}^{\frac{1}{2}} \bar{\mathbf{U}} \quad (2.39)$$

onde \mathbf{D} é uma matriz diagonal e $\bar{\mathbf{U}}$ é a matriz triangular superior unitária.

A linha k da matriz \mathbf{U} de (2.35) e o vetor \mathbf{p} como a nova linha da matriz de observação a ser processada podem ser escritos conforme as equações (2.40) e (2.41):

$$\mathbf{u} = [0 \quad \dots \quad 0 \quad \sqrt{d} \quad \dots \quad \sqrt{d}\bar{u}_k \quad \dots \quad \sqrt{d}\bar{u}_{n+1}] \quad (2.40)$$

$$\mathbf{p} = [0 \quad \dots \quad 0 \quad \sqrt{w}p_i \quad \dots \quad \sqrt{w}p_k \quad \dots \quad \sqrt{w}p_{n+1}] \quad (2.41)$$

onde w representa o peso atribuído a cada linha da matriz de observação e d o peso de cada linha da matriz \mathbf{U} (que é igual ao elemento diagonal correspondente da matriz \mathbf{D}).

Aplicando as rotações em cada linha, de forma a zerar o i -ésimo elemento de \mathbf{p} , as equações (2.40) e (2.41) podem ser reescritas da seguinte forma:

$$\mathbf{u} = [0 \quad \dots \quad 0 \quad \sqrt{d'} \quad \dots \quad \sqrt{d'}\bar{u}'_k \quad \dots \quad \sqrt{d'}\bar{u}'_{n+1}] \quad (2.42)$$

$$\mathbf{p} = [0 \quad \dots \quad 0 \quad 0 \quad \dots \quad \sqrt{w'}p'_k \quad \dots \quad \sqrt{w'}p'_{n+1}] \quad (2.43)$$

As equações que definem as relações entre as entradas originais e transformadas de \mathbf{u} e \mathbf{p} podem ser dadas por:

$$\begin{aligned} d' &= d + wp_i^2 \\ w' &= dw/d' \\ \bar{c} &= d/d' \\ \bar{s} &= wp_i/d' \end{aligned} \quad (2.44)$$

$$\left. \begin{aligned} p'_k &= p_k - p_i\bar{u}_k \\ \bar{u}_k &= \bar{c}\bar{u}_k + \bar{s}p_k \end{aligned} \right\}, \quad k = i + 1 \dots n + 1 \quad (2.45)$$

onde \bar{c} e \bar{s} são os parâmetros que definem cada rotação elementar.

Após o processamento de todas as linhas da matriz de observação, a solução do problema EESP pode ser facilmente obtida por substituição inversa com o uso de uma equação similar à (2.37). O valor da soma ponderada dos quadrados dos resíduos (2.34) é dado pelo valor final de d_{n+1} , após o processamento de todas as medidas em \mathbf{z} , sem a necessidade de cálculos adicionais [43].

2.4 Método de Givens em Blocos

O método de rotações de Givens em blocos baseia-se no algoritmo desenvolvido em [48] e será descrito nesta seção. Tal algoritmo é fundamentado pelo trabalho desenvolvido em [49], no qual a matriz ortogonal elementar \mathbf{Q} de dimensão 4×4 dada por:

$$\mathbf{Q} = \left[\begin{array}{c|c} \mathbf{A} & \mathbf{AB}^t \\ \hline -\mathbf{CB} & \mathbf{C} \end{array} \right] \quad (2.46)$$

onde \mathbf{A} , \mathbf{B} e \mathbf{C} são submatrizes não-singulares de dimensão 2×2 . As transformações representadas em \mathbf{Q} serão aplicadas simultaneamente a um par de linhas de uma matriz bloco triangular \mathbf{U} e a um par de linhas da matriz Jacobiana, aumentada pelas respectivas medidas. Este par de medidas deve ser processado conjuntamente, devido à forte correlação entre elas.

A condição de ortogonalidade requer que:

$$\begin{aligned} & \underbrace{\left[\begin{array}{c|c} \mathbf{A} & \mathbf{AB}^t \\ \hline -\mathbf{CB} & \mathbf{C} \end{array} \right]}_{\mathbf{Q}} \underbrace{\left[\begin{array}{c|c} \mathbf{A}^t & -\mathbf{B}^t \mathbf{C}^t \\ \hline \mathbf{BA}^t & \mathbf{C}^t \end{array} \right]}_{\mathbf{Q}^t} \\ &= \left[\begin{array}{c|c} \mathbf{AA}^t + \mathbf{AB}^t \mathbf{BA}^t & \mathbf{0} \\ \hline \mathbf{0} & \mathbf{CC}^t + \mathbf{CBB}^t \mathbf{C}^t \end{array} \right] = \mathbf{I}_{4 \times 4} \end{aligned} \quad (2.47)$$

e portanto:

$$\begin{cases} \mathbf{AA}^t + \mathbf{AB}^t \mathbf{BA}^t = \mathbf{I} \\ \mathbf{CC}^t + \mathbf{CBB}^t \mathbf{C}^t = \mathbf{I} \end{cases} \quad (2.48)$$

onde \mathbf{I} é uma matriz identidade 2×2 . A equação (2.48) pode ser reescrita como:

$$\begin{cases} \mathbf{A}^t \mathbf{A} = (\mathbf{I} + \mathbf{B}^t \mathbf{B})^{-1} \\ \mathbf{C}^t \mathbf{C} = (\mathbf{I} + \mathbf{B} \mathbf{B}^t)^{-1} \end{cases} \quad (2.49)$$

A transformação \mathbf{Q} é aplicada às matrizes $\check{\mathbf{J}}$ e $\check{\mathbf{K}}$, de forma a introduzir zeros na matriz $\check{\mathbf{K}}$.

$$\left[\begin{array}{c|c} \mathbf{A} & \mathbf{AB}^t \\ \hline -\mathbf{CB} & \mathbf{C} \end{array} \right] \begin{bmatrix} \check{\mathbf{J}} \\ \check{\mathbf{K}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \check{\mathbf{J}}' \\ \check{\mathbf{K}}' \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

onde,

$$\begin{aligned} \check{\mathbf{J}} &= [\mathbf{0} \quad \cdots \quad \mathbf{0} \quad \check{\mathbf{J}}_i \quad \check{\mathbf{J}}_{i+1} \quad \cdots \quad \check{\mathbf{J}}_l] \\ \check{\mathbf{K}} &= [\mathbf{0} \quad \cdots \quad \mathbf{0} \quad \check{\mathbf{K}}_i \quad \check{\mathbf{K}}_{i+1} \quad \cdots \quad \check{\mathbf{K}}_l] \end{aligned} \quad (2.51)$$

Com mostrado em [48], as matrizes $\check{\mathbf{J}}$ e $\check{\mathbf{K}}$ são formadas respectivamente por submatrizes $\check{\mathbf{J}}_i$ e $\check{\mathbf{K}}_i$ de dimensão 2×2 , e ainda por submatrizes $\mathbf{0}$ nulas, também de dimensão 2×2 .

Após as rotações em blocos (2.50), as matrizes $\check{\mathbf{J}}'$ e $\check{\mathbf{K}}'$ resultantes são dadas por:

$$\begin{aligned} \check{\mathbf{J}}' &= [\mathbf{0} \quad \cdots \quad \mathbf{0} \quad \check{\mathbf{J}}'_i \quad \check{\mathbf{J}}'_{i+1} \quad \cdots \quad \check{\mathbf{J}}'_l] \\ \check{\mathbf{K}}' &= [\mathbf{0} \quad \cdots \quad \mathbf{0} \quad \underbrace{\mathbf{0}}_{\check{\mathbf{K}}'_i} \quad \check{\mathbf{K}}'_{i+1} \quad \cdots \quad \check{\mathbf{K}}'_l] \end{aligned} \quad (2.52)$$

Ao fixar $\check{\mathbf{K}}'_i = \mathbf{0}$, tem-se que:

$$-\mathbf{C}\mathbf{B}\check{\mathbf{J}}_i + \mathbf{C}\check{\mathbf{K}}_i = \mathbf{0} \quad (2.53)$$

e portanto, lembrando que \mathbf{C} é não-singular, tem-se que:

$$\mathbf{B} = \check{\mathbf{K}}_i \check{\mathbf{J}}_i^{-1} \quad (2.54)$$

Tem-se da equação (2.49) que a matriz de rotações em blocos \mathbf{Q} pode ser totalmente determinada por sua submatriz \mathbf{B} , que é calculada por (2.54). É importante notar que o cálculo explícito das submatrizes \mathbf{A} e \mathbf{C} na equação (2.49) requer o uso da fatoração de Cholesky, que é o análogo matricial da raiz quadrada.

Partindo-se das rotações em blocos derivadas acima, é desenvolvida em Bez [48] uma versão rápida da rotação de Givens em blocos, seguindo o procedimento matemático da versão escalar apresentada na Subseção 2.3.1, na qual se considera que as matrizes $\check{\mathbf{J}}$ e $\check{\mathbf{K}}$ podem ser decompostas em:

$$\begin{aligned} \check{\mathbf{J}} &= \mathbf{\Delta}^{1/2} \mathbf{J} = \mathbf{\Delta}^{1/2} [\mathbf{0} \quad \cdots \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{J}_i \quad \mathbf{J}_{i+1} \quad \cdots \quad \mathbf{J}_l] \\ \check{\mathbf{K}} &= \mathbf{\Omega}^{1/2} \mathbf{K} = \mathbf{\Omega}^{1/2} [\mathbf{0} \quad \cdots \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{K}_i \quad \mathbf{K}_{i+1} \quad \cdots \quad \mathbf{K}_l] \end{aligned} \quad (2.55)$$

onde $\mathbf{\Delta}$ e $\mathbf{\Omega}$ são matrizes 2×2 que podem ser interpretadas como “pesos” atribuídos a \mathbf{J} e \mathbf{K} , respectivamente. Pode-se ressaltar que, caso $\mathbf{\Delta}$ e $\mathbf{\Omega}$ sejam não-singulares, não há restrição quanto à sua estrutura.

Como resultado, as matrizes $\check{\mathbf{J}}$ e $\check{\mathbf{K}}$ podem ser re-escritas de

forma particionada:

$$\begin{bmatrix} \check{\mathbf{J}} \\ \check{\mathbf{K}} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta^{1/2} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \Omega^{1/2} \end{bmatrix}}_{\mathbf{W}^{1/2}} \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{J} \\ \mathbf{K} \end{bmatrix}}_{\mathbf{M}} \triangleq \mathbf{W}^{1/2} \mathbf{M} \quad (2.56)$$

Aplica-se as rotações de Givens em blocos \mathbf{Q} às matrizes $\check{\mathbf{J}}$ e $\check{\mathbf{K}}$, fatoradas como na equação (2.55),

$$\mathbf{Q} \mathbf{W}^{1/2} \mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{A}\mathbf{B}^t \\ -\mathbf{C}\mathbf{B} & \mathbf{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta^{1/2} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \Omega^{1/2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{J}_i & \mathbf{J}_{i+1} & \cdots & \mathbf{J}_l \\ \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{K}_i & \mathbf{K}_{i+1} & \cdots & \mathbf{K}_l \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

o que resulta em:

$$\begin{bmatrix} \Delta^{1/2} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \Omega^{1/2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{J}'_i & \mathbf{J}'_{i+1} & \cdots & \mathbf{J}'_l \\ \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \underbrace{\mathbf{0}}_{\mathbf{K}'_i} & \mathbf{K}'_{i+1} & \cdots & \mathbf{K}'_l \end{bmatrix} \triangleq \mathbf{W}'^{1/2} \mathbf{M}' \quad (2.58)$$

Ao se fixar $\mathbf{K}'_i = \mathbf{0}$, tem-se como consequência que:

$$-\mathbf{C}\mathbf{B}\Delta^{1/2}\mathbf{J}_i + \mathbf{C}\Omega^{1/2}\mathbf{K}_i = \mathbf{0} \quad (2.59)$$

e portanto, assumindo novamente a não-singularidade de \mathbf{C} , tem-se que:

$$\mathbf{B} = (\Omega^{1/2}\mathbf{K}_i)(\Delta^{1/2}\mathbf{J}_i)^{-1} \quad (2.60)$$

De (2.57) e (2.58) conclui-se que a relação básica entre as matrizes antes e após as rotações de Givens em blocos é dada por:

$$\mathbf{Q} \mathbf{W}^{1/2} \mathbf{M} = \mathbf{W}'^{1/2} \mathbf{M}' \quad (2.61)$$

que é análoga ao caso escalar. Desta forma, uma nova matriz de rotação \mathbf{P} é definida de modo que quando aplicada diretamente a \mathbf{M} resulte em:

$$\mathbf{P}\mathbf{M} = \mathbf{M}' \quad (2.62)$$

o que resulta em:

$$\mathbf{Q} \mathbf{W}^{1/2} \mathbf{M} = \mathbf{W}'^{1/2} \mathbf{P} \mathbf{M} \quad (2.63)$$

Com isso, a matriz de pesos \mathbf{W} é apenas atualizada, ao passo que a matriz 4×4 \mathbf{P} é a nova rotação a ser aplicada a \mathbf{M} . Os elementos de \mathbf{P}

e a expressão de atualização de $\mathbf{W}'^{1/2}$ são obtidos elemento a elemento a partir da equação (2.63):

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{AB}^t \\ -\mathbf{CB} & \mathbf{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta^{1/2} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \Omega^{1/2} \end{bmatrix} \mathbf{M} = \begin{bmatrix} \Delta'^{1/2} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \Omega'^{1/2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{11} & \mathbf{P}_{12} \\ \mathbf{P}_{21} & \mathbf{P}_{22} \end{bmatrix} \mathbf{M} \quad (2.64)$$

resultando em,

$$\left[\begin{array}{c|c} \mathbf{A}\Delta^{1/2} & \mathbf{AB}^t\Omega^{1/2} \\ \hline -\mathbf{CB}\Delta^{1/2} & \mathbf{C}\Omega^{1/2} \end{array} \right] \mathbf{M} = \left[\begin{array}{c|c} \Delta'^{1/2}\mathbf{P}_{11} & \Delta'^{1/2}\mathbf{P}_{12} \\ \hline \Omega'^{1/2}\mathbf{P}_{21} & \Omega'^{1/2}\mathbf{P}_{22} \end{array} \right] \mathbf{M} \quad (2.65)$$

Como consequência, para se determinar \mathbf{P} é necessário solucionar o sistema de quatro equações matriciais abaixo:

$$\begin{cases} \mathbf{A}\Delta^{1/2} = \Delta'^{1/2}\mathbf{P}_{11} \\ \mathbf{AB}^t\Omega^{1/2} = \Delta'^{1/2}\mathbf{P}_{12} \\ -\mathbf{CB}\Delta^{1/2} = \Omega'^{1/2}\mathbf{P}_{21} \\ \mathbf{C}\Omega^{1/2} = \Omega'^{1/2}\mathbf{P}_{22} \end{cases} \quad (2.66)$$

O lado esquerdo do sistema (2.66) é formado por matrizes conhecidas, uma vez que os fatores de ponderação iniciais $\Delta^{1/2}$ e $\Omega^{1/2}$ são dados do problema e \mathbf{A} , \mathbf{B} e \mathbf{C} são calculados por (2.48) e (2.60). Já o lado direito é formado por seis incógnitas matriciais. Como resultado disso, o sistema de equações possui dois graus de liberdade. Seguindo a analogia com o caso escalar, foram propostas em [48] as seguintes escolhas são feitas simultaneamente para explorar estes dois graus de liberdade:

1. A submatriz \mathbf{P}_{22} é escolhida como:

$$\mathbf{P}_{22} = \mathbf{I}_{2 \times 2} \quad (2.67)$$

fazendo com que, na transformação ortogonal em blocos \mathbf{P} , restem apenas três multiplicadores matriciais a serem determinados: \mathbf{P}_{11} , \mathbf{P}_{12} e \mathbf{P}_{21} ;

2. Após a rotação em blocos, o elemento \mathbf{J}'_i é definido como uma matriz identidade de dimensão 2. Re-examinando (2.62), obtém-se:

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \mathbf{P}_{11} & \mathbf{P}_{12} \\ \mathbf{P}_{21} & \mathbf{P}_{22} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{J}_i & \mathbf{J}_{i+1} & \cdots & \mathbf{J}_l \\ \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{K}_i & \mathbf{K}_{i+1} & \cdots & \mathbf{K}_l \end{bmatrix} \\
& = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{J}'_i & \mathbf{J}'_{i+1} & \cdots & \mathbf{J}'_l \\ \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{K}'_{i+1} & \cdots & \mathbf{K}'_l \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{2.68}$$

portanto,

$$\mathbf{P}_{11}\mathbf{J}_i + \mathbf{P}_{12}\mathbf{K}_i = \mathbf{I}_{2 \times 2} \tag{2.69}$$

Uma vez que o algoritmo é inicializado com $\mathbf{J}_i = \mathbf{I}_{2 \times 2}$, as rotações em blocos subsequentes não devem alterar este valor. Com isso, $\mathbf{J}_i = \mathbf{J}'_i = \mathbf{I}_{2 \times 2}$ e a equação (2.69) pode ser reescrita como:

$$\mathbf{P}_{11} + \mathbf{P}_{12}\mathbf{K}_i = \mathbf{I}_{2 \times 2} \tag{2.70}$$

Ao solucionar o sistema de equações (2.66), sujeito à escolha dos graus de liberdade (2.67) e (2.70), tem-se que:

$$\begin{cases} \Delta' = \Delta + \mathbf{K}_i^t \Omega \mathbf{K}_i \\ \mathbf{P}_{11} = \Delta'^{-1} \Delta \\ \mathbf{P}_{12} = \Delta'^{-1} \mathbf{K}_i^t \Omega \\ \Omega' = \Omega (\mathbf{I} - \mathbf{K}_i \mathbf{P}_{12}) \\ \mathbf{P}_{21} = -\mathbf{K}_i \\ \mathbf{P}_{22} = \mathbf{I} \end{cases} \tag{2.71}$$

Nesta nova versão em blocos das rotações rápidas de Givens não é necessária a fatoração de Cholesky para determinar \mathbf{P} . Além disso, é necessário atualizar apenas as matrizes Δ e Ω , de modo que decomposições de Cholesky para se obter $\Delta^{1/2}$ e $\Omega^{1/2}$ nunca são efetivamente calculadas.

2.4.1 Formulação do Problema de EESP via Rotações de Givens em Blocos

A solução da estimação de estados via rotações rápidas de Givens em blocos é feita de forma semelhante àquela do estimador baseado na versão escalar. Porém, como na versão em blocos as medidas são

processadas aos pares, é possível considerar uma eventual correlação entre os erros [48].

Considere o problema de estimação de estados abaixo, linearizado em torno de um ponto $\hat{\mathbf{x}}^k$, a ser solucionado a cada iteração:

$$\underset{\Delta \hat{\mathbf{x}}^k}{\text{Min}} J(\Delta \hat{\mathbf{x}}^k) = \frac{1}{2} [\Delta \check{\mathbf{z}}^k - \check{\mathbf{H}}(\hat{\mathbf{x}}^k) \Delta \hat{\mathbf{x}}^k]^t [\Delta \check{\mathbf{z}}^k - \check{\mathbf{H}}(\hat{\mathbf{x}}^k) \Delta \hat{\mathbf{x}}^k] \quad (2.72a)$$

$$= \frac{1}{2} \left\| \Delta \check{\mathbf{z}}^k - \check{\mathbf{H}}(\hat{\mathbf{x}}^k) \Delta \hat{\mathbf{x}}^k \right\|^2 \quad (2.72b)$$

onde $\|\cdot\|$ é a função norma Euclidiana e

$$\begin{aligned} \check{\mathbf{H}}(\hat{\mathbf{x}}^k) &\triangleq \mathbf{R}^{-1/2} \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}^k) \\ \Delta \check{\mathbf{z}}^k &\triangleq \mathbf{R}^{-1/2} \Delta \mathbf{z}^k \end{aligned} \quad (2.73)$$

Assim com descrito em [48], pode-se supor, sem perda de generalidade, que em um dado momento do processamento sequencial de medidas, a matriz $\check{\mathbf{H}}(\hat{\mathbf{x}}^k)$ tenha dimensão igual ao número de variáveis estados, ou seja $n \times n$, e portanto $\Delta \check{\mathbf{z}}^k$ é um vetor $n \times 1$. Os componentes de um par de medidas (z_i, z_j) a ser processado pelo estimador podem ser representados pelo modelo de medição $z_i = h_i(\mathbf{x}) + \varepsilon_i$ e $z_j = h_j(\mathbf{x}) + \varepsilon_j$, respectivamente, e que este par de medidas possui matriz de covariância dada por:

$$E\{\varepsilon_i \varepsilon_j\} = \mathbf{R}_{i,j} = \begin{bmatrix} \sigma_i^2 & c_{i,j} \\ c_{j,i} & \sigma_j^2 \end{bmatrix} \quad (2.74)$$

onde σ_i^2 e σ_j^2 são as variâncias próprias dos erros das medidas i e j , respectivamente, e $c_{i,j}$ e $c_{j,i}$ são as covariâncias entre os erros do par. As matrizes Jacobianas de h_i e h_j em torno do ponto $\hat{\mathbf{x}}^k$ são dadas por $\mathbf{h}_i(\hat{\mathbf{x}}^k)$ e $\mathbf{h}_j(\hat{\mathbf{x}}^k)$, ambas com dimensão $1 \times n$.

Deve-se considerar ainda que (z_i, z_j) é o próximo par de medidas a ser processado pelo estimador de estados. Com isso, a função objetivo (2.72b) é re-escrita como:

$$J(\Delta \hat{\mathbf{x}}^k) = \frac{1}{2} \left\| \begin{bmatrix} \Delta \check{\mathbf{z}}^k \\ \Delta \check{z}_i^k \\ \Delta \check{z}_j^k \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \check{\mathbf{H}}(\hat{\mathbf{x}}^k) \\ \check{\mathbf{h}}_i(\hat{\mathbf{x}}^k) \\ \check{\mathbf{h}}_j(\hat{\mathbf{x}}^k) \end{bmatrix} \Delta \hat{\mathbf{x}}^k \right\|^2 \quad (2.75)$$

onde $\Delta z_i^k = z_i - h_i(\hat{\mathbf{x}}^k)$, $\Delta z_j^k = z_j - h_j(\hat{\mathbf{x}}^k)$ e o sinal $\check{}$ indica o escalon-

namento já definido na equação (2.73).

A norma Euclidiana em (2.75) é invariante à aplicação de transformações ortogonais. Uma nova transformação ortogonal \mathbf{T} é definida de modo que:

$$\mathbf{T} \begin{bmatrix} \underline{\Delta \check{z}}^k \\ \Delta \check{z}_i^k \\ \Delta \check{z}_j^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{c} \\ e_i \\ e_j \end{bmatrix} \quad (2.76)$$

$$\mathbf{T} \begin{bmatrix} \check{\mathbf{H}}(\hat{\mathbf{x}}^k) \\ \check{\mathbf{h}}_i(\hat{\mathbf{x}}^k) \\ \check{\mathbf{h}}_j(\hat{\mathbf{x}}^k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{U} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

onde \mathbf{c} é um vetor $n \times 1$, e_i e e_j são escalares, \mathbf{U} é uma matriz $n \times n$ triangular superior e $\mathbf{0}$ são vetores nulos $1 \times n$.

Aplica-se a nova transformação ortogonal \mathbf{T} à função objetivo (2.75), resultando em:

$$\underset{\Delta \hat{\mathbf{x}}^k}{\text{Min}} J(\Delta \hat{\mathbf{x}}^k) = \frac{1}{2} \|\mathbf{c} - \mathbf{U} \Delta \hat{\mathbf{x}}^k\|^2 + \underbrace{e_i^2 + e_j^2}_{SQPR} \quad (2.77)$$

Após o par de medidas z_i e z_j ser processado, o vetor $\Delta \hat{\mathbf{x}}^k$ que minimiza o subproblema (2.77) será obtido através da solução do sistema triangular de equações abaixo:

$$\mathbf{U} \Delta \hat{\mathbf{x}}^k = \mathbf{c} \quad (2.78)$$

Da forma similar ao estimador baseado nas rotações de Givens escalares, a contribuição para a soma ponderada dos quadrados dos resíduos de medição pode ser calculada parcialmente, a cada processamento de um par de medidas.

A transformação ortogonal (2.76) é obtida mediante a aplicação de sucessivas rotações de Givens em blocos, de modo que:

$$\underbrace{[\mathbf{Q}_1] [\mathbf{Q}_2] \cdots [\mathbf{Q}_l]}_{\mathbf{T}} \begin{bmatrix} \check{\mathbf{H}}(\hat{\mathbf{x}}^k) & \Delta \check{z}^k \\ \check{\mathbf{h}}_i(\hat{\mathbf{x}}^k) & \Delta \check{z}_i^k \\ \check{\mathbf{h}}_j(\hat{\mathbf{x}}^k) & \Delta \check{z}_j^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{U} & \mathbf{c} \\ \mathbf{0} & e_i \\ \mathbf{0} & e_j \end{bmatrix} \quad (2.79)$$

Onde $[\mathbf{Q}_k]$ é uma matriz de rotação de Givens em blocos, dada por:

Aplicar as l rotações rápidas de Givens em blocos [48] resulta em:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{W}^{1/2} & \\ & \mathbf{W}^{1/2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{U}} & \bar{\mathbf{c}} \\ \mathbf{0} & 1 \\ \mathbf{0} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{U} & \mathbf{c} \\ \mathbf{0} & e_i \\ \mathbf{0} & e_j \end{bmatrix} \quad (2.84)$$

onde $\bar{\mathbf{U}}$ é uma matriz $n \times n$ triangular superior *unitária* (isto é, cuja diagonal é formada por elementos iguais a 1) e \mathbf{c} é um vetor $n \times 1$. Examinando a equação (2.84), tem-se que:

$$\begin{aligned} \mathbf{U} &= \mathbf{W}^{1/2} \bar{\mathbf{U}} \\ \mathbf{c} &= \mathbf{W}^{1/2} \bar{\mathbf{c}} \end{aligned} \quad (2.85)$$

Substituindo (2.85) em (2.78), o incremento $\Delta \hat{\mathbf{x}}^k$ do valor estimado para variáveis de estado na k -ésima iteração é obtido resolvendo-se por substituição reversa o sistema triangular:

$$\bar{\mathbf{U}} \Delta \hat{\mathbf{x}}^k = \bar{\mathbf{c}} \quad (2.86)$$

Esta formulação resulta em um estimador não iterativo que processa as medidas em coordenadas retangulares. Tal estimador se torna bastante atrativo para se trabalhar com grande número de informações. Sendo assim, vislumbra-se a possibilidade de se trabalhar com medidas de tensão e corrente provenientes de PMUs, utilizando coordenadas retangulares. Tal abordagem servirá de base para a formulação do estimador de segundo estágio, a ser implementado no Centro de Operação Regional, aprimorando a qualidade das estimativas do estimador convencional. Tal proposta será discutida no Capítulo 6.

2.5 Análise de erros grosseiros

A presença de erros grosseiros no plano de medição se deve a falhas nos canais de comunicação, equipamentos de medição defeituosos, erro na modelagem das pseudo-medidas, entre outros. Na estimação de estados, medidas portadoras de erros grosseiros são aquelas cujos erros não são compatíveis com o que é suposto no modelo de medição. Como resultado da presença de tais medidas, a estimação de estados final é prejudicada, gerando deterioração nas estimativas, uma vez que o estimador baseado no Método dos Mínimos Quadrados minimiza a soma ponderada do quadrado dos resíduos, e resíduos grandes devido a

presença de erros grosseiros afetam significativamente o resultado final da estimação.

Nesta seção são apresentadas duas metodologias para a detecção de erros grosseiros, uma para métodos convencionais e outra para métodos ortogonais. Tais ferramentas são fundamentais para o desenvolvimento do estimador proposto nesta tese.

2.5.1 Detecção, identificação e eliminação de erros grosseiros para método de Tableau Esparso

A presença de erros grosseiros no plano de medição pode ser detectada através da análise do valor final obtido para função objetivo, $J(\hat{\mathbf{x}})$, do problema de otimização (2.21). Caso $J(\hat{\mathbf{x}})$ seja maior que um limiar definido com base na distribuição do qui-quadrado e em uma probabilidade de falso alarme fixada para o modelo em questão [50,51], há indícios da presença de erros grosseiros entre as medidas. Com base no resultado deste teste de detecção de medidas espúrias, duas alternativas podem ser tomadas. Se o teste indicar a não existência de erros grosseiros, o processo de estimação é encerrado. Em caso contrário, as medidas portadoras de erro grosseiro devem ser localizadas, o que requer o exame individual dos resíduos da estimação. Se apenas uma única medida está contaminada com erro grosseiro, à primeira vista uma possível estratégia de identificação poderia ser baseada na determinação do máximo resíduo, com a expectativa de que este correspondesse a medida espúria. Entretanto, isto não é necessariamente verdade, pois medidores de diferentes tipos de quantidades possuem diferentes classes de exatidão e outras características, tal que as variâncias dos resíduos podem ser significativamente distintas umas das outras. Além disso, com planos de medição deficientes aumenta a possibilidade de que os resíduos sejam correlacionados entre si, de modo que o efeito de um erro grosseiro associado a uma medida pode se espalhar sobre os resíduos de outras quantidades. Supondo que a redundância das medidas é adequada, estas dificuldades são contornadas utilizando-se o Método do Máximo Resíduo Normalizado, conforme descrito a seguir.

Para tal, considera-se, sem perda de generalidade para o caso não linear, o modelo de medição linearizado, cujo vetor dos resíduos de estimação é dado por:

$$\mathbf{r}_m = \Delta \mathbf{z}_m - \Delta \hat{\mathbf{z}}_m = \Delta \mathbf{z}_m - \mathbf{H}_m \Delta \hat{\mathbf{x}} \quad (2.87)$$

O vetor de incrementos nas variáveis de estado fornecido durante

o processo iterativo de solução da equação normal é dado por:

$$\Delta \hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{H}_m^T \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{H}_m)^{-1} \mathbf{H}_m^T \mathbf{R}_m^{-1} \Delta \mathbf{z}_m \quad (2.88)$$

então o vetor dos resíduos de medição pode ser re-escrito como:

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_m &= [\mathbf{I} - \mathbf{H}_m (\mathbf{H}_m^T \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{H}_m)^{-1} \mathbf{H}_m^T \mathbf{R}_m^{-1}] \Delta \mathbf{z}_m \\ &= [\mathbf{R}_m - \mathbf{H}_m (\mathbf{H}_m^T \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{H}_m)^{-1} \mathbf{H}_m^T] \mathbf{R}_m^{-1} \Delta \mathbf{z}_m \\ &= \mathbf{W} \mathbf{R}_m^{-1} \Delta \mathbf{z}_m \end{aligned} \quad (2.89)$$

onde $\mathbf{W} = \mathbf{R}_m - \mathbf{H}_m \mathbf{C}_x \mathbf{H}_m^T$, com a matriz de covariância dos erros de estimação, denotada \mathbf{C}_x , expressa como: $\mathbf{C}_x = (\mathbf{H}_m^T \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{H}_m)^{-1}$.

A partir da Eq. (2.89), define-se a matriz de sensibilidade dos resíduos como:

$$\mathbf{S} \triangleq \mathbf{W} \mathbf{R}_m^{-1} = \mathbf{I} - \mathbf{H}_m (\mathbf{H}_m^T \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{H}_m)^{-1} \mathbf{H}_m^T \mathbf{R}_m^{-1} \quad (2.90)$$

Interpretando-se a equação (2.89), verifica-se que a matriz de sensibilidade \mathbf{S} indica como o efeito de uma medida portadora de erro grosseiro se espalha sobre os elementos do vetor de resíduos. Mostra-se também que a matriz \mathbf{W} é a matriz de covariância dos resíduos [51].

Como os resíduos normalmente apresentam variâncias diferentes, nem sempre a medida cujo valor residual em módulo é maior que os demais é a medida portadora de erro grosseiro. Para efetuar uma comparação justa entre os resíduos, deve-se calcular o vetor de resíduos normalizados, que é definido como:

$$\mathbf{r}_N \triangleq \mathbf{D}^{-1/2} \mathbf{r}_m \quad (2.91)$$

onde $\mathbf{D} = \text{diag}(\mathbf{W})$.

Em outras palavras, o resíduo normalizado para uma dada medida k é obtido dividindo-se o resíduo da medida k pelo desvio-padrão deste resíduo, isto é:

$$r_{Nk} = \frac{r_{mk}}{\sqrt{W_{kk}}} \quad (2.92)$$

onde W_{kk} representa o termo diagonal da matriz de covariância dos resíduos \mathbf{W} .

Com isso, em um sistema de potência monitorado através de um plano de medição que oferece boas condições de redundância, se apenas uma medida é portadora de erro grosseiro e as demais medidas são perfeitas, então a medida errônea apresenta o máximo resíduo normalizado em valor absoluto [50]. Caso existam erros grosseiros múltiplos,

uma abordagem geralmente utilizada consiste na execução sucessiva de ciclos de estimação identificação-eliminação de erros grosseiros. Entretanto, este procedimento pode falhar na presença de erros grosseiros iterativos, caso em que métodos mais elaborados devem ser empregados [51].

2.5.2 Detecção, identificação e eliminação de erros grosseiros para método de Givens com três multiplicadores

A grande vantagem de se utilizar o método de Givens descrito na Subseção 2.3.1 está no fato de que a soma parcial dos quadrados dos resíduos está disponível assim que a medida é processada. Como consequência, este fato pode ser utilizado para detecção de erros grosseiros [45].

De forma a extrair o máximo proveito do algoritmo, deve-se realizar o teste de detecção de erros grosseiros após o processamento de cada linha. Isto não implica que o erro grosseiro está presente na última medida processada, mas sim que há evidências de erro grosseiro no conjunto de medidas anteriormente processadas, que a inclui. Este fato reduz o conjunto de busca, e é baseado na utilização de um limiar variável K , que é alterado de acordo com a ordem da medida processada, dado por:

$$K = \chi_{k;(1-\alpha)}^2 \quad (2.93)$$

onde k é o valor corrente do número de graus de liberdade.

Uma análise mais cuidadosa do problema mostra que, na realidade, o teste não deve ser realizado após o processamento de certas linhas da matriz Jacobiana \mathbf{H} . Para esclarecer este ponto, considere que $i, l < i < m$, seja a ordem da linha de \mathbf{H} aumentada que acabou de ser completamente zerada através de sucessivas rotações de Givens. O exame da *soma ponderada dos quadrados dos resíduos* (SPQR) resultante pode revelar que: (a) o valor da SPQR permaneceu inalterado; ou (b) o processamento da linha i provocou um aumento na SPQR. É claro que não há nenhum objetivo em se aplicar o teste de detecção para as medidas associadas com o caso (a). Estas medidas serão chamadas medidas básicas. O fato de que a SPQR não se altera após o processamento de uma medida básica implica que, até aquele ponto, nenhuma medida redundante com a medida básica foi processada. O número total de medidas básicas é igual à dimensão do vetor de estado, n .

O limiar usado no teste de detecção para o método de Givens

baseado na Eq. (2.93) considera que o número de graus de liberdade é uma variável que depende da ordem da medida cujo processamento antecedeu ao teste. O procedimento completo para detecção é descrito a seguir.

Seja i a ordem da linha aumentada de \mathbf{H} que acabou de ser processada. Verifica-se inicialmente se a SPQR sofreu ou não variação com respeito ao valor correspondente à linha anteriormente processada. Em caso negativo, nenhum teste é realizado e passa-se ao processamento da linha seguinte. Em caso positivo, incrementa-se de 1 o número de graus de liberdade do qui-quadrado e em seguida compara-se o valor da nova SPQR com $\chi_{k;(1-\alpha)}^2$. Se $SPQR > \chi_{k;(1-\alpha)}^2$, conclui-se que ao menos uma medida com erro grosseiro foi processada até aquele ponto.

Ao cabo do processamento das m medidas, o número total de graus de liberdade será exatamente igual a $m - n$, de modo que um teste de detecção realizado neste ponto confunde-se com o teste usado para métodos tipo *batch* dado pela Eq. (2.93).

2.5.2.1 Identificação

Quando o teste de detecção for positivo, torna-se necessário identificar as medidas portadoras de erro grosseiro. O procedimento para identificação dessas medidas utilizado com o método de Givens é baseado na busca do máximo resíduo normalizado. Este também é o procedimento usado em conexão com o método da equação normal. Contudo, como acontece com o teste de detecção, é possível se tirar vantagem do caráter sequencial do método de Givens para aumentar a eficiência do procedimento de identificação.

Sabe-se que a maior dificuldade na obtenção dos resíduos normalizados é o cálculo dos fatores de normalização, que são os inversos dos desvios-padrão dos resíduos. Para obtê-los, torna-se necessário calcular os elementos diagonais da matriz de covariância dos resíduos, dada por:

$$\mathbf{W} = \mathbf{R} - \mathbf{H}\mathbf{C}_x\mathbf{H}^T \quad (2.94)$$

As matrizes \mathbf{H} e \mathbf{R} são as mesmas definidas previamente. Nota-se que é necessário o cálculo explícito da inversa $\mathbf{C}_x = (\mathbf{H}^T\mathbf{R}^{-1}\mathbf{H})^{-1}$, o que requer um considerável esforço computacional. Os problemas computacionais associados com a Eq. (2.94) são sensivelmente minorados quando o método de máximo resíduo normalizado é utilizado com as rotações de Givens.

As características das rotações de Givens permitem que:

1. O cálculo da matriz \mathbf{C}_x , e consequentemente de \mathbf{W} , seja facilitado expressando-se \mathbf{C}_x em termos das matrizes \mathbf{D} e $\bar{\mathbf{U}}$ da Eq. (2.37);

2. Haja necessidade de obter apenas os primeiros d elementos diagonais de \mathbf{W} , onde d é a ordem da medida após a qual o teste de detecção foi positivo.

Com referência ao item (1), deve ser observado que as matrizes \mathbf{D} e $\bar{\mathbf{U}}$ já estão disponíveis, uma vez que são obtidas do processamento da linha de \mathbf{H} através das rotações de Givens. Em termos destas matrizes, mostra-se [45] que o i -ésimo elemento diagonal de \mathbf{W} , denotado por w_{ii} , pode ser escrito como

$$w_{ii} = R_{ii} - \sum_{k=1}^n \left(\frac{V_{ik}}{D_{kk}} \right)^2, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2.95)$$

onde

$$\mathbf{V} = \mathbf{H}\bar{\mathbf{U}}^{-1} \quad (2.96)$$

O cálculo da matriz \mathbf{V} requer a inversa da matriz triangular unitária $\bar{\mathbf{U}}$. A j -ésima coluna de $\bar{\mathbf{U}}^{-1}$ pode ser obtida como o vetor solução de um problema de substituição inversa cuja matriz de coeficientes é $\bar{\mathbf{U}}$ e cujo lado direito é a j -ésima coluna da matriz identidade.

O item (2) acima decorre do procedimento descrito no item (1) e implica em que, se d é a ordem da última medida processada pelo método de Givens antes do teste do qui-quadrado ser positivo, então basta se examinar os resíduos normalizados das medidas $1, 2, \dots, d$. O resultado é uma redução de esforço computacional, já que a matriz \mathbf{H} na Eq. (2.96) passa a ser a submatriz do Jacobiano formada por suas d primeiras linhas e σ_{ri}^2 da Eq. (2.95) passa a ser calculado apenas para $i = 1, 2, \dots, d$. As vantagens propiciadas por este procedimento serão tanto maiores quanto mais próxima a medida espúria estiver do início da lista de medidas.

Embora a presença de um erro grosseiro possa ser detectada muito antes do processamento do último elemento do conjunto de medidas, é conveniente que a identificação seja realizada após o processamento de todas as medidas, a fim de que a redundância utilizada seja a máxima possível. Observe-se contudo que o fato de a detecção ter ocorrido antes é ainda de muita valia, pois restringe o conjunto de medidas que podem ser portadoras de erro grosseiro, conforme descrito no parágrafo anterior.

2.5.2.2 Remoção

No método da equação normal, a detecção de um erro grosseiro entre as medidas processadas pelo estimador invalida os resultados da estimação de estados, já que estas estão contaminadas pelos efeitos da(s) medida(s) espúria(s).

Quando se utiliza as rotações de Givens, é possível adotar um procedimento decorrente da ortogonalidade do método, o qual permite a remoção dos efeitos de erros sobre as matrizes $\bar{\mathbf{U}}$ e \mathbf{D} tão logo a medida portadora do erro grosseiro tenha sido identificada. Este procedimento consiste simplesmente em se reprocessar esta medida, com peso igual ao negativo do valor do peso original [46].

Um efeito imediato da remoção dos efeitos de uma medida espúria sobre as matrizes $\bar{\mathbf{U}}$ e \mathbf{D} é que a SPQR sofre imediatamente um decréscimo, do valor inicialmente afetado pela presença do erro grosseiro para o valor que existiria se a medida não houvesse sido processada.

Como resultado da remoção de um erro grosseiro, torna-se agora possível aproveitar os cálculos já executados para obtenção de estimativas para os estados, até a iteração onde se realizou a detecção, identificação e remoção da medida espúria. Além disso, esta medida pode ser eliminada do conjunto de medidas a serem processadas nas iterações subsequentes. Deve-se mencionar contudo que há o risco de não se obter convergência para o processo iterativo, já que o método de Newton sofreu a influência da presença do erro grosseiro na primeira iteração. Não obstante, verifica-se para exemplos estudados que, se a matriz Jacobiana for atualizada durante algumas iterações após a remoção inicial do erro grosseiro, os riscos de divergência são pequenos.

2.6 Conclusões

A estimação de estados em sistemas de potência é a ferramenta necessária para análise em tempo real. Neste capítulo foram apresentadas alguns métodos para a estimação de estados e análise de erros grosseiros, considerando o sistema modelado de forma convencional.

Tais ferramentas foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho de doutorado e suas aplicações serão detalhadas mais a frente nesta tese.

3 ESTIMAÇÃO DE ESTADOS NO NÍVEL DE SEÇÃO DE BARRA

3.1 Introdução

O avanço da tecnologia e sua implementação no sistema elétrico fez com que informações importantes relacionadas aos arranjos e dispositivos chaveáveis internos às subestações passassem a ser relevantes, as quais a EESP tradicional não contempla.

Conforme apresentado no Capítulo 2, a maior parte da literatura e das implementações práticas em EESP considera a modelagem barra-ramo da rede. Isso faz com que informações relevantes relacionadas ao status de chaves e disjuntores sejam desconsideradas, apenas levando em consideração o resultado obtido pelo configurador de rede.

Monticelli e Garcia [8] propuseram uma modelagem exata para representar tais dispositivos na EESP. Nesta abordagem, os fluxos de potência através dos ramos com dispositivos chaveáveis são incluídos como novas variáveis de estado, juntamente com as tensões complexas de todas as barras do sistema. Posteriormente, foi demonstrado que informações referentes aos status dos dispositivos chaveáveis podem ser incluídas no problema de EESP como restrições de igualdade [11]. Este tipo de abordagem deu origem à *Estimação de Estados no Nível de Seção de Barra*, a qual permite a representação explícita de ramos contendo dispositivos chaveáveis para estudos de EESP.

Este Capítulo tem por objetivo apresentar em detalhes estas diferentes abordagens para estimação de estados contemplando a modelagem no nível de seção de barra, visando sua aplicabilidade na proposta deste trabalho de doutorado.

3.2 Modelagem dos Ramos Chaveáveis

Antes de introduzir a formulação do problema de Estimação de estados Generalizada (EEG), é importante atentar para a modelagem da rede em nível de seção de barra. Esta modelagem tem como objetivo expandir o modelo pré-existente (barra-ramo) de forma a possibilitar a representação detalhada de determinadas subestações. Esta representação foi primeiramente apresentada em [8], sob a forma de

pseudomedidas e posteriormente expandida em [11, 38] através da introdução do conceito de restrições operacionais.

As equações (3.1) e (3.2) a seguir, apresentam as restrições operacionais impostas quando o disjuntor/chave se encontra fechado. Elas mostram que quando isto acontece, a diferença angular e a diferença de tensão das barras de origem e destino são iguais a zero.

$$\theta_{kl} = \theta_k - \theta_l = 0 \quad (3.1)$$

$$v_{kl} = v_k - v_l = 0 \quad (3.2)$$

onde k representa a barra de origem do ramo chaveado e l representa a barra de destino do ramo chaveado.

Quando o dispositivo chaveável se encontra aberto, tem-se as seguintes restrições operacionais:

$$t_{kl} = 0 \quad (3.3)$$

$$u_{kl} = 0 \quad (3.4)$$

As equações (3.3) e (3.4) mostram que os fluxos ativo e reativo através do dispositivo chaveável são nulos nestas condições.

Além das restrições operacionais apresentadas acima, outras restrições podem surgir da configuração no nível de seção de barras da rede. Estas restrições denominadas *restrições estruturais*, são consequência da estrutura da rede e não são alteradas pela abertura ou fechamento dos dispositivos chaveáveis. A incidência de nós/barras de passagem cujas injeções de potência ativa e reativa são nulas, torna-se mais frequente quando se tem este tipo de modelagem. A formulação matemática do estimador para este tipo de nó/barra de passagem pode ser dada por:

$$p_k = 0 \quad (3.5)$$

$$q_k = 0 \quad (3.6)$$

onde p_k e q_k representam as injeções de potência ativa e reativa na barra k , respectivamente.

Finalmente, as expressões de injeção de potência ativa e reativa que envolvem tanto ramos convencionais quanto ramos chaveáveis também serão afetadas pelas novas variáveis de estado. Estas injeções são calculadas através do somatório dos fluxos de potência nos ramos incidentes à barra onde a injeção é medida. Para ramos convencionais, tais fluxos continuam a ser calculadas convencionalmente, porém, para os ramos com dispositivos chaveáveis, os fluxos de potência são expressos

diretamente em função das novas variáveis de estado. Se P_k (Q_k) é a injeção de potência ativa (reativa) em um nó elétrico no qual incidem tanto ramos convencionais quanto chaveáveis, tem-se:

$$P_k = \sum_{m \in \bar{\Omega}_k} t_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) + \sum_{l \in \Gamma_k} t_{kl} \quad (3.7)$$

$$Q_k = \sum_{m \in \Omega_k} u_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) + \sum_{l \in \Gamma_k} u_{kl} \quad (3.8)$$

onde $\bar{\Omega}_k$ é o conjunto de barras conectadas à barra/seção de barra k através de ramos convencionais (linhas de transmissão e interligação) e, Γ_k é o conjunto de barras conectadas à barra/seção de barra k através de ramos chaveáveis.

3.3 Estimação de Estados Generalizada

A estimação de estados generalizada permite a aplicação da EE convencional a sistemas modelados no nível de seção de barra, onde ramos chaveáveis (ramos que contêm disjuntores/chaves) são explicitamente representados. Tal análise se tornou necessária a partir do momento em que a representação detalhada de determinadas subestações se tornou essencial para a análise de sistemas nos quais a topologia e conectividade da rede eram primordiais para o monitoramento de segurança e controle de operação em tempo real [10].

Esta análise pode ser feita através do estudo de subestações presentes em regiões críticas para o sistema. Com isso, a inclusão dos fluxos através dos dispositivos chaveáveis no problema de estimação de estados é uma forma de se obter a topologia correta da rede. O acréscimo dos fluxos nos dispositivos chaveáveis como novas variáveis de estado [8] traz como consequência o fato de que eventuais medidas de fluxo de potência através destes elementos serão expressas unicamente em termos dessas novas variáveis de estado. Consequentemente, tais medidas de fluxo de potência ativa e reativa através de um dispositivo chaveável, cujos nós terminais são k e l , podem ser representados por:

$$z_{t_{kl}} = t_{kl} + \varepsilon_{t_{kl}} \quad (3.9)$$

$$z_{u_{kl}} = u_{kl} + \varepsilon_{u_{kl}} \quad (3.10)$$

onde $\varepsilon_{t_{kl}}$ e $\varepsilon_{u_{kl}}$ representam erros aleatórios das medidas de fluxo de potência ativa e reativa do dispositivo chaveável $k-l$, respectivamente.

A interpretação dos fluxos de potência como variáveis de estado requer a expansão do vetor de variáveis de estado, que agora deve conter, além das variáveis de estado convencionais, os estados referentes aos ramos chaveáveis:

$$\mathbf{x} = [\boldsymbol{\theta}^T \quad \mathbf{V}^T \quad \mathbf{t}^T \quad \mathbf{u}^T] \quad (3.11)$$

onde \mathbf{t} e \mathbf{u} são os vetores das potências ativa e reativa que passam pelos dispositivos chaveáveis modelados.

Além disso, na EEG as informações referentes aos dispositivos chaveáveis são também adicionadas ao vetor de medidas como pseudo-medidas de ângulo e tensão para o caso de disjuntores fechados e pseudo-medidas de fluxo de potência ativa e reativa para os abertos [8, 10].

Consequentemente, a representação explícita de dispositivos chaveáveis permitiu a introdução de melhores métodos para a estimação da topologia do sistema elétrico, resultando em uma EESP mais confiável [12]. Ou seja, a inclusão da análise de seção de barra à EESP possibilitou o aprimoramento de técnicas de estimação da topologia, o que, com a modelagem dos dispositivos chaveáveis, se tornou mais fácil, uma vez que se tem disponível informações importantes com relação à situação (status) destes dispositivos dentro das subestações e, portanto um conhecimento maior a respeito da conectividade da rede elétrica.

3.4 Estimação de Estados no Nível de Seção de Barra

O conceito de EEG, conforme apresentado na seção anterior, refere-se à inclusão de dispositivos chaveáveis ao problema de EESP. Nesta seção daremos enfoque à *Estimação de Estados em Nível de Seção de Barra* (EESB).

A EESB consiste na inclusão dos status de dispositivos chaveáveis como restrições operacionais a serem adicionadas ao problema de minimização restrito, a ser resolvido via Método de Tableau Esparsos [11, 38].

Esta distinção entre EEG e EESB é importante, uma vez que a EESB faz uso dos multiplicadores de Lagrange para a identificação da topologia correta da rede elétrica. Apesar desta diferença entre as metodologias de análise de seção de barra estar presente implicitamente em [11, 38], esta nova nomenclatura é introduzida neste trabalho, como forma de enfatizar as diferenças entre o método proposto em [10] e o utilizado por [11, 38].

3.4.1 Formulação do Problema de EESB via Mínimos Quadrados Ponderados

Para a formulação do problema de EESB via MQP, considere um sistema com N barras modelado no nível de seção de barras com n_d número de dispositivos chaveáveis. Considere ainda que se tenha N_m medidas, as quais incluem medidas de fluxo de potência através de ramos com dispositivos chaveáveis e medidas de injeção de potência envolvendo ramos chaveáveis.

O vetor de estados para este sistema é formado por n variáveis (conforme descrito anteriormente pela equação (3.11)), resultando em:

$$n = 2N + 2n_d \quad (3.12)$$

onde n_d representa o número de dispositivos chaveáveis modelados.

O problema de EESP é então formulado como um problema de otimização com restrições. Isso nos permite incluir nesta formulação as restrições impostas pela modelagem de dispositivos chaveáveis. Tais restrições são representadas pelo agrupamento das equações de modelagem de ramos chaveáveis apresentado na Seção 3.2 pela sua função.

Com isso, pode-se escrever as *restrições operacionais* para dispositivos chaveáveis abertos e fechados representados pelas equações (3.1), (3.2), (3.3) e (3.4) na formulação do problema de estimação de estados como um conjunto de equações genericamente escrito da forma:

$$\mathbf{h}_o(\hat{\mathbf{x}}) = 0 \quad (3.13)$$

tal conjunto de equações é linear com relação às variáveis de estado, ou seja, $h_o(\hat{x}) = H_o\hat{x} = 0$, uma vez que representam as condições de operação (status) dos dispositivos chaveáveis, sendo tal relação composta por 0, 1 e -1 . Por uma questão de isonomia de notação, a equação (3.13) será sempre descrita da forma não-linear.

Já as restrições apresentadas pelas barras de injeção nula apresentadas pelas equações (3.5) e (3.6), adicionado às restrições das barras de referência são chamadas de *restrições estruturais*, e podem ser representadas genericamente por:

$$\mathbf{h}_s(\hat{\mathbf{x}}) = 0 \quad (3.14)$$

Considerando as restrições operacionais e estruturais e o método MQP apresentado previamente, o problema de EESB, levando em con-

sideração informações *a priori*, pode ser formulado como:

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimizar} && \frac{1}{2} \mathbf{r}_m^T \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{r}_m + \frac{1}{2} \mathbf{p}^T \boldsymbol{\Sigma}_0^{-1} \mathbf{p} \\
 & \text{sujeito a} && \mathbf{r}_m = \mathbf{z}_m - \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}}) \\
 & && \mathbf{h}_s(\hat{\mathbf{x}}) = 0 \\
 & && \mathbf{h}_o(\hat{\mathbf{x}}) = 0
 \end{aligned} \tag{3.15}$$

onde \mathbf{r}_m representa o vetor de resíduos das medidas, \mathbf{R}_m é a matriz de covariância dos erros de medição, suposta diagonal, e $\hat{\mathbf{x}}$ é o novo vetor de estimativa para os estados.

3.4.2 Solução da EESB via Método de Tableau Esperso

Para solucionar o problema apresentado na Subseção 3.4.1, utiliza-se a mesma metodologia utilizada para a EE convencional mostrada no início do Capítulo 2. Sendo assim, atribuem-se multiplicadores de Lagrange às restrições da equação (3.15), resultando na nova função Lagrangeana para o problema de EE, agora em nível de seção de barra, que é dada por:

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & \frac{1}{2} \mathbf{r}_m^T \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{r}_m + \frac{1}{2} \mathbf{p}^T \boldsymbol{\Sigma}_0^{-1} \mathbf{p} + \boldsymbol{\lambda}_m^T [\mathbf{z}_m - \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}}) - \mathbf{r}_m] \\
 & + \boldsymbol{\lambda}_s^T [-\mathbf{h}_s(\hat{\mathbf{x}})] + \boldsymbol{\lambda}_o^T [-\mathbf{h}_o(\hat{\mathbf{x}})]
 \end{aligned} \tag{3.16}$$

Aplicando-se as condições de Karush-Kuhn-Tucker (KKT) para se obter as condições necessárias para uma solução ótima, obtém-se o seguinte sistema de equações não-lineares:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \mathcal{L}(\hat{\mathbf{x}}, \mathbf{r}_m, \boldsymbol{\lambda})}{\partial \mathbf{r}} &= \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{r}_m - \boldsymbol{\lambda}_m = 0 \\
 \frac{\partial \mathcal{L}(\hat{\mathbf{x}}, \mathbf{r}_m, \boldsymbol{\lambda})}{\partial \hat{\mathbf{x}}} &= \boldsymbol{\Sigma}_0^{-1} \mathbf{p} - \mathbf{H}_m^T(\hat{\mathbf{x}}) \boldsymbol{\lambda}_m - \mathbf{H}_s^T(\hat{\mathbf{x}}) \boldsymbol{\lambda}_s - \mathbf{H}_o^T(\hat{\mathbf{x}}) \boldsymbol{\lambda}_o = 0 \\
 \frac{\partial \mathcal{L}(\hat{\mathbf{x}}, \mathbf{r}_m, \boldsymbol{\lambda})}{\partial \boldsymbol{\lambda}_m} &= \mathbf{z}_m - \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}}) - \mathbf{r}_m = 0 \\
 \frac{\partial \mathcal{L}(\hat{\mathbf{x}}, \mathbf{r}_m, \boldsymbol{\lambda})}{\partial \boldsymbol{\lambda}_s} &= -\mathbf{h}_s(\hat{\mathbf{x}}) = 0 \\
 \frac{\partial \mathcal{L}(\hat{\mathbf{x}}, \mathbf{r}_m, \boldsymbol{\lambda})}{\partial \boldsymbol{\lambda}_o} &= -\mathbf{h}_o(\hat{\mathbf{x}}) = 0
 \end{aligned} \tag{3.17}$$

onde:

$$\mathbf{H}_m(\hat{\mathbf{x}}) = \frac{\partial \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}})}{\partial(\hat{\mathbf{x}})}, \quad \mathbf{H}_s(\hat{\mathbf{x}}) = \frac{\partial \mathbf{h}_s(\hat{\mathbf{x}})}{\partial(\hat{\mathbf{x}})} \quad \text{e} \quad \mathbf{H}_o(\hat{\mathbf{x}}) = \frac{\partial \mathbf{h}_o(\hat{\mathbf{x}})}{\partial(\hat{\mathbf{x}})} \quad (3.18)$$

Da mesma forma que para a EE convencional, da primeira equação do conjunto (3.17), tem-se:

$$\mathbf{r}_m = \mathbf{R}_m \boldsymbol{\lambda}_m \quad (3.19)$$

Trabalhando com o sistema linearizado em relação a um dado vetor de estados $\hat{\mathbf{x}}^k$ e eliminando-se a variável \mathbf{r}_m da equação (3.19), o conjunto (3.17) pode ser re-escrito da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_m^T(\hat{\mathbf{x}}^k) \boldsymbol{\lambda}_m + \mathbf{H}_s^T(\hat{\mathbf{x}}^k) \boldsymbol{\lambda}_s + \mathbf{H}_o^T(\hat{\mathbf{x}}^k) \boldsymbol{\lambda}_o - \boldsymbol{\Sigma}_0^{-1} \mathbf{p} &= 0 \\ \mathbf{z}_m - \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}}^k) - \mathbf{H}_m(\hat{\mathbf{x}}^k) \Delta \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{R}_m \boldsymbol{\lambda}_m &= 0 \\ \mathbf{h}_s(\hat{\mathbf{x}}^k) + \mathbf{H}_s(\hat{\mathbf{x}}^k) \Delta \hat{\mathbf{x}} &= 0 \\ \mathbf{h}_o(\hat{\mathbf{x}}^k) + \mathbf{H}_o(\hat{\mathbf{x}}^k) \Delta \hat{\mathbf{x}} &= 0 \end{aligned} \quad (3.20)$$

O conjunto acima pode ser expresso na forma matricial da seguinte forma:

$$\begin{pmatrix} \boldsymbol{\Sigma}_0^{-1} & \mathbf{H}^T \\ \mathbf{H} & \mathbf{R} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \hat{\mathbf{x}} \\ \boldsymbol{\lambda} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{\Sigma}_0^{-1} \mathbf{p}^k \\ \mathbf{r}^k \end{pmatrix} \quad (3.21)$$

onde:

$$\mathbf{H} \triangleq \begin{pmatrix} \mathbf{H}_m(\hat{\mathbf{x}}^k) \\ \mathbf{H}_s(\hat{\mathbf{x}}^k) \\ \mathbf{H}_o(\hat{\mathbf{x}}^k) \end{pmatrix}; \quad \mathbf{R} = \begin{pmatrix} \mathbf{R}_m & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{pmatrix};$$

$$\boldsymbol{\lambda} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{\lambda}_m \\ \boldsymbol{\lambda}_s \\ \boldsymbol{\lambda}_o \end{pmatrix} \quad \mathbf{r}^k = \begin{pmatrix} \mathbf{z}_m - \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}}) \\ -\mathbf{h}_s(\hat{\mathbf{x}}) \\ -\mathbf{h}_o(\hat{\mathbf{x}}) \end{pmatrix}$$

Em conclusão, o problema (3.15) de estimação pode ser resolvido usando o algoritmo de Tableau esparsa baseado na equação (3.21).

3.5 Análise de Erros Utilizando Informação A Priori

Nesta seção serão discutidos alguns aspectos práticos da utilização de informações *a priori* para a EESB e sua contribuição para a análise de erros grosseiros.

É importante ressaltar que até este ponto da EESB, a análise de erros é feita em duas etapas distintas: uma resultado da presença de erros grosseiros em medidas analógicas, cujo processamento pode ser feito de forma análoga ao apresentado no Capítulo 2 e; outra sendo resultado da presença de erros na modelagem dos dispositivos chaveáveis, detectada pela inconsistência entre os estados estimados e a topologia dada pelo configurador de rede, o que indica a presença de erros de topologia, cuja identificação e correção é feita através de um estimador de topologia, sendo este um processo separado do estimador de estados.

3.5.1 Matriz de Covariância dos Multiplicadores de Lagrange

Erros nos estados estimados podem surgir por causa de erros em medidas analógicas ou ainda erros na modelagem das restrições estruturais e operacionais. O vetor de erros dos estados estimados, $\tilde{\mathbf{x}}$, é definido por [11]:

$$\tilde{\mathbf{x}} = \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x} \quad (3.22)$$

onde \mathbf{x} é o vetor de estados verdadeiro.

A expansão em primeira ordem da serie de Taylor do vetor de medidas/restrições da função $\mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}})$ em \mathbf{x} leva a:

$$\mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}) = \begin{pmatrix} \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}}) \\ \mathbf{h}_s(\hat{\mathbf{x}}) \\ \mathbf{h}_o(\hat{\mathbf{x}}) \end{pmatrix} \approx \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \mathbf{H}\tilde{\mathbf{x}} \quad (3.23)$$

A aproximação linear correspondente para o vetor de resíduos de medição/restrrição \mathbf{r} é:

$$\mathbf{r} = \mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}) = \mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x}) - \mathbf{H}\tilde{\mathbf{x}} = \boldsymbol{\epsilon} - \mathbf{H}\tilde{\mathbf{x}} \quad (3.24)$$

onde $\boldsymbol{\epsilon}$ é o vetor de erros de medição/restrrição (estendido). Caso não haja nenhum erro de modelagem estrutural ou operacional, então:

$$\boldsymbol{\epsilon} = \mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x}) = (\boldsymbol{\epsilon}_m^T \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{0})^T \quad (3.25)$$

onde

$$\boldsymbol{\epsilon}_m = \mathbf{z}_m - \mathbf{h}_m(\mathbf{x}) \quad (3.26)$$

As condições de otimalidade necessárias associadas com a equação (3.15) estabelecem que as relações a seguir sejam satisfeitas na solu-

ção da estimação de estados [38]:

$$\mathbf{R}\boldsymbol{\lambda} - \mathbf{r} = 0 \quad (3.27)$$

$$\boldsymbol{\Sigma}_0^{-1}(\hat{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}}) - \mathbf{H}^T \boldsymbol{\lambda} = 0 \quad (3.28)$$

$$\mathbf{r} - \mathbf{z} + \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}) = 0 \quad (3.29)$$

Quando as expressões (3.22) e (3.24) são substituídas em (3.27) e (3.28), obtém-se:

$$\begin{pmatrix} -\boldsymbol{\Sigma}_0^{-1} & \mathbf{H}^T \\ \mathbf{H} & \mathbf{R} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{x}} \\ \boldsymbol{\lambda} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{\Sigma}_0^{-1}(\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}) \\ \boldsymbol{\epsilon} \end{pmatrix} \quad (3.30)$$

Com isso, o vetor de multiplicadores de Lagrange e o vetor de erros são relacionados ao vetor de erros de medição/restrição $\boldsymbol{\epsilon}$ da seguinte forma:

$$\begin{pmatrix} \hat{\mathbf{x}} \\ \boldsymbol{\lambda} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\boldsymbol{\Sigma} & \mathbf{C}^T \\ \mathbf{C} & \mathbf{V} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \boldsymbol{\Sigma}_0^{-1}(\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}) \\ \boldsymbol{\epsilon} \end{pmatrix} \quad (3.31)$$

onde

$$\begin{pmatrix} -\boldsymbol{\Sigma} & \mathbf{C}^T \\ \mathbf{C} & \mathbf{V} \end{pmatrix} \triangleq \begin{pmatrix} -\boldsymbol{\Sigma}_0^{-1} & \mathbf{H}^T \\ \mathbf{H} & \mathbf{R} \end{pmatrix}^{-1} \quad (3.32)$$

O que resulta nos multiplicadores de Lagrange sendo dados por:

$$\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{V}\boldsymbol{\epsilon} + \mathbf{C}\boldsymbol{\Sigma}_0^{-1}(\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}) \quad (3.33)$$

e a matriz de covariância correspondente é dada por:

$$\begin{aligned} Cov(\boldsymbol{\lambda}) &= E\{\boldsymbol{\lambda}\boldsymbol{\lambda}^T\} \\ &= \mathbf{V}E\{\boldsymbol{\epsilon}\boldsymbol{\epsilon}^T\}\mathbf{V}^T \\ &\quad + \mathbf{C}\boldsymbol{\Sigma}_0^{-1}E\{(\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}})(\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}})^T\}\boldsymbol{\Sigma}_0^{-1}\mathbf{C}^T \\ &= \mathbf{V}\mathbf{R}\mathbf{V}^T + \mathbf{C}\boldsymbol{\Sigma}_0^{-1}\mathbf{C}^T \end{aligned} \quad (3.34)$$

As relações a seguir mostram as partições da matriz de coeficientes apresentada em (3.31) com as da inversa dada em (3.32):

$$\mathbf{V}\mathbf{H} - \mathbf{C}\boldsymbol{\Sigma}_0^{-1} = 0 \quad (3.35)$$

$$\mathbf{H}\mathbf{C}^T + \mathbf{R}\mathbf{V}^T = \mathbf{I} \quad (3.36)$$

Ao multiplicar a equação 3.35 por \mathbf{C}^T , obtém-se:

$$\mathbf{C}\boldsymbol{\Sigma}_0^{-1}\mathbf{C}^T = \mathbf{V}\mathbf{H}\mathbf{C}^T \quad (3.37)$$

Substituindo \mathbf{HC}^T da equação (3.36) em (3.37), tem-se:

$$\mathbf{C}\Sigma_0^{-1}\mathbf{C}^T = \mathbf{V} - \mathbf{V}\mathbf{R}\mathbf{V}^T \quad (3.38)$$

ou ainda:

$$\mathbf{V}\mathbf{R}\mathbf{V}^T = \mathbf{V} - \mathbf{C}\Sigma_0^{-1}\mathbf{C}^T \quad (3.39)$$

o que é a versão generalizada da identidade $\mathbf{V}\mathbf{R}\mathbf{V}^T = \mathbf{V}$ usada em [11], onde a informação de estado *a priori* não é levada em consideração. Por fim, a matriz de covariância do vetor dos multiplicadores de Lagrange pode ser determinadas equações (3.34) e (3.38), resultando em:

$$\text{Cov}(\boldsymbol{\lambda}) = \mathbf{V} \quad (3.40)$$

3.5.2 Informação *A Priori* e Projeção de $\boldsymbol{\lambda}$ no Domínio $D(\mathbf{V}_S)$

Nesta subseção serão analisados os efeitos da informação *a priori* na projeção de $\mathbf{R}^{1/2}\boldsymbol{\lambda}$ no domínio (\mathbf{V}_S) . Assumindo que os valores “reais” das medidas são perfeitos, da equação (3.33) tem-se que:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}^{1/2}\boldsymbol{\lambda} &= \mathbf{R}^{1/2}\mathbf{V}_S\boldsymbol{\epsilon}_S + \mathbf{R}^{1/2}\mathbf{C}\Sigma_0^{-1}(\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}) \\ &= \mathbf{R}^{1/2}\mathbf{V}_S\boldsymbol{\epsilon}_S + \mathbf{R}^{1/2}(\mathbf{V}\mathbf{H})(\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}) \end{aligned} \quad (3.41)$$

onde foi aplicada também a identidade (3.35). Além disso, uma vez particionada as colunas de \mathbf{V} nos subespaços S e T , correspondentes às colunas linearmente independentes de \mathbf{V} com informações suspeitas e as colunas de \mathbf{V} com informações não tendenciosas, as linhas de \mathbf{H} também podem ser particionadas da mesma forma. Sendo assim:

$$\mathbf{V}\mathbf{H} = [\mathbf{V}_S \quad \mathbf{V}_T] \begin{bmatrix} \mathbf{H}_S \\ \mathbf{H}_T \end{bmatrix} = \mathbf{V}_S\mathbf{H}_S + \mathbf{V}_T\mathbf{H}_T$$

o que leva a equação (3.41) ser reescrita como a seguir:

$$\mathbf{R}^{1/2}\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{R}^{1/2}\mathbf{V}_S\boldsymbol{\epsilon}_S + \mathbf{R}^{1/2}\mathbf{V}_S\mathbf{H}_S(\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}) + \mathbf{R}^{1/2}\mathbf{V}_T\mathbf{H}_T(\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}) \quad (3.42)$$

O primeiro termo do lado direito da equação (3.42) recaí no domínio $D(\mathbf{R}^{1/2}\mathbf{V}_S)$. Os dois últimos termos representam a contribuição da informação *a priori* para $\mathbf{R}^{1/2}\boldsymbol{\lambda}$. Se definirmos:

$$\bar{\mathbf{z}}_S = \mathbf{H}_S(\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}) \quad \text{e} \quad \bar{\mathbf{z}}_T = \mathbf{H}_T(\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}})$$

tem-se que a contribuição da informação *a priori* é então decomposta em dois termos: um que recai sob o domínio espacial de $\mathbf{R}^{1/2}\mathbf{V}_S$ e é dado por $\mathbf{R}^{1/2}\mathbf{V}_S\bar{\mathbf{z}}_S$; e outro que é igual a $\mathbf{R}^{1/2}\mathbf{V}_T\bar{\mathbf{z}}_T$ e, portanto, pertence ao domínio espacial de $\mathbf{R}^{1/2}\mathbf{V}_T$. Como resultado, a projeção de $\mathbf{R}^{1/2}\boldsymbol{\lambda}$ no domínio $D(\mathbf{R}^{1/2}\mathbf{V}_S)$ sob os efeitos da informação *a priori* é dada por:

$$\begin{aligned}\bar{p} &= Proj\{\mathbf{R}^{1/2}\mathbf{V}_S\boldsymbol{\epsilon}_S\} + Proj\{\mathbf{R}^{1/2}\mathbf{V}_S\bar{\mathbf{z}}_S\} \\ &\quad + Proj\{\mathbf{R}^{1/2}\mathbf{V}_T\bar{\mathbf{z}}_T\} \\ &= \mathbf{R}^{1/2}\mathbf{V}_S\boldsymbol{\epsilon}_S + \mathbf{R}^{1/2}\mathbf{V}_S\bar{\mathbf{z}}_S + Proj\{\mathbf{R}^{1/2}\mathbf{V}_T\bar{\mathbf{z}}_T\} \quad (3.43)\end{aligned}$$

Portanto, o componente dependente de $\bar{\mathbf{z}}_S$ reforça a magnitude da projeção, enquanto que o componente dependente de $\bar{\mathbf{z}}_T$ não recai em $D(\mathbf{R}^{1/2}\mathbf{V}_S)$. Como consequência, este último age aumentando o ângulo θ entre \bar{p} e $\mathbf{R}^{1/2}\boldsymbol{\lambda}$, tornando sua magnitude significativa em relação às componentes restantes. Contudo, uma consequência direta de um erro de topologia se dá com o aumento de $\boldsymbol{\lambda}$ (frequentemente com algumas ordens de grandeza), o que leva o termo dependente de $\boldsymbol{\epsilon}_S$ ser o maior. Por esta razão, as contribuições devidas às informações *a priori* produzirão apenas pequenos desvios em θ .

3.6 Conclusões

A EESP é a ferramenta fundamental para a modelagem em tempo real de sistemas elétricos. A inclusão da modelagem no nível de seção de barra na EE possibilitou o avanço de métodos de EESP, uma vez que regiões anômalas (suspeitas de conterem erros grosseiros) do sistema elétrico podem agora ser expandidas e incluídas neste processo.

Neste capítulo foram apresentados os métodos de EESP com a modelagem do sistema em nível de seção de barra, o que resulta na EESB, ferramenta esta que servirá de base para o desenvolvimento do tema proposto por esta monografia.

Conforme apresentado neste capítulo, os processos de estimação de estados e de topologia são realizados convencionalmente de forma separada, sendo que o estimador de estados utiliza o resultado do configurador de rede para a estimação, fazendo uso de um estimador de topologia apenas se ocorrer inconsistências entre os estados estimados e a topologia tida como certa. No próximo capítulo será apresentada uma nova abordagem para a estimação de estados incluindo a modelagem de subestações, cujo objetivo é unificar os processo de estimação

de estados e de topologia em um único algoritmo.

4 COESTIMAÇÃO DE ESTADOS E TOPOLOGIA

4.1 Introdução

Neste capítulo será apresentada a formulação do problema da *Coestimação de Estados e Topologia* (CET). A proposta para se estimar diretamente a topologia através da formulação do problema de EESB como um problema multiobjetivo foi feita primeiramente em [31] e desenvolvida em [16–18]. Nestas últimas referências são apresentados o algoritmo, implementação e resultados obtidos com o método utilizando a modelagem linear da rede, comprovando assim a viabilidade de sua aplicação a sistemas elétricos de potência.

A metodologia descrita em [18] e expandida para a modelagem não linear em [19], apresenta a formulação do problema de CET como um problema multiobjetivo a ser resolvido por um método primal-dual de pontos interiores (MPDPI), desenvolvido especificamente para este problema, além de fazer uso da propriedade interpoladora altamente seletiva do termo correspondente aos mínimos valores absolutos ponderados (MVAP) para detectar, identificar e rejeitar possíveis erros de topologia. Tal formulação servirá como base para o desenvolvimento de uma das etapas deste trabalho de doutorado.

4.2 Comparação entre as Estratégias MQP e MVAP

A escolha entre os métodos a serem utilizados para estimação de estados e estimação de topologia está diretamente relacionada às características presentes em cada método.

Dado um conjunto de pontos ao qual se deseja ajustar uma reta por regressão linear, o método de MQP posiciona esta reta de modo a reduzir a soma dos quadrados dos resíduos, podendo não passar por nenhum dos pontos considerados, como pode ser visto no gráfico (a) da Figura 2, linha tracejada. Esta característica do MQP é importante quando se tem medidas analógicas, uma vez que, para determinar o melhor ajuste no sentido dos MQP, leva-se em consideração a influência de todos os dados disponíveis. Conseqüentemente, este método é melhor aplicado para ajuste a dados analógicos.

Já o método de MVAP tem como principal característica a alta seletividade ao efetuar a interpolação de dados. Dado o mesmo conjunto de pontos que no caso anterior, o uso dos MVAP resultará na

escolha de n medidas, dentre as m disponíveis, que terão portanto resíduo nulo. São conseqüentemente excluídas do processo de estimação informações inconsistentes com as medidas disponíveis, tais como *status* incorretos de dispositivos chaveáveis. Este comportamento pode ser visto através do gráfico (b) na Figura 2. A seletividade deste método é melhor aplicada a medidas com característica digital, ou seja, dados que podem ser considerados “0” ou “1”, como por exemplo *status* “aberto” ou “fechado”.

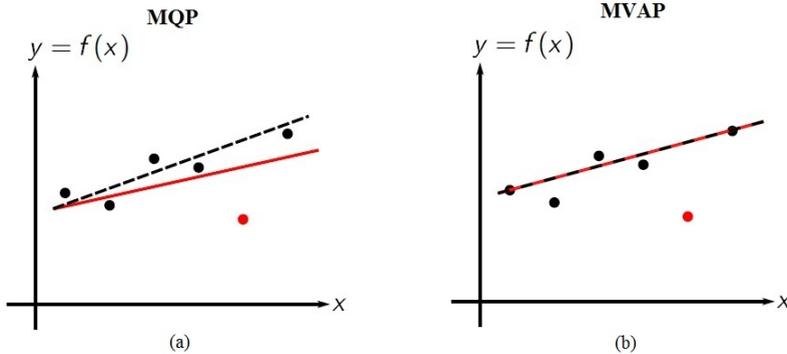


Figura 2 – Características dos métodos de MQP e MVAP, respectivamente

Os gráficos na Figura 2 comparam os desempenhos dos métodos de MQP e MVAP. Quando não há erros grosseiros nas medidas, os métodos em questão apresentam o comportamento representado pelas retas tracejadas. Ao se inserir uma medida portadora de erro grosseiro deslocada do conjunto de pontos (representada pelos pontos em vermelho nos gráficos), percebe-se que o método de MQP é influenciado por ele, deslocando a solução original, para que esta possa absorver essa nova informação, reduzindo o erro quadrático entre os pontos e a solução encontrada, resultando na reta em vermelho do gráfico (a) da Figura 2.

Por outro lado, na presença do mesmo erro grosseiro, o método de MVAP produzirá o mesmo resultado que para o caso sem este tipo de medida, obtendo então uma superposição das soluções para o caso sem e com erro grosseiro. Isto se deve ao fato de que o método de MVAP possui propriedades de interpolação altamente seletivas para rejeição de dados assumidos incorretamente. Por esta razão, o método de MVAP mostra-se mais atraente para a estimação topológica da rede elétrica,

pois os dados associados à topologia são binários (*zeros* ou *uns*).

Estes conceitos serão explorados na próxima seção, visando a concepção de um método de estimação conjunta de estados e topologia.

4.3 Coestimação de Estados e Topologia

O método proposto em [18] e [19] considera a modelagem em nível de seção de barra. Tem-se como premissa a inviabilidade de se modelar totalmente um grande sistema em nível de seção de barra e, por isso, considera-se que a estimação de estados é realizada em duas etapas. Em um primeiro momento, executa-se a estimação de estados convencional, bem como a detecção e localização de erros grosseiros nas medidas através de técnicas convencionais. Caso a topologia de rede seja errônea, o estimador de estados deverá ser capaz de identificar a região (ou regiões) do sistema suspeita(s) de conter erros de topologia [52]. Em um segundo momento, esta região será modelada no nível de seção de barra e servirá de entrada para o *Método de Coestimação*, juntamente com o restante do sistema modelado de forma convencional (barra-ramo).

Como a metodologia utilizada neste trabalho de doutorado é baseada na modelagem não linear da rede, este capítulo apresentará a proposta descrita em [19], uma vez que a abordagem realizada em [16–18] é feita através do modelo linear (“DC”). Contudo, a abordagem na forma linear foi uma importante etapa do desenvolvimento da coestimação e baseia-se no fato de que há uma excelente correlação entre o status de um ramo chaveável e a existência de fluxo em MW através deste. Os valores para os fluxos em MW obtidos pelo modelo “DC”, apesar de aproximados, não degradam esta relação [12].

4.3.1 Diferença entre tratar a matriz h_o como restrição de igualdade e via termo da função objetivo

Em termos gerais, a proposta de validação de topologia descrita neste trabalho baseia-se no fato de que as medidas analógicas contém informações intrínsecas a respeito da topologia da rede [12]. Considerando um conjunto presumido de dispositivos chaveáveis, um procedimento de estimação especializado avalia o quão bem a topologia correspondente se encaixa às medidas disponíveis. No caso da topologia não ser compatível com as medidas, o conjunto estendido de estados

estimados (o que inclui os fluxos de potência através dos ramos chaveáveis) é então usado a cada iteração do algoritmo de estimação para determinar o status correto dos disjuntores.

As condições operacionais (3.13), que refletem diretamente os status presumidos dos dispositivos chaveáveis, são responsáveis pelo processo de identificação da topologia correta, podendo ser tratadas no algoritmo de estimação de estados por qualquer uma das seguintes abordagens:

- a) **Restrição de igualdade:** neste caso, a topologia presumida é imposta como uma condição obrigatória do problema, que deve ser satisfeita na solução final. Como consequência, caso a topologia esteja incorreta, haverá inconsistências com o conjunto de medidas, que se manifestará com valores dos multiplicadores de Lagrange elevados. A abordagem de restrição de igualdade é adotada em [11] e [37], na qual os multiplicadores de Lagrange normalizados são usados para a identificação de erros de topologia. Sendo assim, a principal característica desta classe de métodos é impor uma topologia presumida, averiguar se ela é suportada pelas medidas e, caso isto não seja verdade, iniciar o processo de identificação de erros de topologia baseado nos multiplicadores de Lagrange normalizados;

- b) **Termo adicional da função objetivo:** a própria função das condições operacionais (3.13) é adicionada à função objetivo do problema de estimação. Como consequência, o problema multi-objetivo resultante tenta minimizar tanto a soma ponderada do quadrado dos resíduos quanto os desvios com respeito a topologia presumida. Com o balanceamento adequado das duas parcelas da função objetivo, um equilíbrio é atingido, através do qual a topologia presumida influencia a solução de uma forma muito mais branda do que na abordagem precedente. Sendo assim, há liberdade para que as variáveis de estado - em particular os fluxos nos ramos chaveáveis - se ajustem melhor às medidas. Caso os valores estimados conflitem com a topologia presumida (e levando em consideração que as medidas disponíveis são confiáveis), a topologia presumida pode ser revisada adequadamente. Isto prefigura um esquema iterativo sob a forma de um laço externo no algoritmo de estimação, no qual a topologia é alterada enquanto houver conflitos entre as medidas e a topologia atual. Portanto, esta abordagem pode ser vista como um esquema de estimação simultânea de estados & topologia, uma vez que ela fornece resul-

tados para ambos atributos para as condições de operação atual.

Embora, em um primeiro momento a abordagem b) pareça ser mais complexa que a a), ela inerentemente possui a propriedade de ser virtualmente imune a erros de topologia. Como consequência, não há a necessidade de se fazer uso de procedimentos elaborados para identificação de erros de topologia, o que é preciso para a alternativa a) toda vez que a topologia não for suportada pelo conjunto das medidas analógicas.

Nesta tese, é focada a abordagem b) descrita acima. Na próxima subseção será descrita a formulação matemática detalhada necessária para a elaboração do algoritmo de estimação simultânea de estados & topologia. É importante ressaltar que a topologia inicial presumida pode ser considerada àquela resultante do Configurator de Rede, como é de se esperar. Embora isto seja o desejado, resultados obtidos para diversas condições iniciais de topologia demonstram a robustez da proposta de estimação simultânea de estados e topologia com relação à inicialização dos status dos dispositivos chaveáveis.

4.3.2 Formulação do problema

A modelagem no nível de seção de barra utilizada em [19] leva em conta as restrições estruturais $h_s(\cdot)$, compostas pelas injeções nulas nas barras e a definição da referência angular, ambas incluídas na formulação do problema como restrições de igualdade e, as restrições operacionais $h_o(\cdot)$, que modelam o status dos dispositivos chaveáveis conforme apresentado na Seção 3.2 e Subseção 3.4.1.

É importante ressaltar que, nesta formulação, apenas os ramos chaveáveis da parte da rede considerada suspeita serão modelados em h_o onde, para cada dispositivo chaveável, serão consideradas as restrições operacionais correspondentes ao status presumido do dispositivo chaveável. Os fluxos através dos dispositivos chaveáveis são incluídos no problema como variáveis de estado [8], conforme apresentado na Seção 3.3.

Tendo em vista que a CET é um problema de EESB, e que a estimação de topologia é feita de forma direta através da inclusão de um termo na função-objetivo $J(\cdot)$, representando as restrições operacionais e modelado pelo critério dos MVAP, o problema de otimização multiobjetivo proposto combina a aplicação do critério dos MQP para os resíduos de medição e do critério MVAP para as restrições operacionais,

sendo representado da seguinte forma:

$$J(\mathbf{r}_m, \hat{\mathbf{x}}) = J_{mqp}(\mathbf{r}_m) + J_{mvap}(\hat{\mathbf{x}}) \quad (4.1)$$

A função-objetivo do problema apresentado pela equação (4.1) é balanceada para que ambos os termos contribuam com peso semelhante para o critério de otimização [19]. O primeiro termo da função objetivo, responsável pelo processamento das medidas analógicas, é ponderado pelo inverso da covariância dos erros de medição, R_m^{-1} , conforme apresentado no Capítulo 2. Para que a segunda parcela, que corresponde ao processamento da topologia da rede, seja ponderada de modo equivalente ao primeiro termo, a equação (4.1) é escrita da seguinte forma [19]:

$$J(\mathbf{r}_m, \hat{\mathbf{x}}) = \frac{1}{2} \mathbf{r}_m^T \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{r}_m + w_o \sum_{i=1}^{n_o} |h_{o_i}(\hat{x})| \quad (4.2)$$

onde $\mathbf{r}_m = \mathbf{z}_m - \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}})$ é o vetor dos resíduos de medição, R_m é a matriz diagonal de covariância dos erros de medição, ε_m , $\mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}})$ é o vetor $N_m \times 1$ das equações não lineares que relacionam as medidas aos estados e, w_o é o peso atribuído às restrições operacionais, cujo propósito principal é promover o balanço apropriado entre as duas parcelas da função objetivo. Levando em conta as restrições apropriadas, o problema de Coestimação de Estados e Topologia pode ser descrito como mostrado a seguir:

$$\begin{aligned} \min \quad & \frac{1}{2} \mathbf{r}_m^T \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{r}_m + w_o \sum_{i=1}^{n_o} |h_{o_i}(\hat{x})| \\ \text{sujeito a} \quad & \\ & \mathbf{r}_m = \mathbf{z}_m - \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}}) \\ & \mathbf{h}_s(\hat{\mathbf{x}}) = 0 \end{aligned} \quad (4.3)$$

4.3.3 Considerações

Tendo em vista a formulação apresentada para o problema de CET, algumas considerações devem ser feitas a respeito da sua implementação real. Elas são: o processo de balanceamento para as duas parcelas da função multi-objetivo; o caráter não-analítico do critério do MVAP; ganhos obtidos ao se incluir informações *a priori* e; a insensibilidade da metodologia proposta em relação a pontos de alavancamento.

4.3.3.1 Determinaco do fator de peso

A estratgia apresentada pela Eq. (4.2) para lidar com o problema multi-crterio de estados e topologia pertence a uma classe de conhecida como mtodo de escalonamento em crculos de otimizao multi-objetivo [53]. Eles consistem simplesmente em combinar diversas funoes em um nico crterio escalar. O uso mais comum entre eles  mtodo da *soma ponderada*, no qual um conjunto de pesos  utilizado para formar uma combinao linear de funoes.

De modo geral, os pesos podem ser usados para modelar preferncias para um objetivo particular [53]. Entretanto, neste trabalho os pesos w_o na parcela MVAP da funo objetivo so empregados de forma a obter o balano adequado entre os dois crterios. Para este propsito, esses pesos devem levar em considerao o fator de ponderao do termo MQP. Como consequncia, podemos definir:

$$w_o = \frac{k_w}{\bar{R}_{m,ii}} \quad (4.4)$$

onde k_w  um nmero pequeno, real e positivo e \bar{R}_m  o comumente conhecido valor da varincia das medidas. Inmeras simulaoes realizadas em diferentes sistemas-teste indicam a possibilidade de se utilizar valores de k_w na faixa $[0, 001; 1]$, porm valores elevados tendem de certa forma a prejudicar a convergncia da soluo dos Pontos Interiores do problema de otimizao. Neste trabalho foi empregado $k_w = 0.01$.

4.3.3.2 Tratamento de valores absolutos no processo de otimizao

O fato da funo do valor absoluto presente na segunda parcela da Eq. (4.2) ser no diferencivel em $h_{o_i}(\hat{x}) = 0$ precisa ser contornado com cautela no processo de soluo da otimizao. Neste trabalho, adotamos o procedimento apresentado em [40] e substitumos $\boldsymbol{\eta} - \boldsymbol{\rho}$ no lugar das restrioes operacionais $\mathbf{h}_o(\hat{\mathbf{x}})$, onde as chamadas *variveis elsticas* $\boldsymbol{\eta}$ e $\boldsymbol{\rho}$ representam as partes positiva e negativa de $\mathbf{h}_o(\hat{\mathbf{x}})$, respectivamente. Isto  facilitado pelo fato de que as restrioes operacionais so funoes lineares das variveis de estado, como indicado pelas Eqs. (3.2) e (3.4), uma vez que estas relacionam as condioes de operao do disjuntor (aberto ou fechado).

Na prtica, η_i e ρ_i correspondentes de h_{o_i} no so simultanea-

mente diferentes de zeros, o que resulta em $|h_{o_i}| = \eta_i + \rho_i$. Na busca da solução, a não negatividade de η e ρ , é assegurada através do uso de funções de barreira logarítmicas, reforçado pelo parâmetro de barreira μ , como detalhado na Subseção 4.3.4.

4.3.3.3 Informação *a priori* para prevenir falta de observabilidade

Atribuir informação *a priori* para as tensões nodais é um modo eficiente de prevenir a perda de observabilidade que pode ocorrer quando se modela a rede no nível de seção de barra. Por exemplo, seções de barra das subestações podem se tornar nós isolados como consequência das mudanças de status em ramos chaveáveis durante o processo de solução. Nestes casos, valores *a priori* das tensões nas barras previnem que o algoritmo venha a parar por falta de condições de observabilidade. Na falta de informações mais precisas, pode-se assumir $\bar{x}_i = 1\angle 0$ para as tensões de todas as seções de barra, desde que as variâncias *a priori* reflitam o correspondente nível de incerteza a respeito destes valores. A matriz de covariância *a priori*, Σ_0 , é usualmente assumida diagonal, cujo elemento (i, i) é relativamente a maior variância atribuída para o i -ésimo valor de estado *a priori* [37, 52].

4.3.3.4 Insensibilidade a pontos de alavancamento

É conhecido há um certo tempo que, geralmente, mínimos valores absolutos estão propensos a ocorrência de pontos de alavancamento [54]. Tais pontos podem degradar severamente os resultados da estimação na presença de erros grosseiros. Eles tendem a ocorrer quando as magnitudes das entradas das linhas da matriz Jacobiana são muito diferentes umas das outras. Entretanto, no caso proposto isto não ocorre, uma vez que as entradas da matriz \mathbf{H}_o podem ser iguais apenas a 0, 1 e -1 , como se pode concluir das Eqs. (3.2) e (3.4). Como consequência, a CET é insensível a pontos de alavancamento, conforme apresentado na Seção 4.2.

4.3.4 Formulação revisada para o problema de CET

De forma a levar em conta as considerações apresentadas na subseção anterior, o problema de otimização (4.3) é reformulado como apre-

sentado a seguir:

$$\begin{aligned}
 \min \quad & \frac{1}{2} \mathbf{r}_m^T \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{r}_m + \mathbf{w}_o^T (\boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{\rho}) \\
 & + \frac{1}{2} (\hat{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}})^T \boldsymbol{\Sigma}_0^{-1} (\hat{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}}) \\
 & - \mu \sum_i^{n_o} \ln \eta_i - \mu \sum_i^{n_o} \ln \rho_i \\
 \text{sujeito a} \quad & \\
 & \mathbf{r}_m = \mathbf{z}_m - \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}}) \\
 & \mathbf{h}_s(\hat{\mathbf{x}}) = 0 \\
 & \mathbf{h}_o(\hat{\mathbf{x}}) = \boldsymbol{\eta} - \boldsymbol{\rho}
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

onde $\bar{\mathbf{x}}$ é o vetor do conjunto de informações *a priori*. A função Lagrangeana para o Problema (4.5) é dada por:

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = \quad & \frac{1}{2} \mathbf{r}_m^T \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{r}_m + \mathbf{w}_o^T (\boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{\rho}) \\
 & + \frac{1}{2} (\hat{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}})^T \boldsymbol{\Sigma}_0^{-1} (\hat{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}}) \\
 & - \mu \left(\sum_i^{n_o} \ln \eta_i + \sum_i^{n_o} \ln \rho_i \right) \\
 & + \boldsymbol{\lambda}_m^T [\mathbf{z}_m - \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}}) - \mathbf{r}_m] \\
 & + \boldsymbol{\lambda}_s^T \mathbf{h}_s(\hat{\mathbf{x}}) + \boldsymbol{\lambda}_o^T (\mathbf{h}_o(\hat{\mathbf{x}}) - \boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{\rho})
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

onde $\boldsymbol{\lambda}_m$, $\boldsymbol{\lambda}_s$ e $\boldsymbol{\lambda}_o$ são os vetores dos multiplicadores de Lagrange correspondentes as equações das medidas, restrições estruturais e operacionais, respectivamente.

4.3.5 Solução da CET via MPDPI

O Problema (4.5) é resolvido aplicando-se a abordagem via *tableau esparsa* e um algoritmo Primal/Dual de Pontos Interiores (PDPI) especializado. As condições de otimalidade de primeira ordem de Karush-Kuhn-Tucker (KKT) podem ser obtidas da Eq. (4.6), o que resulta na seguinte sistema de equações não lineares:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{z}_m - \mathbf{r}_m - \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}}) &= 0 \\
 \mathbf{h}_s(\hat{\mathbf{x}}) &= 0 \\
 \mathbf{h}_o(\hat{\mathbf{x}}) - \boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{\rho} &= 0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{D}_\eta \boldsymbol{\sigma}_\eta - \mu \mathbf{e} &= 0 \\
\mathbf{D}_\rho \boldsymbol{\sigma}_\rho - \mu \mathbf{e} &= 0 \\
\mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{r}_m - \boldsymbol{\lambda}_m &= 0 \\
-\mathbf{H}^T \boldsymbol{\lambda} + \boldsymbol{\Sigma}_0^{-1} (\hat{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}}) &= 0
\end{aligned} \tag{4.7}$$

onde $\mathbf{D}_\eta = \text{diag}(\boldsymbol{\eta})$, $\mathbf{D}_\rho = \text{diag}(\boldsymbol{\rho})$, \mathbf{e} é um vetor coluna no qual todos os elementos são iguais a 1, $\boldsymbol{\sigma}_\eta = \mathbf{w}_o - \boldsymbol{\lambda}_o$, $\boldsymbol{\sigma}_\rho = \mathbf{w}_o + \boldsymbol{\lambda}_o$, $\boldsymbol{\lambda} = [\boldsymbol{\lambda}_m^T \ \boldsymbol{\lambda}_s^T \ \boldsymbol{\lambda}_o^T]^T$, $\mathbf{H} = [\mathbf{H}_m(\hat{\mathbf{x}})^T \ \mathbf{H}_s(\hat{\mathbf{x}})^T \ \mathbf{H}_o(\hat{\mathbf{x}})^T]^T$,

$$\mathbf{H}_m(\hat{\mathbf{x}}) = \frac{\partial \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}})}{\partial \hat{\mathbf{x}}}, \quad \mathbf{H}_s(\hat{\mathbf{x}}) = \frac{\partial \mathbf{h}_s(\hat{\mathbf{x}})}{\partial \hat{\mathbf{x}}} \quad \text{e} \quad \mathbf{H}_o(\hat{\mathbf{x}}) = \frac{\partial \mathbf{h}_o(\hat{\mathbf{x}})}{\partial \hat{\mathbf{x}}}.$$

A direção de busca a cada iteração é obtida aplicando-se o método de Newton para resolver o conjunto de equações (4.7) para um dado valor de μ :

$$\nabla^2 \mathcal{L}|_k \Delta \mathbf{y} = -\nabla \mathcal{L}|_k \tag{4.8}$$

onde $\Delta \mathbf{y} = [\Delta \mathbf{x}^T \ \Delta \boldsymbol{\eta}^T \ \Delta \boldsymbol{\rho}^T \ \Delta \boldsymbol{\lambda}^T]^T$.

Após se determinar a direção de busca, o tamanho dos passos são computados para a atualização de ambas as variáveis primal e dual, e ao mesmo tempo preservando a não-negatividade das variáveis primais $\boldsymbol{\eta}$ e $\boldsymbol{\rho}$ e variáveis duais $\boldsymbol{\sigma}_\eta$ e $\boldsymbol{\sigma}_\rho$. A não negatividade de $\boldsymbol{\sigma}_\eta$ e $\boldsymbol{\sigma}_\rho$ são garantidas pela quarta e quinta equações de (4.7) e também pela não-negatividade de $\boldsymbol{\eta}$ e $\boldsymbol{\rho}$. Para se conseguir isso, o tamanho dos passos são determinados como [41]:

$$\begin{aligned}
\alpha_p &= \min \left\{ \min_{\Delta \eta_i < 0} \frac{\eta_i}{|\Delta \eta_i|}, \min_{\Delta \rho_i < 0} \frac{\rho_i}{|\Delta \rho_i|}, 1 \right\} \\
\alpha_d &= \min \left\{ \min_{\Delta \sigma_{\eta_i} < 0} \frac{\sigma_{\eta_i}}{|\Delta \sigma_{\eta_i}|}, \min_{\Delta \sigma_{\rho_i} < 0} \frac{\sigma_{\rho_i}}{|\Delta \sigma_{\rho_i}|}, 1 \right\}
\end{aligned} \tag{4.9}$$

Finalmente, as variáveis de estado são atualizadas de acordo com a regra usual do MPDPI [41]:

$$\mathbf{y}^{k+1} = \mathbf{y}^k + \kappa \alpha \Delta \mathbf{y} \tag{4.10}$$

onde $\alpha = \alpha_p$ para as variáveis primais e $\alpha = \alpha_d$ para as duais. O parâmetro κ é usado para assegurar que todas as variáveis permanecem estritamente dentro da região viável e seu valor é menos que 1.0. Neste trabalho, $\kappa = 0.9995$ [41].

A atualização do parâmetro de barreira μ é baseado na prática usual do MPDPI e as condições de complementaridade dos problemas

de otimização [41]. Além disso, são utilizadas a quarta e quinta equações em (4.7) e o fato de que produtos do tipo $\eta_i \sigma_{\eta_i}$ e $\rho_i \sigma_{\rho_i}$ se comportam na prática como condições de complementaridade para esta aplicação específica. Como resultado, a cada iteração μ é atualizado da seguinte forma:

$$\mu = \frac{(\boldsymbol{\eta}^k)^T \boldsymbol{\sigma}_{\eta}^k + (\boldsymbol{\rho}^k)^T \boldsymbol{\sigma}_{\rho}^k}{2\beta n_o} \quad (4.11)$$

onde n_o é o número de restrições operacionais e β é um parâmetro usado para calibrar a taxa de variação de μ . Neste trabalho, $\beta = 10$.

4.3.5.1 Teste de Convergência

Tendo em vista o equacionamento proposto neste capítulo, sabe-se que a convergência do processo iterativo de CET depende do cumprimento das condições de KKT apresentadas pelo conjunto de equações (4.7). Para isso, usa-se como parâmetro de convergência um parâmetro ε (normalmente $\varepsilon = 1 \times 10^{-6}$). Sendo assim, a convergência é obtida quando as condições impostas pelo conjunto de equações (4.12) forem simultaneamente atingidas:

$$\begin{aligned} \|P^{-1}p^k - H^t \lambda^k\|_2 &\leq \varepsilon \\ \|D_{\eta}^k \sigma_{\eta}^k\|_{\infty} &\leq \varepsilon \\ \|D_{\rho}^k \sigma_{\rho}^k\|_{\infty} &\leq \varepsilon \\ \|z_m - H_m \hat{x}^k - R_m \lambda_m^k\|_2 &\leq \varepsilon \\ \|H_s \hat{x}^k\|_2 &\leq \varepsilon \\ \|H_o \hat{x}^k + \eta^k - \rho^k\|_2 &\leq \varepsilon \end{aligned} \quad (4.12)$$

4.4 Atualização da topologia

A estimação da topologia se torna uma ferramenta importante quando se tem a necessidade de se analisar o sistema no nível de seção de barra. Conforme apresentado na Subseção 3.2, com a modelagem de algumas subestações no nível de seção de barra, são incluídos no problema um número significativo de ramos chaveáveis, os quais possuem impedância nula. Em [8] foi demonstrado que quando há ocorrência de laços envolvendo ramos chaveáveis na EEG o sistema só será observável se pelo menos um dos ramos chaveáveis que compõem o laço for monitorado. Uma análise mais detalhada no contexto de fluxo de

potência em nível de seção de barra é feita em [55], onde se leva em consideração, além de configurações regulares, a presença de *loop flows* em subestações.

Após a conclusão da execução do algoritmo Primal/Dual de pontos interiores, tanto a tensão nodal como os fluxos de potência estão disponíveis. Incertezas em relação aos status dos disjuntores podem ser solucionadas realizando-se um procedimento de teste de hipóteses com um dado nível de significância utilizando o fluxo de potência estimado que passa pelo dispositivo chaveável [11]. A aplicação de tal procedimento produz um limiar positivo ϵ_{flow_ℓ} para o ramo chaveável ℓ e é utilizado pra decidir a respeito do status do disjuntor, e é dado por:

$$\epsilon_{flow_l} = \sigma_{breaker_l} N_{1-\frac{\gamma}{2}} \quad (4.13)$$

onde $N_{1-\frac{\gamma}{2}}$ é o $100(1 - \frac{\gamma}{2})$ percentual de uma distribuição normal regular, γ é o grau de confiança assumido, e $\sigma_{breaker_l}^2$ é a variância do fluxo de potência através do disjuntor l . Uma vez que os fluxos de potência são variáveis de estado, tal variância pode ser obtida da matriz de covariância dos estados, que por sua vez é parte de $(\nabla^2 \mathcal{L})^{-1}$ [11]. Neste trabalho, o grau de confiança usado é de 5%.

Na prática, um fluxo cujo valor absoluto é maior que ϵ_{flow} indica que o disjuntor correspondente está fechado; caso contrário, ele é considerado aberto.

Aplicando-se o teste de hipóteses descrito acima para todos os ramos chaveáveis, a topologia do sistema como um todo pode ser determinada. Neste trabalho, este resultado será referido com *topologia estimada*, $\hat{\mathbf{T}}$.

O problema apresentado neste capítulo considera a adição de um termo à função objetivo do problema (equação (4.1)) referente a estimação da topologia. Tal termo faz uso da propriedade interpoladora do critério de MVAP para a identificação de erros de topologia, a qual se mostra bastante eficaz para a identificação de ramos chaveáveis cujos status tenham sido presumidos erroneamente. Com isso, após a identificação dos erros de topologia, estes são corrigidos e é executada uma nova coestimação. Este processo iterativo de coestimação é repetido até que não sejam mais encontradas diferenças entre os status presumidos e estimados [18, 19]. Adicionalmente, é executado o tradicional teste do qui-quadrado, cuja distribuição fornece o limiar K_{mqp} , no valor do termo J_{mqp} para a verificação de erro grosseiro nas medidas analógicas.

4.5 Algoritmo de Coestimação de Estados e Topologia

A base teórica desenvolvida na Seção 4.3 pode agora ser utilizada para formular o procedimento de CET, resumizado no Algoritmo 1.

Algoritmo 1 Algoritmo de Coestimação de Estados e Topologia

1. Entrada dos dados:
 - (a) Vetor de medidas, \mathbf{z}_m e matriz de covariância correspondente, \mathbf{R}_m ;
 - (b) Vetor dos fatores de peso \mathbf{w}_o para a função multi-objetivo da Equação (4.2);
 - (c) Valor do limiar K_{mqp} ;
 - (d) Valor inicial para as variáveis de estado, $\mathbf{x}^{(0)}$, e topologia presumida, $\mathbf{T}^{(0)}$.
 2. Inicialização do contador de iterações: $k = 0$;
 3. Formação da matriz Jacobiana para o modelo de medição e restrições estruturais, \mathbf{H}_m and \mathbf{H}_s ;
 4. Baseado na topologia atual $\mathbf{T}^{(k)}$, formar a matriz Jacobiana para as restrições operacionais, $\mathbf{H}_o^{(k)}$;
 5. Resolver o problema multi-objetivo (4.5) via MPDPI especializado da Subseção 4.3.5 e obter $\hat{\mathbf{x}}$;
 6. Baseado nos valores estimados para os fluxos nos ramos chaveáveis, revisar os status atuais dos disjuntores de forma a produzir a topologia estimada, $\hat{\mathbf{T}}$;
 7. Se $\hat{\mathbf{T}} \neq \mathbf{T}^{(k)}$, atualizar $\mathbf{T}^{(k+1)} \leftarrow \hat{\mathbf{T}}$ e $k \leftarrow k + 1$, e voltar ao passo 4;
 8. Se $\hat{\mathbf{T}} = \mathbf{T}^{(k)}$ e $J_{mqp} < K_{mqp}$, $\hat{\mathbf{T}}$ é a topologia final estimada e $\hat{\mathbf{x}}$ é o vetor final dos estados estimados. **FIM**.
 9. Se $\hat{\mathbf{T}} = \mathbf{T}^{(k)}$ e $J_{mqp} > K_{mqp}$, há indícios de erros grosseiros no conjunto das medidas analógicas. Realizar análise e remoção de erros grosseiros e reiniciar o processo no passo 2.
-

Assume-se que um conjunto de valores de medidas que garantem a observabilidade do sistema está disponível e a topologia inicial é presumida. Esta informação é usada para compor o modelo de medição e definir os conjuntos de restrições estruturais e operacionais. O problema de CET resultante é então submetido ao MPDPI especializado descrito na Subseção 4.3.5. Este passo estima tanto as variáveis de estado como a topologia.

A topologia estimada é então comparada com a topologia previamente presumida. Caso elas não coincidam, a topologia atual é atualizada baseando-se nos estados estimados. Este procedimento é repetido até que nenhuma mudança nos status dos disjuntores seja necessária.

Para as variáveis analógicas, um teste do chi-quadrado é aplicado para a soma ponderada dos quadrados dos resíduos de forma a determinar se o resultado da estimação de estados é aceitável.

A convergência do algoritmo para uma certa topologia sem que as estimativas analógicas passem o teste do chi-quadrado é um indicativo de que há erros grosseiros entre as medidas analógicas, fato este que será discutido com mais detalhes no Capítulo 6. Neste caso, uma análise de erros grosseiros se faz necessária. Os passos detalhados para o procedimento como um todo é apresentado no Algoritmo 1.

4.6 Conclusões

A utilização do método de CET apresenta vantagens em relação a EESP e EESB, uma vez que leva em consideração a análise da topologia no nível de seção de barra conjuntamente com a estimação de estados. Isso faz com que o resultado da CET possa ser considerado mais abrangente, tendo em vista que possíveis erros de topologia da rede serão mais facilmente detectados e corrigidos sem a necessidade de se aplicar uma estimação de topologia em separado.

Estas propriedades são de grande relevância para o desenvolvimento deste trabalho de doutorado, pois a análise de subestações é feita de modo explícito e o uso das ferramentas de coestimação serem como base para o desenvolvimento dos algoritmos propostos.

5 ESTIMAÇÃO DE ESTADOS HIERARQUIZADA

5.1 Introdução

A estimação de estados em sistemas de potência é realizada tradicionalmente de forma centralizada. Porém, o surgimento de sistemas interligados continentais (como, por exemplo, ocorre na Europa) e a reestruturação do sistema elétrico não apenas em âmbito nacional, mas também mundial, trouxeram como consequência a implantação de múltiplas áreas de controle, e por conseguinte a necessidade da operação descentralizada da rede. Não é de hoje a ideia de se trabalhar com sistemas em diversos níveis [2, 3, 32], criando-se assim uma divisão hierárquica para a operação do sistema elétrico como um todo. Esta hierarquização do sistema elétrico afeta, em primeira instância, a estimação de estados, que passa a ser realizada por região/área, mediante o processamento local das medidas disponíveis neste nível. Os resultados das estimações locais são enviados para serem coordenados no nível hierárquico superior, levando assim a uma redução na quantidade de informações a serem transferidas via elos de telecomunicações. Tal redução é particularmente bem-vinda no momento em que a estimação de estados passa por diversas mudanças decorrentes do advento de novas tecnologias e métodos, que favorecem a inclusão da modelagem de subestações e de medidas provenientes de outras fontes, principalmente de PMU's [5, 6, 36]. Se tais informações tivessem que ser processadas por um estimador centralizado, disto resultaria um significativo aumento da massa de dados a ser transmitida para o centro de operações pelos sistemas de telecomunicações.

Neste capítulo serão apresentados os conceitos básicos de estimação de estados hierarquizada (EEH), bem como uma revisão bibliográfica das metodologias existentes. Estes conhecimentos subsidiarão o desenvolvimento da proposta deste trabalho de doutorado.

5.2 Noções Gerais sobre a Organização de Sistemas Hierarquizados

Um sistema elétrico interligado pode ser dividido em k áreas (ou subsistemas) conexas, independentes e não sobrepostas, A_1, A_2, \dots, A_k . Seja S_i o conjunto de barras pertencentes a cada subsistema. Portanto, tem-se que:

$$S_i \cap S_j = \emptyset \quad (i \neq j; i, j = 1, 2, \dots, k) \quad (5.1)$$

$$\cup_{i=1}^k S_i = S$$

Os subsistemas são conectados através de ramos de interligação (que fisicamente representam linhas de transmissão ou transformadores), para os quais cada barra terminal se encontra em uma área diferente. A estas barras dá-se o nome de *barras de fronteira* [2], cujo conjunto pode ser representado por S_c . Este conjunto pode ser considerado como o conjunto que representa a pseudo-área A_{k+1} , que contém todas as barras de fronteira do sistema. Sendo assim, é fácil deduzir que:

$$S_c^i = S_c \cap S_i \quad (5.2)$$

onde S_c^i é o conjunto de barras pertencente ao subsistema A_{k+1} que contém as barras de fronteira da área A_i . As barras de um dado subsistema que não são de fronteira são denominadas barras *internas*.

Tendo em vista as definições apresentadas acima tem-se que, para cada subsistema A_i :

- n_i : número de barras pertencentes ao subsistema A_i ;
- n_c^i : número de barras de fronteira do subsistema A_i ;
- $\mathbf{x}_c^i = [\boldsymbol{\theta}_c^{i\ t}, \mathbf{V}_c^{i\ t}]^t$: vetor das variáveis de estado das barras de fronteira do subsistema A_i ;
- $\mathbf{x}_r^i = [\boldsymbol{\theta}_r^{i\ t}, \mathbf{V}_r^{i\ t}]^t$: vetor das variáveis de estados das barras internas do subsistema A_i .

Além disso, o número total de barras de fronteira é dado por:

$$n_c = \sum_{i=1}^k n_c^i \quad (5.3)$$

Para um determinado subsistema, as variáveis de estado a serem determinadas no processo de estimação de estados são:

$$\mathbf{x}_i = [\mathbf{x}_c^{i\ t}, \mathbf{x}_r^{i\ t}]^t \tag{5.4}$$

Para o pseudo-subsistema A_{k+1} , o vetor \mathbf{x}_c das variáveis de estado a serem coordenadas no nível hierárquico superior pode ser definido como:

$$\mathbf{x}_c = [\mathbf{x}_c^{1\ t}, \mathbf{x}_c^{2\ t}, \dots, \mathbf{x}_c^{k\ t}, \mathbf{u}]^t \tag{5.5}$$

onde \mathbf{u} é um vetor de dimensão $(k - 1)$ que representa a defasagem angular entre os diversos subsistemas e a barra de referência angular global:

$$\mathbf{u} = [u_2, u_3, \dots, u_k]^t \tag{5.6}$$

Observa-se que a equação (5.6) não contém o ângulo do subsistema A_1 , u_1 . Isso ocorre pelo fato de se atribuir à barra de referência do subsistema A_1 a referência angular global do sistema, ou seja, $u_1 = 0$. Todas as demais barras de referência dos outros subsistemas constituem o vetor de coordenação \mathbf{u} definido pela equação (5.6). É importante ressaltar que a área A_1 é escolhida arbitrariamente como a área que contém a referência global do sistema por questão de praticidade para apresentar a formulação do problema, sem qualquer perda de generalidade.

A Figura 3 ilustra de maneira simplificada as áreas interligadas e os ângulos de coordenação.

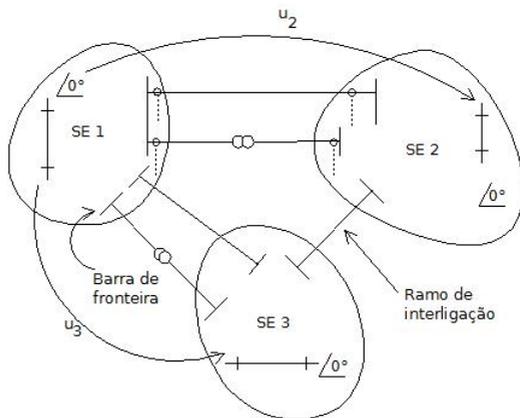


Figura 3 – Exemplo de um sistema dividido em três áreas conexas.

Tem-se ainda que o vetor \mathbf{z} , de dimensão m , representa o con-

junto de medidas de todo o sistema, podendo ser particionado da seguinte forma:

$$\mathbf{z} = [\mathbf{z}_1^t, \mathbf{z}_2^t, \dots, \mathbf{z}_k^t, \mathbf{z}_u^t]^t \quad (5.7)$$

onde \mathbf{z}_i é o vetor do conjunto de medições do subsistema A_i e inclui todas as medidas de injeção e fluxo de potência ativa e reativa, medidas de tensão e corrente, etc, do subsistema A_i . Adicionalmente, \mathbf{z}_u é o vetor do conjunto de medições do pseudo subsistema A_{k+1} , contendo apenas as medidas de fluxo de potência ativa e/ou reativa nos ramos de interligação.

5.3 Estrutura local na Estimação Hierárquica

A estimação de estados no nível local compreende a estimação de cada subsistema, realizada de forma independente e possivelmente simultânea. Neste capítulo, bem como no restante desta proposta de trabalho de doutorado, ignora-se o efeito da “janela de tempo”, resultante do fato de que os dados enviados ao nível hierarquicamente superior não são necessariamente coletados no mesmo instante de tempo. Além disso, a modelagem de cada subsistema, bem como o método de estimação de estados utilizado, pode ser escolhido de acordo com a preferência do operador da respectiva área.

Sendo assim, cada área do sistema S terá seu próprio estimador e fornecerá ao Centro de Operação do Sistema Interligado apenas as informações que este necessita para a realização da EE de nível hierárquico superior. Conforme descrito anteriormente, as informações provenientes dos ramos de interligação devem ser tratadas de forma diferente das demais medidas, já que devem ser processadas no nível hierárquico superior. A Figura 4 ilustra a estrutura hierárquica em dois níveis para a EEH.

5.4 Algoritmos de Estimação de Estados Hierárquica

Conforme descrito na Seção 5.3, a estimação no nível local é feita de modo praticamente padronizado nos diversos tipos de estimação hierárquica. O grande diferencial entre as diversas abordagens está na forma com que os dados são tratados no nível hierárquico superior, bem como o que é considerado relevante para ser tratado como variável de estado a ser estimada tanto no nível local quanto no nível hierárquico superior.

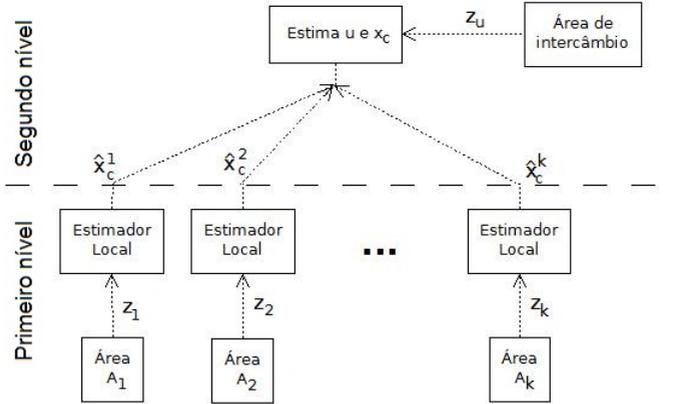


Figura 4 – Ilustração de estrutura hierárquica de dois níveis.

Nesta seção serão apresentados alguns algoritmos de estimação de estados hierarquizada propostos por diversos autores. Há diversos algoritmos propostos na literatura, porém neste trabalho são discutidas quatro abordagens. Duas dentre estas, apesar de serem anteriores à absorção de alguns avanços tecnológicos relevantes pelo sistema elétrico de potência [2,3], servem como base para o desenvolvimento de abordagens mais modernas para a estimação de estados hierarquizada [5,6,35]. É importante ressaltar que tais propostas supõem que a topologia da rede está correta, ou adotam um método heurístico para determinação da mesma.

5.4.1 Algoritmo Proposto por Van Cutsem et al.

O algoritmo proposto em [2] leva em consideração que o vetor de estados estimados da equação (5.4) para cada subsistema está disponível e que um vetor de estimativas para os estados correspondentes às barras de fronteira (ver equação (5.5)) pode ser gerado a partir das medidas locais. Estes serão re-estimados no nível superior.

Com isso, o novo vetor de estados a ser estimado no nível hierárquico superior pode ser definido como:

$$\mathbf{x}_s = [\mathbf{u}^t, \mathbf{x}_c^t]^t \quad (5.8)$$

Sendo assim, o vetor de “medidas” a ser processado no nível superior é

composto da seguinte forma:

$$\mathbf{z}_s = [\mathbf{z}_u^t, \hat{\mathbf{x}}_c^t]^t \quad (5.9)$$

Conseqüentemente, o modelo de medição a ser utilizado para a estimação de estados no nível superior fica:

$$\mathbf{z}_s = \mathbf{h}_s(\mathbf{x}_s) + \boldsymbol{\eta}_s \quad (5.10)$$

ou, em forma mais detalhada:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{z}_u \\ \hat{\mathbf{x}}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_c(\mathbf{u}, \mathbf{x}_c) \\ \mathbf{x}_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{\eta}_u \\ \boldsymbol{\eta}_c \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

Após se definir o modelo de medição para o nível hierárquico superior, procede-se à estimação de estados. O algoritmo proposto por [2] pode ser melhor visualizado através da Figura 5.

Na proposta apresentada em [2], o estimador central tem que estimar não apenas as defasagens angulares entre as diversas áreas do sistema em relação à referência global, mas também re-estimar os estados correspondentes às barras de fronteira. Com relação a este ponto específico, os autores das referências [3, 4] propõem uma nova abordagem.

5.4.2 Algoritmo Proposto por Lo et al.

Lo e co-autores concluem, após numerosas simulações, que os estados estimados correspondentes às barras de fronteira estimados pelo estimador local pouco diferem de seu valor final (re-estimado no nível central), além de pouco influenciarem na precisão da estimação resultante. Com isso, propõem um novo algoritmo, visto como um aprimoramento do algoritmo proposto em [2], o qual reduz o número de informações a serem transmitidas, bem como o esforço computacional necessário para se estimar os estados.

No nível central, o estimador receberá informações provenientes das medidas de potência ativa das linhas de intercâmbio (\mathbf{z}_a), cuja relação com o vetor de estados \mathbf{u} será dada por:

$$\mathbf{z}_a = \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}_b, \mathbf{u}) + \boldsymbol{\eta}_a \quad (5.12)$$

onde o vetor dos estados correspondentes às barras de fronteira ($\hat{\mathbf{x}}_b$), estimados no nível local, permanecerá constante durante todo o pro-

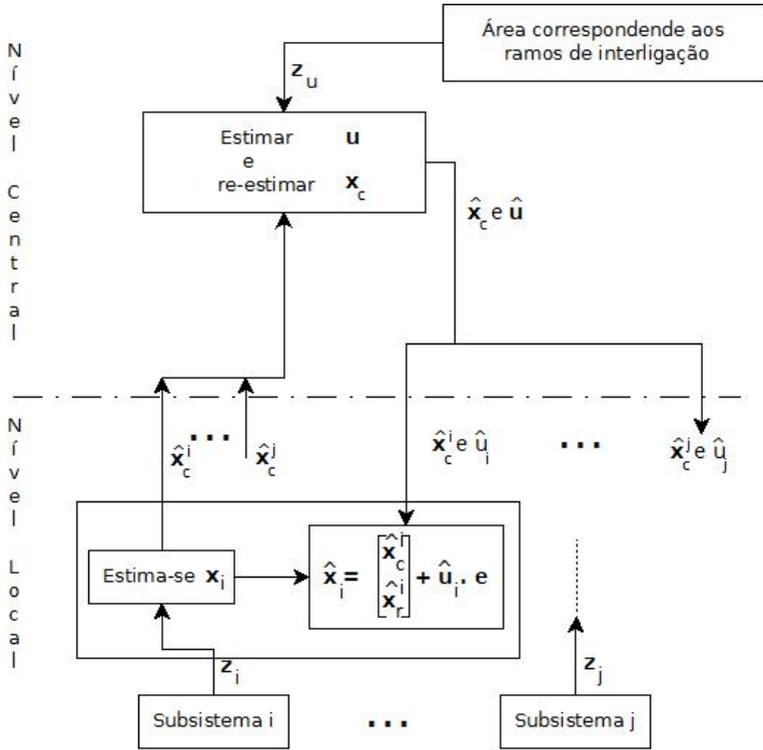


Figura 5 – Algoritmo Proposto por Van Cutsem et al. [2]

cesso de estimação no nível central. Sendo assim, apenas as estimativas referentes às defasagens angulares das áreas do sistemas com relação à referencia global serão calculadas e transmitidas para os seus subsistemas correspondentes. O algoritmo proposto pode ser visualizado através da Figura 6.

5.4.3 Algoritmo Proposto por Yang et al.

O algoritmo apresentado em [5, 6] leva em consideração um cenário mais atual, no qual se vislumbra a inserção de novas tecnologias à rede elétrica, por exemplo PMU. Isto implica em um aumento da complexidade do problema, além do fato de que a proposta contempla a modelagem explícita de algumas subestações da rede interligada.

Tendo em vista que a disponibilidade de medidas PMU no nível

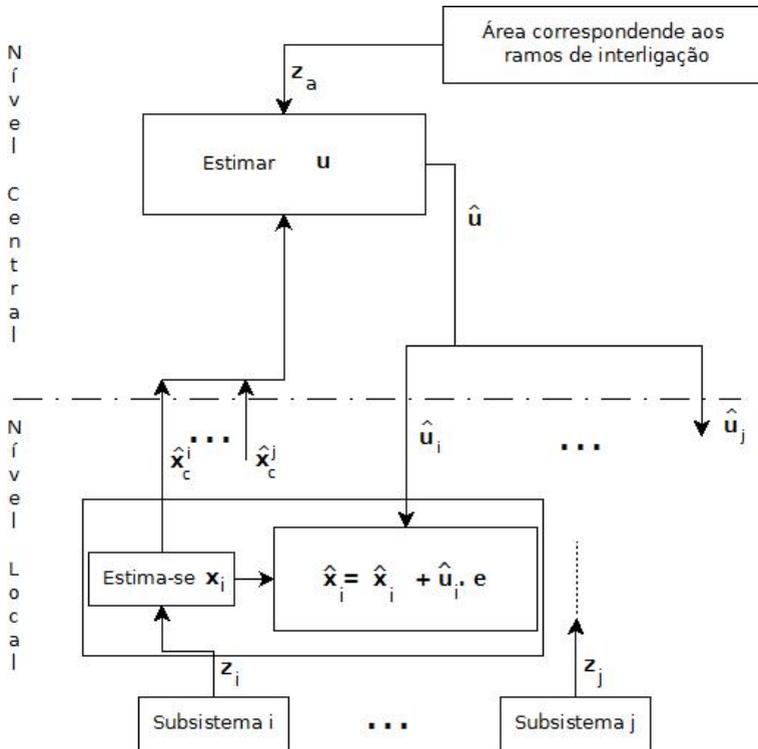


Figura 6 – Algoritmo Proposto por Lo et al. [3,4]

de subestação tende a aumentar gradativamente, os autores apresentam um modelo híbrido de estimação hierárquica, o qual concilia a estimação de estados tradicional a um estimador linear proposto simultaneamente. Com isso, obtém-se um método que permite o usufruto imediato dos benefícios apresentados pelas partes do sistema onde há disponibilidade de medidas PMU, gerando um modelo de transição para os sistemas futuros.

O algoritmo proposto apresenta uma divisão da estimação de estados entre as subestações e os diversos controladores centrais. Para tal, assume-se que há medidas PMU suficientes em cada subestação, a ponto de garantir observabilidade e condições adequadas de redundância para permitir a utilização um estimador linear. Adicionalmente, o processamento da topologia e a detecção de erros podem ser realizados no nível de subestação.

A estimação em nível de subestação é realizada em diversas etapas. Primeiramente, devido à não-inclusão dos transformadores na modelagem das subestações, resolve-se cada nível de tensão separadamente. Em seguida, medidas fasoriais de corrente e de tensão serão processadas separadamente. Isto permite que seja realizada uma comparação heurística entre as correntes através dos dispositivos chaveáveis estimados e os status (aberto ou fechado) correspondente aos mesmos. De acordo com os autores, se a corrente através de um dispositivo chaveável não é próxima de zero mas o status é tido como aberto, pode-se concluir, com alta probabilidade, que a medida correspondente ao status está incorreta e que o status real deste dispositivo é fechado.

No controlador central, o estimador receberá as estimativas para as medidas, bem como a topologia da subestação, provenientes do estimador local presente em cada subestação. Com isso, obtém-se um estimador de estados linear, o qual realiza a estimação de estados mais eficientemente, tendo em vista que a maior parte da estimação foi realizada no nível de subestação, e a solução linear garante uma solução sem divergência.

A Figura 7 apresenta o algoritmo proposto por [5, 6], no qual o controlador central é responsável por coordenar as estimativas obtidas através de algoritmos lineares e não-lineares provenientes de cada subsistema.

5.4.4 Algoritmo Proposto por Expósito e Villa Jaén

A proposta apresentada em [35] leva em consideração uma estimação de estados hierarquizada em dois níveis, buscando integrar de modo lógico e eficiente os resultados provenientes da estimação distribuída no nível local com a EE convencional no nível central.

Desta forma, as medidas obtidas em cada subestação são pré-processadas localmente de modo a enviar para o nível central um conjunto menor de medidas, composto basicamente pelos fluxos de potência e magnitudes das tensões. Com isso, cada subestação será reduzida a apenas uma barra equivalente. Entretanto, nos casos em que a modelagem da subestação resulte em mais de uma área, o número de barras ao qual ela será reduzida corresponderá ao número de áreas. As barras não-observáveis no nível local serão processadas no nível central, e um modelo linear é utilizado no nível local. Isto é possível porque as subestações incluem apenas dispositivos chaveáveis no mesmo nível de tensão, sendo que as impedâncias dos transformadores são levadas em

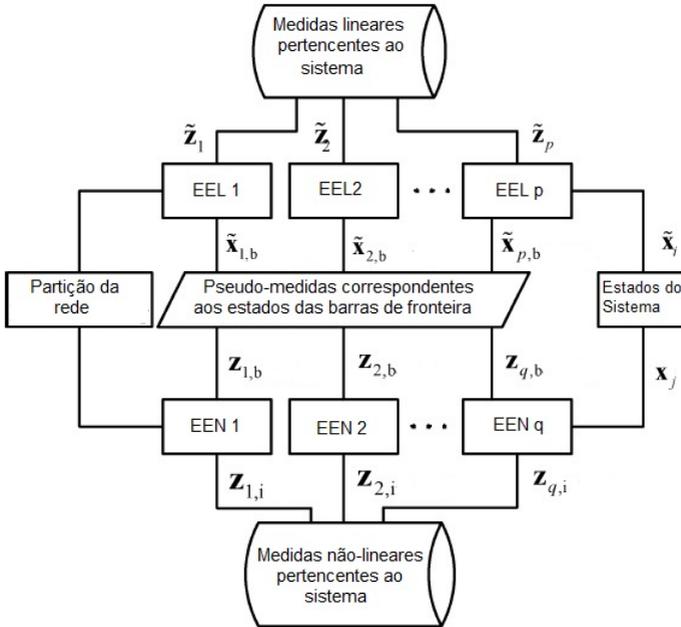


Figura 7 – Algoritmo Proposto por Yang et al. [5,6]. (EEL - estimador de estados linear; EEN - estimador de estados não-linear)

consideração apenas no nível central.

Tendo isto em vista, no nível local é processada a maior parte das informações referentes a barras de injeção nula e medidas de injeção de potência. Este processamento é feito de forma distribuída, ou seja, cada subestação que contiver medidas suficientes para que seja possível estimar os estados localmente, realizará a EE com o uso de um estimador linear. Após esta etapa, as informações relevantes e necessárias para EE no nível central são enviadas aos centros de operação, onde serão processadas por um EESP convencional.

Esta proposta de EEH, segundo os autores, é vantajosa em um cenário no qual as SEs possuem informações e medidas suficientemente redundantes para que seja possível a EE no nível local. Os autores ressaltam ainda que o custo computacional requerido para processar este estimador de estados hierárquico é menor se comparado à performance de EESP de forma centralizada existentes.

5.5 Conclusões

Neste capítulo foram apresentados os conceitos de estimação de estados hierarquizada e algumas abordagens propostas por diversos autores para realizá-la.

Pode-se observar, com base nas propostas de [5, 6, 35], que o cenário da estimação de estados hierarquizada se tornou mais abrangente nos últimos anos e que técnicas mais tradicionais, como as apresentadas em [2–4], devem ser adaptadas para absorver novas tecnologias e tendências.

Um ponto em comum a todos os algoritmos aqui apresentados é o objetivo de se enviar para o controlador central uma quantidade menor de informações, de modo a não sobrecarregar os sistemas de telecomunicação e também para agilizar o processo de estimação de estados.

Tendo em vista o conteúdo apresentado previamente nesta tese, intuitivamente se percebe que, no contexto de hierarquização da EESP, a busca por melhores ferramentas para a EE local pode produzir ganhos também para a EE no nível hierárquico superior. Estes aspectos serão abordados no próximo capítulo, sendo levados em consideração para a formulação da proposta desta tese.

6 ESTIMAÇÃO DE ESTADOS HIERÁRQUICA EM DOIS NÍVEIS

6.1 Introdução

A disponibilidade crescente de informações a respeito de variáveis da rede elétrica, bem como a presença cada vez maior de dispositivos inteligentes no nível de seção de barra, geraram um novo problema: como processar esta massa de informações de forma eficiente sem provocar congestionamento nas redes de comunicação de suporte à operação dos sistemas elétricos de potência.

Algumas abordagens para solucionar este problema vão ao encontro à aplicação de conceitos já existentes sobre a estimação de estados, embora originalmente propostos em outros contextos. Estes conceitos relacionam-se à descentralização do processamento dos dados requeridos pelos estimadores, evitando-se assim congestionamentos nas redes de telecomunicações e portanto a necessidade de implementação de novas linhas de transmissão de dados de alta velocidade.

Neste capítulo apresentam-se duas propostas para solução deste problema atual relacionado à modelagem em tempo real de redes elétricas, baseadas em conceitos de estimação de estados hierárquica em dois níveis, na qual o nível local será representado por subestações individuais, enquanto que o nível hierárquico superior é exercido pelo operador regional do sistema elétrico.

6.2 Novo Cenário para as Subestações

Muitas subestações ao redor do mundo têm pelo menos 30 anos de operação e equipamentos de monitoração e controle precisarão ser atualizadas ou substituídas [23]. Esta modernização traz consigo a implementação de dispositivos eletrônicos inteligentes, resultando numa autonomia cada vez maior das subestações [21, 23, 24].

Neste cenário onde subestações antigas e novas (atualizadas) fornecem dados a serem processados nos centros de operação, foi criada uma norma para servir de padrão internacional de transmissão de dados provenientes de subestações, a IEC 61850. Seu objetivo é conciliar a interação entre os diferentes tipos de dados provenientes dos modelos

de subestações existentes, de forma a auxiliar a etapa de processamento eficiente dos dados, bem como na tomada de decisões [21–25].

O novo modelo de subestação de alta tensão possui diversas modificações em relação ao antigo, entre as quais está a implementação de equipamentos com microprocessadores que permitem a coleta e armazenamento digital de todos os dados [24]. Além disso, há a disponibilidade crescente de medidas fasoriais oriundas de Unidades de Medição Fasorial (PMUs - *Phasor Measurement Units*). Isso resulta numa automatização crescente no nível de seção de barra, onde as informações e controles podem ser sincronizadas com alta precisão através de GPS [23–25].

A maior parte das informações coletadas nas subestações pode ser agora processada localmente, sem a necessidade de transmissão para os centros de operação. Esse processo se tornou cada vez mais relevante devido ao volume de informações atualmente gerado, o que tende a tornar inviável a transmissão completa destes dados, uma vez que seria necessária a implementação de um número bastante elevado de linhas de transmissão de dados de alta velocidade baseada na tecnologia de fibras óticas [23].

Tendo em vista o que foi apresentado nesta seção, diversas propostas para se processar estas informações tem sido feitas [21–25]. Todas elas têm em comum a premissa de que é importante reduzir o volume de dados a ser transmitido de cada subestação para o centro de operações.

6.3 Estimação de Estados Hierárquica em dois Níveis

Os conceitos discutidos nas seções anteriores evidenciam a importância de se processar localmente os dados provenientes dos novos dispositivos eletrônicos inteligentes instalados nas subestações e transmitir ao COR apenas as informações relevantes a determinadas aplicações.

Conforme apresentado no Capítulo 5, o modelo de estrutura hierárquica é aplicável em diversos contextos, desde sistemas continentais com descentralização a nível nacional (como no caso da Europa), até redes elétricas nacionais resultantes da interligação de áreas de controle sob a responsabilidade de distintos operadores regionais. O modelo hierárquico permite ao operador local reter boa parte das informações sobre o sistema que controla e enviar ao centro de operação apenas as

informações necessárias à monitoração e controle do sistema como um todo.

Tendo em vista os conceitos apresentados nos capítulos anteriores, aliados ao cenário aqui apresentado, pode-se concluir que a estimação hierárquica é uma forma eficaz de se estimar os estados de forma descentralizada, sem grandes perdas em relação à estimação de estados centralizada.

Considerando também a crescente importância das subestações para a operação em tempo real do sistema elétrico, este trabalho de doutorado apresenta uma nova proposta de estimação de estados hierárquica em dois níveis, na qual o nível local consiste da coestimação de estados e topologia de cada subestação, e o nível hierárquico superior diz respeito à coordenação dos processos locais de estimação executada nos centros de operação do sistema elétrico. As etapas e ações relacionadas a estes dois níveis hierárquicos são detalhadas nas seções a seguir, sendo apresentada ao final deste capítulo a arquitetura de estimação hierárquica descentralizada proposta nesta tese. Finalmente, o capítulo é concluído com a apresentação de um exemplo ilustrativo.

6.4 Coestimação de Estados e Topologia em Nível de Seção de Barra

A estimação de estados no nível de seção de barra vem sendo alvo constante de pesquisa [10, 15–19, 38]. Contudo, os modelos de estimação de estados considerando subestações abordados na literatura em geral utilizam modelos barra-ramo estendidos, no qual apenas as subestações localizadas nas chamadas zonas de anomalia do sistema (também chamados *bad data pockets* na literatura em inglês [10, 12]) são modeladas e incluídas na estimação de estados.

Este trabalho parte da constatação que, dada a disponibilidade cada vez maior de informações presentes nas subestações, haverá dados suficientes para garantir sua observabilidade e, com isso, possibilitar a estimação de estados e topologia localmente. Fica assim caracterizado um processo de migração da modelagem em tempo real para o nível de subestações, bem como ressaltada a importância cada vez maior destes componentes no processo de tomada de decisões sobre a operação da rede elétrica [21–25]. Uma vantagem inerente a este tipo de modelagem é a possibilidade de se excluir medidas errôneas já no nível de seção de barra, viabilizando a transmissão de dados preliminarmente depurados para o estimador do centro de operações regional (ou central) do

sistema.

Tendo em vista que as subestações são consideradas como os níveis locais do estimador hierárquico aqui proposto, é preciso introduzir algumas definições. O passo inicial é a definição da arquitetura de estimação a ser utilizada, considerando-se o tipo de informação disponível no nível local, que em geral consiste de fluxos de potência através dos dispositivos chaveáveis e status (aberto ou fechado) destes dispositivos. Propõe-se a utilização do modelo de coestimação desenvolvido em [18, 19] apresentado no Capítulo 4. A escolha desta arquitetura de coestimação apresenta como grande vantagem a estimação concomitante de estados e topologia, sem que haja a necessidade de se utilizar processos distintos de estimação (um para topologia e outro para os estados) em sequência. Busca-se também explorar ao máximo o potencial do método de coestimação de estados e topologia, aplicando-o a cada subestação do sistema elétrico de potência.

Para poder utilizar o coestimador de estados e topologia apresentado em [19] para modelagem no nível de subestação, torna-se necessário adaptar o algoritmo originalmente proposto a esta nova aplicação. A Figura 8 ilustra a partição do sistema elétrico considerado neste trabalho para acomodar a arquitetura de estimação proposta. Na arquitetura da Figura 8, os subsistemas que compõem o sistema elétrico correspondem às subestações, as barras do nível local de estimação são os nós presentes nos arranjos das subestações, os ramos de interligação entre as áreas são as próprias linhas de transmissão que conectam uma subestação a outra, e as barras de fronteira são as barras das subestações das quais partem as linhas de transmissão. Transformadores existentes nas subestações reais são considerados apenas no nível hierárquico superior, o que implica que as subestações aqui modeladas são na realidade o conjunto de chaves e disjuntores conectados no mesmo nível de tensão. Caso uma subestação tenha mais de um nível de tensão (o que é comum na prática), cada nível de tensão é considerado individualmente e as impedâncias dos transformadores são processadas no nível hierárquico superior como impedâncias de ramos de interligação entre diferentes áreas da subestação real.

Nesta modelagem, uma importante consideração a ser feita relaciona-se aos fluxos de potência medidos nas barras de fronteira. Quando se analisa uma subestação, sabe-se que ela é composta por dispositivos chaveáveis que ligam um nó interno a outro, e que a estes nós estão conectados cargas, unidade geradoras e linhas de transmissão. Ao considerar a subestação como uma área componente do sistema elétrico, os fluxos em linhas de transmissão medidos próximos a barras de fronteira

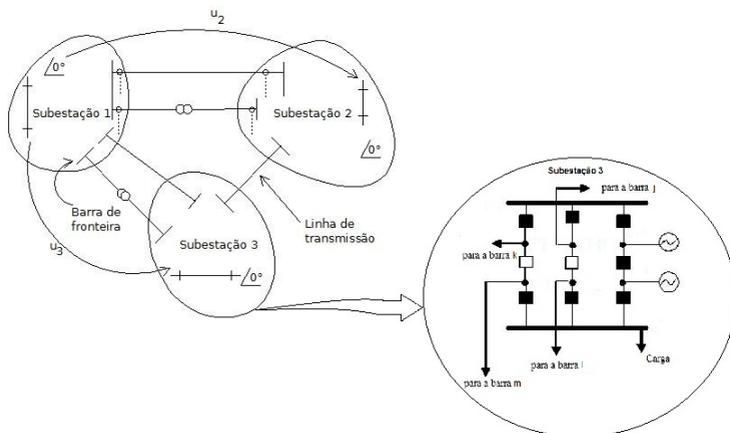


Figura 8 – Exemplo de sistema conexo composto por três subestações.

podem ser considerados como injeções de potência nestas barras. Adicionalmente, estas medidas de fluxo são enviadas para processamento no nível hierárquico superior, que determina a estimação de estados do sistema interconectado global.

Sendo assim, no processo de coestimação de estados e topologia conduzida no nível de seção de barra, são processadas medidas de fluxo de potência internas à subestação (isto é, realizadas nos ramos chaveáveis), os status dos dispositivos chaveáveis, medidas de injeção de potência associadas a componentes de geração/carga conectadas à subestação, e fluxos de potência monitorados em ramos incidentes à subestação (tratados como medidas de injeção de potência nas barras de fronteira pertencentes à subestação).

Como resultado deste processo de coestimação, tem-se os estados e topologia estimados para cada subestação, bem como as estimativas de fluxos de potência em cada terminal das linhas de transmissão. É importante ressaltar que os fluxos de potência em cada terminal das linhas de transmissão são estimados mesmo que não sejam medidos, uma vez que, sendo a subestação em questão observável, é possível obter estimativas para as injeções de potência em todas as suas seções de barra.

6.4.1 Análise de erros grosseiros no nível de Seção de Barra utilizando a CET

A análise de erros grosseiros na estimação de estados é uma ferramenta essencial validar o resultado da modelagem em tempo real. Normalmente este processo é dividido em duas etapas: uma para erros em medidas analógicas e outro para a topologia da rede.

Como consequência da metodologia adotada para o processo de estimação no nível de seção de barra, a topologia estimada é resultado da presença ou não de um fluxo de potência significativo através de um dispositivo chaveável. Sendo assim, a topologia é um resultado direto da estimação de estados para as medidas analógicas.

A execução do algoritmo de CET (apresentado na Seção 4.5) visa minimizar a função objetivo descrita pela Eq. (4.2). Conforme citado no Capítulo 4, a convergência deste algoritmo está condicionada à confirmação da topologia (isto é, a topologia estimada ser igual a topologia presumida). Adicionalmente, outra condição para a convergência do algoritmo de Coestimação apresentado na Seção 4.5 é que o componente J_{mqp} da função multi-objetivo, referente à soma ponderada dos quadrados dos resíduos das medidas analógicas, deve ser menor que um limiar K_{mqp} obtido da distribuição do Qui-quadrado. Esta última tem por base o procedimento de detecção descrito na Subseção 2.5.1 e seu intuito é evitar que os resultados da coestimação sejam contaminados pela presença de erros grosseiros em medidas analógicas.

Este trabalho realiza uma incursão na análise de erros grosseiros para a CET, baseada nas premissas apresentadas acima, obtendo resultados encorajadores, apresentados no Capítulo 7 deste documento. Tais resultados demonstram que a presença de erros grosseiros em medidas analógicas afetam em maior escala a parcela J_{mqp} da função objetivo 4.2 do que a parcela J_{mvap} , associada à estimação da topologia de uma dada subestação.

6.5 Estimação de Estados no Centro de Operação Regional

Conforme apresentado no Capítulo 5, há diversas abordagens para a estimação de estados hierárquica em sistemas de potência, sendo que o principal diferencial entre elas está na forma como as medidas são processadas no nível hierárquico superior e em como os resultados desta estimação são tratados. Os autores da referência [3] apresentam uma comparação entre diferentes métodos até então existentes e propõe

uma nova arquitetura para estimação hierárquica, a qual é mais detalhada em [4]. Um estudo comparativo independente entre as principais arquiteturas para estimação de estados hierárquica é feito em [34], e comprova que o método proposto em [3, 4] apresenta vantagens em relação aos demais.

Tanto em [3] quanto em [34], são analisadas as características do método proposto em [3, 4]. Uma delas origina-se da constatação de que os estados estimados localmente pouco diferem dos estados estimados de forma centralizada, estando apenas defasados de um ângulo u_i medido em relação à referência global do sistema, quando comparados com resultados da estimação centralizada. Como consequência, ao utilizar a arquitetura proposta em [3], os estados no nível local não são re-estimados como parte do processo de estimação conduzida no nível hierárquico superior, realizado no centro de operação do sistema elétrico.

Tendo em vista as vantagens apresentadas em [3] e confirmadas em [34], propõe-se a adoção da arquitetura desenvolvida por Lo et al. em [3, 4] no desenvolvimento deste trabalho de doutorado.

Na presente aplicação o nível hierárquico superior é representado pelo Centro de Operação Regional (COR). Um ponto a ser ressaltado é o fato de que, neste nível, o algoritmo de estimação de estados escolhido pouco interfere no resultado final. Na implementação da proposta apresentada neste documento, é utilizado o Método de Givens com Três Multiplicadores, discutido no Capítulo 2. Esta abordagem apresenta como vantagens a robustez numérica e facilidade de se trabalhar com informações *a priori* [15].

Neste estágio de estimação, são processadas as informações de fluxo de potência ativa estimados nas linhas de transmissão conexas provenientes do processo de coestimação local. Conforme proposto em [3], tais informações não são re-estimadas, e permanecerão constantes durante o processo de estimação de estados no COR. Em conjunto com os resultados obtidos pelos estimadores locais, as informações de fluxo de potência estimados nas linhas de transmissão apresentam redundância (já que se pressupõe que os fluxos de potência são medidos nos dois extremos das linhas de transmissão), abrindo a possibilidade de detecção de possíveis erros grosseiros também neste nível hierárquico. Para tal, faz-se uso da análise de erros grosseiros descrita na Subseção 2.5.2.

Os resultados da estimação no nível hierárquico superior são portanto as variáveis de coordenação, representadas pelas diferenças angulares entre as barras de referência de cada subestação e a referência

global do sistema.

6.5.1 Análise de informações provenientes de PMUs

Em um cenário no qual a presença de PMUs na rede elétrica é cada vez maior e as informações provenientes destes dispositivos não se restringem apenas às tensões nodais, mas também as correntes nos ramos incidentes nas barras próximas às quais se encontram instaladas, algumas considerações devem ser feitas.

Em primeiro lugar, os operadores dos sistemas elétricos de potência dificilmente substituiriam seus estimadores baseados em medidas SCADA já em operação por um novo estimador híbrido (que processa tanto medidas provenientes do SCADA como de PMUs) ou ainda por um estimador que processa exclusivamente medidas PMU. Por outro lado, as evidentes propriedades desejáveis das medidas fasoriais apontam para a importância de considerá-las no processo de modelagem em tempo real de redes elétricas. Isto, porém, deve ser realizado sem prejuízo para os estimadores existentes. Além disso, há o problema de diferentes taxas de amostragem, uma vez que os tempos de varredura do sistema SCADA e PMU são bem distintos (Fig. 9).

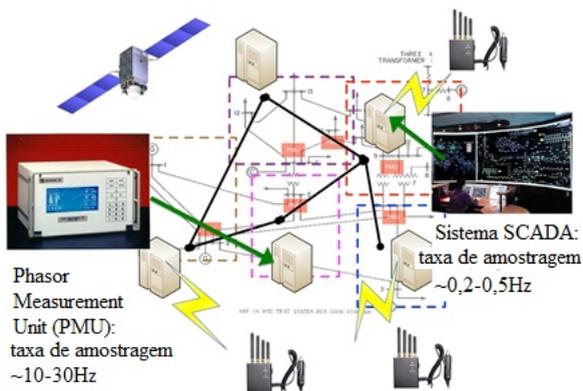


Figura 9 – Sistema de potência com SCADA e PMU instalados [7].

Uma possibilidade para conciliar medidas SCADA e medidas fasoriais consiste em considerar estas últimas como informações *a priori*, que são facilmente absorvidas pelo estimador ortogonal escolhido neste trabalho de doutorado, conforme apresentado na Subseção 2.3.1. Ao adotar esta abordagem, apenas as tensões nodais provenientes de PMUs

são utilizadas para aprimorar a qualidade das estimativas, mantendo-se a proposta fiel à metodologia proposta por [3].

Por outro lado, a disponibilidade de informações fasoriais também a respeito das correntes nas linhas de transmissão traz mais informações a respeito do sistema como um todo, aumentando a redundância das medidas existentes, o que favorece a qualidade das estimativas.

Em [48], o autor propõe um estimador ortogonal em blocos, conforme apresentado na Subseção 2.4, que é acoplado à saída do estimador convencional para processar apenas informações provenientes de PMUs, incluindo tanto tensões nodais quanto correntes nos ramos. Tal estimador pode então ser acoplado à saída do estimador SCADA utilizado neste trabalho, proporcionando assim o estimador de nível superior da arquitetura em dois estágios.

Essa abordagem, embora modifique marginalmente a proposta inicial de estimação hierárquica seguindo a metodologia proposta em [3], contribui para enriquecer o resultado das estimativas obtidas. Sua adoção significa que o estimador SCADA de nível superior deixa de tratar as medidas fasoriais como informações *a priori*, porém mantém a proposta de apenas estimar os ângulos de coordenação entre a referência global e as referências locais de cada SE. Em seguida, o resultado destas estimativas são enviadas para o estimador ortogonal em blocos como informação *a priori* para então serem processadas com as medidas fasoriais presentes no sistema e, por fim, gerar a estimativa final do sistema como um todo.

Levando em consideração o exposto acima, chega-se às seguintes propostas para estimação no nível hierárquico superior:

E1FC: estimador caracterizado por [27, 28]:

- estimador de um único estágio;
- inicializado por medidas fasoriais de tensão (ângulo) obtidas por PMUs;
- processa medidas SCADA convencionais.

Esta estrutura de estimação para o nível de coordenação pode ser vista na Fig. 10.

E2CB: estimador caracterizado por:

- estimador em 2 estágios;
- o primeiro estágio é um estimador convencional que processa medidas SCADA;



Figura 10 – Arquitetura E1FC de estimação para nível de coordenação.

- o segundo estágio, inicializado com as estimativas produzidas no primeiro estágio, processa medidas fasoriais de tensão e de corrente.

Esta arquitetura de estimação é apresentada na Fig. 11.

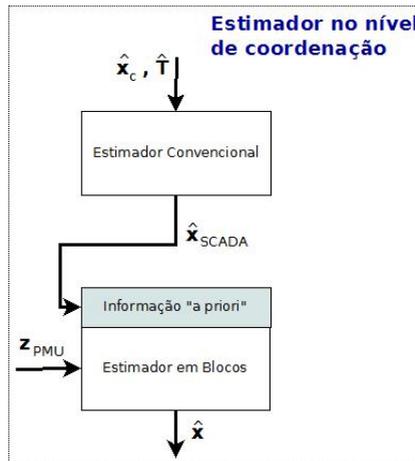


Figura 11 – Arquitetura E2CB de estimação para nível de coordenação.

6.5.2 Análise de erros grosseiros para estimador ortogonal em blocos

Conforme descrito na Seção 2.4, o estimador ortogonal em blocos é uma generalização do estimador ortogonal com três multiplicadores. Partindo-se desta premissa, foi desenvolvido um algoritmo para detecção, identificação e eliminação de erros grosseiros em medidas analógicas, baseado no procedimento descrito na Subseção 2.5.2.

No algoritmo de estimação ortogonal em blocos, as medidas de quantidades analógicas representadas na forma polar são transformadas para a forma retangular, com o intuito de possibilitar a utilização de um estimador linear (ver Seção 2.4). Isso resulta em um processamento em bloco das partes real e imaginária das medidas e na generalização da forma de ponderá-las: ao invés de pesos escalares, passa-se a utilizar um bloco 2×2 como matriz de ponderação. Isto se deve à impossibilidade de se ignorar a correlação entre os componentes das medidas após a conversão para a forma retangular [48, 56].

Conforme descrito na Subseção 2.5.2, durante o processo de estimação ortogonal, ao se processar uma linha da matriz Jacobiana aumentada pelo respectivo componente do vetor Δz_m , a soma ponderada dos quadrados dos resíduos resultante deve ser menor que o correspondente limiar χ_{mqp}^2 , atualizado de acordo com a ordem da medida processada. No caso do estimador ortogonal em blocos, teremos um conjunto de duas linhas sendo conjuntamente processadas. Generalizando o algoritmo tradicional, pode-se dizer que, ao processar o conjunto de duas linhas, caso a soma ponderada dos quadrados dos resíduos apresente valor superior ao valor do limiar χ_{mqp}^2 , há indícios de presença de erros grosseiros.

Da mesma forma que no estimador ortogonal tradicional, é feita uma análise dos resíduos normalizados entre as medidas que precederam o bloco onde tal erro foi detectado. O componente (seja real ou imaginário) cujo valor do resíduo for máximo é então identificado e as linhas correspondentes ao bloco ao qual pertence o componente são eliminadas. Para tal, faz-se uso de uma generalização da metodologia de eliminação de medidas errôneas do método de Givens com três multiplicadores (Subseção 2.5.2), ou seja, reprocessam-se o as linhas correspondentes a tal medida com a matriz de ponderação acima citada, porém agora com valor negativo. O algoritmo de estimação ortogonal em blocos é então reiniciado sem a medida identificada como errônea.

Resultados preliminares considerando esta abordagem mostraram-se bastante satisfatórios e são apresentados detalhadamente no Capítulo

7.

6.6 Arquitetura Proposta para Estimação de Estados Hierárquica em dois Níveis

Tendo em vista o que foi apresentado nas seções 6.4 e 6.5, podemos formular uma arquitetura para estimação de estados hierárquica de dois níveis composta por subestações no nível local e pelo COR no nível hierárquico superior.

No nível local, tem-se o processo de coestimação de estados e topologia responsável por obter as estimativas de fluxos de potência nos extremos das linhas de transmissão, bem como estimar a topologia de cada subestação.

O nível superior, conduzido no COR, processa no primeiro estágio as medidas de fluxo de potência ativa nas linhas de transmissão e os estados estimados no nível local para as barras de fronteira, com o objetivo de determinar as variáveis de coordenação. As estimativas resultantes são então tratadas como informações *a priori* pelo estimador de segundo estágio, que em seguida processa as medidas provenientes de PMUs. O resultado final da estimação é então aplicado aos estados estimados localmente, sintetizando desta forma as estimativas para todo o sistema.

É importante ressaltar que após a finalização de cada etapa de estimação é realizada uma análise de erros grosseiros específica para cada estimador.

A arquitetura proposta é ilustrada na Figura 12.

6.7 Exemplo Ilustrativo com Sistema-teste de 4 Barras

Para verificar a viabilidade desta proposta de pesquisa, desenvolveu-se um sistema-teste, cuja topologia e plano de medição são apresentados na Figura 13.

O sistema-teste contempla diferentes arranjos de subestação (SE), ou seja, subestações em anel, disjuntor e meio e disjuntor duplo (“double breaker”) [57].

Como ponto de partida para gerar o conjunto de medidas dos planos de medição a serem utilizados, executa-se um fluxo de potência no nível de seção de barra baseado no método de Newton-Raphson desacoplado rápido [58], cujos resultados para uma condição de operação

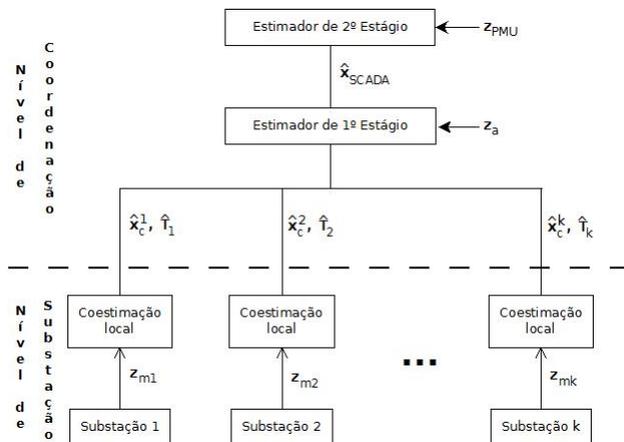


Figura 12 – Arquitetura proposta para estimação de estados hierárquica em dois níveis.

selecionada são apresentados nas Tabelas 1, 2 e 3.

A Tabela 1 apresenta os resultados das grandezas nodais para todas as barras do sistema. Na Tabela 2 constam os fluxos de potência obtidos para os ramos convencionais, bem como as impedâncias das linhas de transmissão. Por fim, os fluxos de potência através de ramos chaveáveis são mostrados na Tabela 3.

Após obter os resultados do estudo de fluxo de potência e incluir pequenos erros aleatórios para o sistema como um todo, inicia-se o processo de coestimação de estados e topologia para cada subestação do sistema. Para tal, os dados referentes a cada subestação são tratados localmente, para geração dos conjuntos de medidas locais. Apenas por simplicidade e sem perda de generalidade, os resultados do nível local são apresentados apenas para a subestação 1.

Ao inicializar o algoritmo de CET, será suposto que a topologia para todas as subestações do sistema é desconhecida pelo operador, adotando-se então a hipótese inicial de que todos os disjuntores se encontram abertos. Esta consideração, frequentemente adotada neste trabalho quando não há informação confiável quanto aos status dos disjuntores, é referida como perfil plano (*flat start*) de topologia. Entretanto, é importante destacar que, na prática, a inicialização da topologia seria baseada na saída do configurador de redes, conforme descrito na Subseção 2.2.1.

A cada iteração do algoritmo de CET, a topologia é atualizada

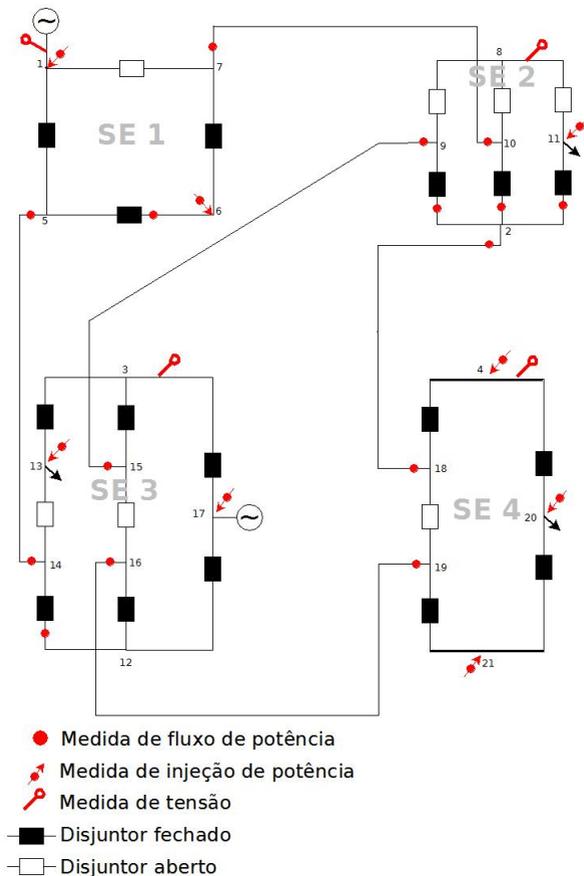


Figura 13 – Sistema-teste criado para validação da arquitetura proposta.

até que não haja mais alterações nos status dos disjuntores. O laço interno deste algoritmo, ou seja, o MPDPI especializado desenvolvido para este problema, converge para todas as subestações em não mais do que 12 iterações. A Tabela 4 apresenta a evolução do algoritmo de CET. Nela são apresentados os status dos disjuntores (sendo “0” para disjuntor aberto e “1” para fechado) ao longo do processo iterativo, bem como a evolução do valor da função multi-objetivo até a convergência para a SE 1.

Pode-se observar na Tabela 4 que o valor da função multi-

Tabela 1 – Resultados obtidos para as grandezas nodais do sistema-teste.

Resultados das grandezas nodais					
Barra	Tipo	Tensão (pu)	Ângulo (graus)	P (MW)	Q (Mvar)
1	2	1,000	0,000	185,103	7,567
2	0	1,000	-16,822	-0,015	0,000
3	0	1,000	-12,968	0,000	0,000
4	0	0,957	-24,038	0,000	0,000
5	0	1,000	0,000	-0,004	0,002
6	0	1,000	0,000	0,000	0,000
7	0	1,000	0,000	-0,010	0,002
8	2	1,000	0,000	0,000	0,000
9	0	1,000	-16,822	-0,002	0,000
10	0	1,000	-16,822	0,016	0,002
11	0	1,000	-16,822	-60,000	25,000
12	0	1,000	-12,968	0,000	0,000
13	0	1,000	-12,968	-140,900	70,000
14	0	1,000	-12,968	0,017	0,005
15	0	1,000	-12,968	0,002	0,000
16	0	1,000	-12,968	-0,030	0,002
17	1	1,000	-12,968	118,900	-31,423
18	0	0,957	-24,038	0,009	0,004
19	0	0,957	-24,038	0,027	0,008
20	0	0,957	-24,038	-98,000	-15,000
21	0	0,957	-24,038	0,000	0,000

Tabela 2 – Resultados de fluxo de potência nos ramos convencionais para o sistema-teste.

Dados de linha e fluxo de potência nos ramos convencionais			
Linha	$r_{ij} + jx_{ij}$ (pu)	b_{shunt} (pu)	$P_{ij} + jQ_{ij}$ (MW) (MVar)
7 – 10	0,0250 + j 0,4000	0,0	72,758 + j 6,053
5 – 14	0,0200 + j 0,2000	0,0	112,355 + j 1,517
9 – 15	0,1000 + j 0,5000	0,0	-12,828 + j 3,099
2 – 18	0,0100 + j 0,5000	0,06	24,254 + j 6,635
16 – 19	0,0170 + j 0,2500	0,04	74,827 + j 17,078

objetivo é reduzido drasticamente de seu valor inicial até a convergência do algoritmo de CET e que esta convergência ocorre em apenas duas

Tabela 3 – Resultados de fluxo de potência nos ramos chaveáveis para o sistema-teste.

Fluxo de potência nos ramos chaveáveis		
Subestação	Ramo	$P_{ij} + jQ_{ij}$ (MW) (Mvar)
SE 1	1 – 5	185,113 + j 7,567
	1 – 7	0,000 + j 0,000
	5 – 6	72,758 + j 6,052
	6 – 7	72,758 + j 6,052
SE 2	2 – 9	-12,828 + j 3,099
	2 – 10	-71,426 + j 15,266
	2 – 11	60,000 + j -25,000
	8 – 9	0,000 + j 0,000
	8 – 10	0,000 + j 0,000
	8 – 11	0,000 + j 0,000
SE 3	3 – 13	140,900 + j -70,000
	3 – 15	13,002 + j -2,229
	3 – 17	-153,902 + j 72,229
	13 – 14	0,000 + j 0,000
	15 – 16	0,000 + j 0,000
	12 – 14	-109,831 + j 23,730
	12 – 16	74,829 + j 17,076
	12 – 17	35,002 + j -40,806
SE 4	4 – 18	-24,186 + j -8,989
	4 – 20	24,186 + j 8,989
	18 – 19	0,000 + j 0,000
	19 – 21	73,814 + j 6,011
	20 – 21	-73,814 + j -6,011

Tabela 4 – Resultados da Coestimação de Estados & Topologia para a SE 1

Ramos chaveáveis	B1 (1-5)	B2 (1-7)	B3 (5-6)	B4 (6-7)	
Topologia Esperada	1	0	1	1	$J(\mathbf{r}_m, \hat{\mathbf{x}})$
Topologia Inicial	0	0	0	0	10104,2951
Iteração 1	1	0	1	1	155,2004
Iteração 2	1	0	1	1	0,4430

iterações. Tal resultado é obtido por todas as subestações durante o processo local de estimação.

Quando a subestação que demora mais tempo para realizar o processo local de CET encerra sua estimação (para este sistema-teste esta é a SE 3), dá-se início à estimação de estados no nível hierárquico superior.

Conforme descrito nas seções anteriores deste capítulo, o estimador executado no COR é composto de dois estágios: um para processar as medidas provenientes do SCADA, baseado versão do método ortogonal de Givens com 3 multiplicadores e fundamentado na proposta de estimação hierárquica apresentada em [3]; e um estimador com capacidade de processamento de medidas de tensão e corrente provenientes de PMUs, fundamentado no estimador proposto em [48].

As Tabelas 5, 6 e 7 apresentam os resultados obtidos para a estimação no nível hierárquico superior para três casos distintos: Caso 1 representa os resultados obtidos para a proposta de estimação hierárquica inicial, ou seja, utilizando apenas medidas obtidas do SCADA e estruturada como a proposta apresentada em [3]; Caso 2 e Caso 3 são realizados utilizando informações provenientes de PMUs, com estimador no COR em dois estágios, sendo que para o Caso 2 há PMUs instaladas nas barras 1 e 3 (pertencentes às SEs 1 e 3, respectivamente) e para o Caso 3 há PMUs instaladas em todas as SEs do sistema.

Tabela 5 – Resultados da Estimação de Estados para as Barras de Referência de cada SE.

SE	Caso 1		Caso 2		Caso 3	
	Tensão (pu)	Ângulo (graus)	Tensão (pu)	Ângulo (graus)	Tensão (pu)	Ângulo (graus)
1	0,998	0,000	0,998	-0,0000	0,999	-0,0000
2	1,000	-16,844	1,008	-16,8110	1,009	-16,8068
3	1,000	-13,003	0,998	-12,9566	0,999	-12,9431
4	0,959	-24,078	0,955	-24,0876	0,956	-24,0138

É importante ressaltar que o estimador de primeiro estágio do COR é um estimador não linear, que processa as medidas de fluxo de potência ativa nas linhas de transmissão que conectam as SEs, além das estimativas obtidas pelos coestimadores locais para as barras de fronteira, obtendo a convergência para o problema em questão em não mais que 4 iterações. Já o estimador de segundo estágio processa as medidas provenientes de PMUs, além de utilizar as estimativas obtidas pelo estimador de primeiro estágio como informações *a priori*. Este estimador é linear, uma vez que transforma as medidas originalmente

Tabela 6 – Resultados da Estimação de Injeção de Potência de cada SE.

SE	Caso 1		Caso 2		Caso 3	
	P (MW)	Q (Mvar)	P (MW)	Q (Mvar)	P (MW)	Q (Mvar)
1	184,835	5,937	184,820	5,320	185,053	5,330
2	-59,718	25,165	-59,560	30,947	-59,928	31,001
3	-21,785	39,532	-21,660	36,910	-21,967	36,920
4	-98,176	-13,998	-98,477	-16,676	-98,041	-16,906

Tabela 7 – Resultados da Estimação de Estados nas Linhas de Transmissão

Linha	Caso 1		Caso 2		Caso 3	
	$P_{ij} + jQ_{ij}$ (MW) (Mvar)					
7 - 10	72,599 + j 5,567	72,961 + j 3,850	73,088 + j 3,859			
5 - 14	112,236 + j 0,370	111,859 + j 1,470	111,965 + j 1,470			
9 - 15	-12,789 + j 3,040	-12,555 + j 4,840	-12,610 + j 4,858			
2 - 18	24,333 + j 6,307	24,617 + j 8,528	24,429 + j 8,541			
16 - 19	74,934 + j 16,573	74,954 + j 17,209	74,697 + j 17,235			

expressas em coordenadas polares para coordenadas retangulares.

Pode-se observar das Tabelas 5, 6 e 7 que os resultados finais obtidos para os três casos apresentados são bastante aderentes com o caso ideal (fluxo de potência), o que ilustra o nível de exatidão e a aplicabilidade da metodologia proposta nesta tese.

6.8 Conclusões

Este capítulo apresentou a proposta de arquitetura para estimação de estados hierárquica em dois níveis contemplada neste trabalho de doutorado. Esta proposta vai ao encontro à crescente importância das subestações no cenário atual da modelagem em tempo real das redes elétricas, bem como à necessidade de se reduzir de maneira eficaz o número de informações transmitidas entre subestações e centros de operação.

A proposta confere uma maior autonomia à modelagem de su-

bestações no que diz respeito ao processamento de informações a elas pertinentes, sendo transmitidas ao COR apenas as informações necessárias para o processamento central da rede conexa.

No Capítulo 7 são apresentados resultados obtidos para sistemas mais realísticos modelados no nível de seção de barra e análises comparativas com a estimação centralizada no intuito de alinhar argumentos adicionais em favor da viabilidade e aplicabilidade da proposta aqui descrita.

7 RESULTADOS OBTIDOS

7.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos no desenvolvimento deste trabalho.

Dois sistemas-teste do IEEE, de 9 e de 14 barras, modelados no nível de seção de barra, são utilizados para avaliar as metodologias propostas. O sistema-teste IEEE 9 barras foi modelado de forma a abranger os diferentes arranjos de subestação mais comuns, conforme descrito em [57]. Já o sistema-teste IEEE 14 barras expandido é o mesmo apresentado em [59]. Para os estudos referentes à análise preliminar de erros grosseiros, será utilizado o mesmo sistema-teste de 4 barras apresentado na Seção 6.7.

A apresentação dos resultados será dividida em três partes para os dois sistemas-teste do IEEE. Primeiramente são apresentados os resultados obtidos considerando o sistema elétrico apenas com medidas SCADA, incluindo medidas internas às subestações. Em seguida, são descritos resultados de simulações que também consideram, além de medidas convencionais, a presença de medidas fasoriais de tensão provenientes de PMUs instaladas nas subestações com geração e no sistema como um todo. Porém, tais medidas serão apenas consideradas como informação *a priori* do estimador ortogonal convencional instalado no COR, o que corresponde à estratégia E1FC descrita na Subseção 6.5.1. Por fim, as informações provenientes de PMUs são processadas em um módulo adicional utilizando-se o método de Givens em blocos, conforme a arquitetura E2CB da Subseção 6.5.1, a qual se constitui na proposta principal deste trabalho de doutorado para o estimador de nível hierárquico superior.

As seções finais deste capítulo são dedicadas à apresentação e discussão de resultados preliminares obtidos para análise de erros grosseiros nas três etapas de estimação, obtidos para o sistema-teste de 4 barras.

O programa computacional utilizado nas simulações descritas neste capítulo foi desenvolvido em MATLAB, levando-se em consideração uma modelagem não linear completa para a rede elétrica. No processo de avaliação de desempenho dos métodos propostos, os resul-

tados obtidos com a arquitetura descentralizada de estimação proposta no Capítulo 6 são comparados com os da estimação ortogonal centralizada equivalente para o caso em questão. Para tal, nos casos em que há apenas medidas SCADA, ou ainda os que consideram medidas PMU como informação *a priori*, utiliza-se um estimador ortogonal convencional de um estágio, baseado no método de Givens com três multiplicadores, o qual será referido como E1C. Já para os casos em que medidas de tensão e de corrente provenientes de PMUs são utilizadas, o estimador centralizado será o de dois estágios proposto em [48] e [56], designado neste capítulo como E2C.

É importante destacar que o tamanho dos sistemas-teste utilizados neste trabalho não afetam a aplicabilidade do algoritmo proposto a sistemas de maior porte. Isto se deve ao fato de que a coestimação de estados e topologia pode ser aplicada a qualquer número de subestações individuais, sendo que a estimação no nível de coordenação será inicializada após a subestação que levar mais tempo para completar o processo de estimação local finalizar este procedimento. Quanto aos estimadores residentes no COR aqui propostos, o primeiro é um estimador ortogonal baseado no método de Givens com três multiplicadores, já bastante difundido na literatura pertinente, e que constitui o núcleo da estratégia E1FC. Já o estimador de segundo estágio, baseado no método de Givens em blocos, dá suporte à estratégia E2CB, e se mostrou bastante robusto para aplicação a sistemas de grande porte, conforme apresentado em [48].

7.2 Metodologia de Simulação

A partir de protótipo de aplicativo computacional elaborado como parte de pesquisa correlacionada em [19], foi desenvolvido um programa que permite a coestimação individual em cada subestação, fornecendo como resultado para o nível hierárquico superior estimativas dos estados nas barras de fronteira, além das defasagens angulares entre as barras de referência de cada subestação e a referência global do sistema.

Com o objetivo de simular o que acontece na prática, considera-se que cada subestação é modelada independentemente. Portanto, cada subestação gerará seu próprio conjunto de dados, cuja simulação é baseada em execuções individuais do fluxo de potência desenvolvido em [58]. Além disso, deve-se definir uma barra (nó) de referência para cada subestação do sistema.

Após a execução do fluxo de potência, cria-se o vetor de medidas ideais para o sistema-teste em questão. Para cada vetor de medidas ideais, aplicam-se erros aleatórios, como forma de simular os erros presentes nos equipamentos de medição, obtendo-se assim o vetor das quantidades medidas. Os erros superpostos têm variâncias diferentes, de acordo com o tipo de medida processada: medidas consideradas provenientes de medidores convencionais tem variância de 1×10^{-2} pu e medidas fasoriais provenientes de PMUs tem variância de 1×10^{-3} pu.

Em seguida, realiza-se a coestimação de estados e topologia para cada subestação. Na prática, a topologia inicial utilizada no processo de CET provavelmente será a oriunda do configurador de rede. Porém, neste trabalho considera-se o pior cenário, ou seja, a topologia de cada subestação é desconhecida, sendo obtida como resultado do processo de coestimação. Para tal, na inicialização do processo de coestimação de estados e topologia considera-se que todos os dispositivos chaveáveis estão abertos, condição esta referida como “*flat start* de topologia”. Além disso, utilizam-se informações *a priori*, cujo tratamento foi apresentado no Capítulo 3. Como resultado da CET local, são gerados os vetores das variáveis a serem encaminhadas ao nível hierárquico superior (o Centro de Operação Regional, COR), ou seja, o vetor com as estimativas dos estados das barras de fronteira, bem como as topologias estimadas para as SEs.

Terminada a etapa de coestimação local, os vetores resultantes deste processo, juntamente com as medidas de fluxo de potência ativo nas linhas de transmissão, são agora processados no COR. Neste estágio são estimados os ângulos de defasagem entre a referência angular de cada subestação e a referência global do sistema, bem como os fluxos através das linhas de transmissão (tratados no primeiro estágio como medidas de injeção nas barras de fronteira). Caso haja medidas provenientes de PMUs, estas poderão ser tratadas de duas formas distintas: como informação *a priori* do estimador ortogonal convencional, onde apenas as medidas fasoriais de tensão são consideradas (estratégia E1FC); ou por um estimador de segundo estágio acoplado à saída do estimador ortogonal do COR, que utiliza o resultado do estimador ortogonal como informação *a priori* e processa medidas fasoriais tanto de tensão como de corrente na forma retangular (estratégia E2CB).

Como estágio final do processo de estimação hierárquica, as respectivas defasagens angulares de cada subestação são adicionadas ao vetor dos ângulos (u_i) estimados localmente, resultando no valor final da estimação hierárquica em dois níveis.

Para validar os métodos propostos nesta pesquisa, foram obti-

dos resultados com o método de estimação ortogonal via método de Givens com três multiplicadores apresentado na Subseção 2.3.1, em um único estágio e de modo centralizado, para fins de comparação com os resultados do método proposto. Por facilidade de referência, esta estratégia convencional é denominada E1C. Já para os casos em que as medidas fasoriais são tratadas separadamente, são utilizados como referência os resultados produzidos pelo estimador centralizado em dois estágios, proposto em [48] e [56], referido como estratégia E2C. Ambos os resultados, da estrutura hierárquica aqui proposta e os das estratégias centralizadas, são apresentados conjuntamente, com o objetivo de facilitar a sua comparação.

É importante ressaltar que todos os resultados apresentados correspondem a médias obtidas a partir de 50 simulações. Cada simulação é caracterizada por um mesmo conjunto de medidas, diferenciadas pelas sementes utilizadas para a geração de números aleatórios. Além disso, são obtidos valores para uma métrica baseada nos erros absolutos de estimação, definida em função das diferenças entre a estimativa e seu valor real (obtido pela aplicação do fluxo de potência). Esta métrica é dada por [60]:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sum_{j=1}^{n_S} |X_{metodo}^k - X_{verdadeiro}^k|}{n_S} = \frac{\sum_{j=1}^{n_S} |X_{erro}^k|}{n_S}$$

onde $\bar{\varepsilon}$ é a métrica, X representa a variável a ser analisada e n_S é o número de simulações realizadas.

As seções a seguir apresentam os principais resultados obtidos durante o trabalho de pesquisa de doutorado.

7.3 Resultados Obtidos para o Sistema IEEE 14 Barras

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos para o sistema-teste IEEE 14 barras expandido no nível de seção de barra [59], ilustrado na Fig. 14.

Observa-se que, das 14 barras, apenas duas (a barra 7 e a 8) não são modeladas no nível de seção de barra. O plano de medição é composto por medidas de fluxo de potência nos dois extremos das linhas de transmissão, medidas de injeção de potência nas barras, indicadas por setas, medida de magnitude da tensão nas barras de referência de cada SE e pelo menos uma medida de fluxo de potência ativa e reativa em ramo chaveável relativo a disjuntor fechado em cada SE.

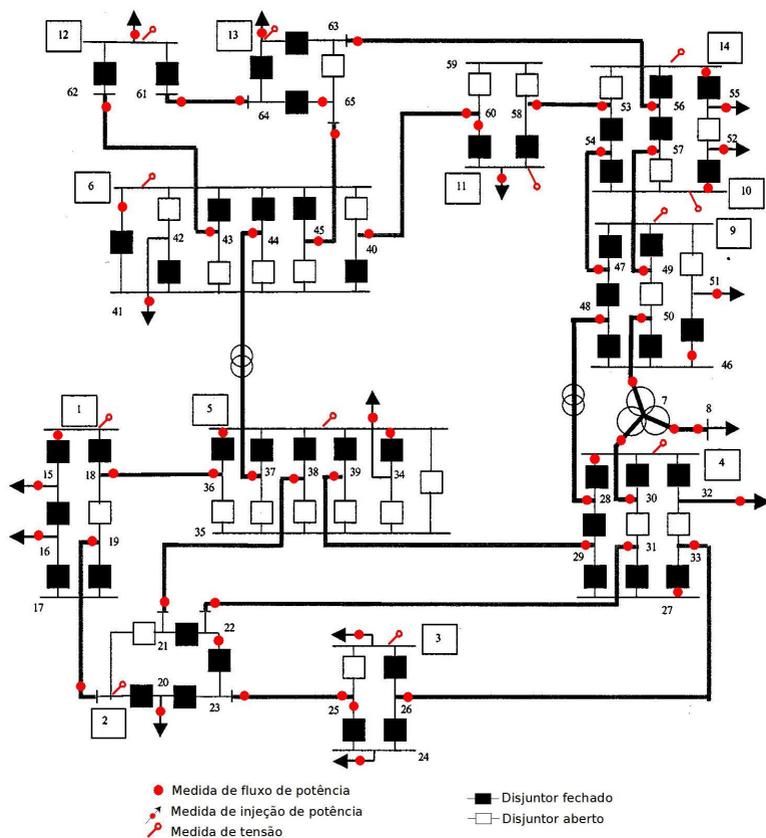


Figura 14 – Sistema-teste IEEE 14 barras expandido no nível de seção de barra.

7.3.1 Coestimação de estados e topologia no nível local

O processo de CET é realizado em cada SE individualmente e os resultados obtidos são encaminhados para coordenação no COR. Este processo não é influenciado pela presença de PMUs no sistema, uma vez que estas medidas afetam diretamente a estimação no nível de coordenação. Por este motivo, a CET em cada SE ocorre da mesma forma para os diferentes casos apresentados nas subseções a seguir.

Por uma questão de simplicidade, porém sem perda de generali-

dade, são apresentados detalhadamente apenas os resultados da CET para a SE 10/14.

A Tabela 8 apresenta a evolução da topologia durante a CET para a SE 10/14. Os status dos disjuntores que diferem das posições corretas são representados em *itálico*. Mudanças nos status durante o processo iterativo estão destacadas em **negrito**. Na tabela, 0 e 1 representam disjuntor aberto e fechado, respectivamente. Assume-se inicialmente que a topologia é inteiramente desconhecida, conforme citado anteriormente, partindo-se o processo de CET com todos os disjuntores abertos. Após a primeira iteração, o coestimador modifica a topologia presumida inicial (dispositivos chaveáveis abertos) para uma topologia estimada. Com isso, obtêm-se o resultado apresentado na terceira linha, “Iteração 1”, da Tabela 8 para a subestação 1.

Ao final da segunda iteração, o coestimador de estados e topologia obtêm a convergência dos resultados. Da mesma forma que na primeira iteração, é feita uma estimação da topologia, onde são comparados os status estimados com os presumidos (estimados na iteração anterior). Esse resultado final consta na linha definida “Iteração 2” da Tabela 8. Percebe-se que a convergência final do algoritmo é obtida em apenas 2 iterações do laço externo. Para as demais SEs, o algoritmo de CET não levou mais do que 3 iterações para atingir a convergência. Além disso, o algoritmo PDPI não exigiu mais de 11 iterações em nenhum caso.

Tabela 8 – Evolução da Topologia da Rede durante o processo iterativo para os casos A1 e A2.

Ramos	10-52	10-54	10-57	14-53	14-55	14-56
Topologia Correta	1	1	0	0	1	1
Topologia Inicial	<i>0</i>	<i>0</i>	0	0	<i>0</i>	<i>0</i>
Iteração 1	1	1	0	0	1	1
Iteração 2	1	1	0	0	1	1
Ramos	52-55	53-54	56-57			
Topologia Correta	0	1	1			
Topologia Inicial	0	<i>0</i>	<i>0</i>			
Iteração 1	0	1	1			
Iteração 2	0	1	1			

O valor final médio da função objetivo para esta subestação é:

$$J(\mathbf{r}_m, \hat{\mathbf{x}})_{final} = J_{mqp} + J_{mvap} = 4,03 + 1,90 \times 10^{-05} = 4,03$$

Os resultados para os fluxos de potência ativa e reativa através dos dispositivos chaveáveis estimados para todas as subestações podem ser vistos na terceira e quarta colunas da Tabela 9. Estas colunas apresentam os resultados após o processo de coestimização para cada subestação do sistema, sendo calculados como a média de 50 simulações, conforme já mencionado.

Tabela 9 – Resultados obtidos considerando-se apenas medidas convencionais: coestimador de estados e topologia (nível local).

Fluxo de potência ativa através dos dispositivos chaveáveis					
SE	Ramos	CET local		Fluxo de Potência	
		P_{ij} (pu)	Q_{ij} (pu)	P_{ij} (pu)	Q_{ij} (pu)
1	1 – 15	-0,7637	+0,0069	-0,7636	+0,0032
	1 – 18	+0,7644	-0,0091	+0,7636	-0,0032
	15 – 16	+0,3983	-0,0940	+0,3997	-0,0922
	16 – 17	+1,5612	-0,1912	+1,5617	-0,1875
	17 – 19	+1,5612	-0,1912	+1,5617	-0,1875
	18 – 19	+0,0000	-0,0001	+0,0000	+0,0000
2	2 – 20	+1,5184	-0,2842	+1,5191	-0,2883
	2 – 21	+0,0000	+0,0001	+0,0000	+0,0000
	20 – 23	+1,7030	-0,0526	+1,7021	-0,0489
	21 – 22	-0,4172	+0,0480	-0,4165	+0,0490
	22 – 23	-0,9757	+0,0967	-0,9751	+0,0970
3	3 – 25	-0,0001	-0,0018	+0,0000	+0,0000
	3 – 26	-0,4709	+0,0150	-0,4710	+0,0157
	24 – 25	-0,7043	+0,0222	-0,7041	+0,0253
	24 – 26	+0,2332	-0,0102	+0,2331	-0,0096
4	4 – 28	-0,7537	+0,1250	-0,7537	+0,1263
	4 – 30	+0,2755	-0,0870	+0,2757	-0,0873
	4 – 32	+0,4786	-0,0384	+0,4780	-0,0390
	28 – 29	-0,9079	+0,1232	-0,9090	+0,1239
	30 – 31	-0,0001	-0,0010	+0,0000	+0,0000
	32 – 33	-0,0001	-0,0004	+0,0000	+0,0000
	27 – 29	+0,3000	-0,0763	+0,3003	-0,0773
	27 – 31	-0,5417	+0,0785	-0,5419	+0,0804
	27 – 33	+0,2417	-0,0022	+0,2416	-0,0032
5	5 – 34	+0,0763	+0,0180	+0,0760	+0,0160
	5 – 35	+0,0000	+0,0000	+0,0000	+0,0000
	5 – 36	-0,7357	+0,0858	-0,7356	+0,0921
	5 – 37	+0,4517	-0,1330	+0,4535	-0,1346
	5 – 38	-0,4072	+0,0551	-0,4074	+0,0582

Continua na próxima página

Tabela 9 – Continuação da página anterior

Fluxo de potência ativa através dos dispositivos chaveáveis					
SE	Ramos	CET local		Fluxo de Potência	
		P_{ij} (pu)	Q_{ij} (pu)	P_{ij} (pu)	Q_{ij} (pu)
5	5 – 39	+0,6143	-0,0292	+0,6135	-0,0317
	34 – 35	+0,0000	-0,0000	+0,0000	+0,0000
	35 – 36	-0,0000	-0,0000	+0,0000	+0,0000
	35 – 37	+0,0000	+0,0000	+0,0000	+0,0000
	35 – 38	+0,0000	-0,0000	+0,0000	+0,0000
	35 – 39	-0,0000	+0,0001	+0,0000	+0,0000
6	6 – 40	+0,0000	-0,0000	+0,0000	+0,0000
	6 – 41	+0,1912	-0,3251	+0,1913	-0,3251
	6 – 42	-0,0002	+0,0000	+0,0000	+0,0000
	6 – 43	+0,0806	+0,0331	+0,0804	+0,0330
	6 – 44	-0,4540	+0,1864	-0,4535	+0,1876
	6 – 45	+0,1818	+0,1048	+0,1817	+0,1044
	40 – 41	-0,0796	-0,0973	-0,0793	-0,0980
	41 – 42	+0,1118	-0,4226	+0,1120	-0,4231
	41 – 43	-0,0002	+0,0002	+0,0000	+0,0000
	41 – 44	-0,0000	+0,0001	+0,0000	+0,0000
41 – 45	-0,0000	-0,0000	+0,0000	+0,0000	
9	9 – 47	-0,0877	+0,0032	-0,0884	+0,0024
	9 – 49	+0,0883	-0,0024	+0,0884	-0,0024
	9 – 51	+0,0003	+0,0001	+0,0000	+0,0000
	47 – 48	-0,1365	+0,0198	-0,1360	+0,0201
	49 – 50	-0,0002	+0,0002	+0,0000	+0,0000
	46 – 48	-0,0187	-0,0091	-0,0193	-0,0097
	46 – 50	-0,2759	-0,1552	-0,2757	-0,1563
	46 – 51	+0,2946	+0,1643	+0,2950	+0,1660
10 / 14	10 – 52	+0,0893	+0,0580	+0,0900	+0,0580
	10 – 57	+0,0002	+0,0001	+0,0000	+0,0000
	10 – 54	-0,0891	-0,0581	-0,0900	-0,0580
	53 – 54	+0,0428	+0,0762	+0,0424	+0,0759
	56 – 57	-0,0864	+0,0054	-0,0874	+0,0044
	52 – 55	+0,0001	-0,0000	+0,0000	+0,0000
	14 – 53	+0,0003	-0,0002	+0,0000	+0,0000
	14 – 55	+0,1493	+0,0502	+0,1490	+0,0500
14 – 56	-0,1496	-0,0501	-0,1490	-0,0500	
11	11 – 58	+0,0425	+0,0771	+0,0430	+0,0773
	11 – 60	-0,0779	-0,0954	-0,0780	-0,0953
	58 – 59	+0,0000	-0,0000	+0,0000	+0,0000
	59 – 60	+0,0000	-0,0000	+0,0000	+0,0000
12	12 – 61	+0,0175	+0,0132	+0,0186	+0,0153

Continua na próxima página

Tabela 9 – Continuação da página anterior

Fluxo de potência ativa através dos dispositivos chaveáveis					
SE	Ramos	CET local		Fluxo de Potência	
		P_{ij} (pu)	Q_{ij} (pu)	P_{ij} (pu)	Q_{ij} (pu)
12	12 – 62	-0,0781	-0,0313	-0,0796	-0,0313
13	13 – 63	+0,0630	+0,0562	+0,0627	+0,0566
	13 – 64	-0,1984	-0,1147	-0,1977	-0,1146
	63 – 65	-0,0000	-0,0001	+0,0000	+0,0000
	64 – 65	-0,1792	-0,0997	-0,1792	-0,0994

Após o processo de coestimação em cada subestação, são enviados para o estimador do COR as informações referentes à topologia da rede (linhas de transmissão que conectam as subestações) e as estimativas dos estados das barras de fronteira. Partindo-se do princípio que não há qualquer outra informação a respeito da defasagem angular entre as barras de referência das subestações e a barra de referência global do sistema (que, para este sistema-teste, é considerada como a barra 1, sem qualquer perda de generalidade) o vetor das defasagens angulares é composto inicialmente de zeros, ou seja:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{inicial} &= [u_2 \quad u_3 \quad u_4 \quad u_5 \quad u_6 \quad u_9 \quad u_{10/14} \quad u_{11} \quad u_{12} \quad u_{13}] \\ &= [0 \quad 0 \quad 0] \end{aligned}$$

Da equação do vetor de coordenação angular $\mathbf{u}_{inicial}$ acima, percebe-se que ele é composto por um zero a mais do que o número de SEs do sistema. Isso ocorre porque a modelagem local da SE 10/14 revela que esta é na realidade composta por dois nós elétricos na modelagem barra-ramo, e não apenas um, como ocorre com as demais subestações.

A passagem da estimação local para a estimação de coordenação no COR é inicializada assim que a subestação que levar mais tempo para concluir o processo de CET local finalizar. O processo de CET consumiu 0,49369 segundos em média para ser completado para a SE 10/14. A SE que exigiu maior tempo para concluir seu processo de CET foi a SE 5, com tempo médio de processamento de 0,52372 segundos. Nas subseções a seguir são apresentados os resultados obtidos para os diferentes cenários possíveis para o nível hierárquico superior, ou seja, presença apenas de medidas SCADA, PMUs instaladas em algumas SEs e PMUs instaladas em todas as SEs do sistema.

7.3.2 Coordenação das Estimativas Locais Considerando-se Apenas Medidas Convencionais

Neste primeiro caso, considera-se a proposta inicial de estimação hierárquica, na qual a estimação de estados hierárquica em dois níveis considera apenas medidas provenientes do sistema SCADA. Conseqüentemente, o processo de estimação de estados no nível de coordenação se restringe ao estimador ortogonal baseado no método de Givens com três multiplicadores, ou seja, à estratégia E1FC da Subsecção 6.5.1 considerando que não há informação *a priori* disponível. Este estimador E1FC fornece estimativas para o vetor de coordenação angular $\hat{\mathbf{u}}$, considerando as estimativas dos estados obtidas no nível local para as barras de fronteira de cada SE. Para tal, o estimador E1FC desconsiderando informações *a priori* processa as medidas de fluxo de potência nas linhas de transmissão que conectam as subestações. Valores representativos para estas medidas são apresentados na Tabela 10 (observe que, como são realizadas 50 simulações distintas, com diferentes erros de medição, os resultados da tabela dizem respeito a uma particular amostra das medidas de fluxo de potência).

Tabela 10 – Medidas de fluxo de potência nas linhas de transmissão que conectam as SEs.

Linha	19 – 2	2 – 19	18 – 36	36 – 18	23 – 25
P_{ij} (pu)	1,563	-1,516	0,77018	-0,73578	0,72014
Linha	25 – 23	22 – 31	31 – 22	21 – 38	38 – 21
P_{ij} (pu)	-0,70481	0,54944	-0,54368	0,42465	-0,40346
Linha	26 – 33	33 – 26	29 – 39	39 – 29	30 – 7
P_{ij} (pu)	-0,23803	0,23781	-0,60442	0,60551	0,28924
Linha	7 – 30	28 – 48	48 – 28	37 – 44	44 – 37
P_{ij} (pu)	-0,27906	0,16702	-0,16535	0,44062	-0,45132
Linha	40 – 60	60 – 40	43 – 62	62 – 43	45 – 65
P_{ij} (pu)	0,083988	-0,087397	0,090869	-0,084354	0,17205
Linha	65 – 45	7 – 8	8 – 7	7 – 50	50 – 7
P_{ij} (pu)	-0,17353	-0,010731	-0,0047421	0,28317	-0,27453
Linha	47 – 54	54 – 47	49 – 57	57 – 49	53 – 58
P_{ij} (pu)	0,053844	-0,046032	0,085029	-0,095356	-0,044963
Linha	58 – 53	61 – 64	64 – 61	63 – 56	56 – 63
P_{ij} (pu)	0,043236	0,010058	-0,022236	0,060529	-0,048972

O processo de estimação de estados no COR fornece as seguintes defasagens angulares, em graus, entre as referências de cada subestação e a referência global do sistema:

$$\hat{\mathbf{u}} = \begin{bmatrix} -4,918 & -12,644 & -10,220 & -8,808 & -14,774 & \cdots \\ \cdots & -14,945 & -15,224 & -16,257 & -15,068 & \cdots \\ \cdots & -15,596 & -15,522 & & & \end{bmatrix}$$

Além das defasagens angulares das SEs, são igualmente estimados os estados das barras que não foram modeladas no nível de seção de barra, obtendo-se os ângulos:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = [\theta_7 \quad \theta_8] = [-13,319 \quad -13,324]$$

Como consequência, o estimador localizado no COR disponibiliza as estimativas para os fluxos através das linhas de transmissão do sistema. As métricas das estimativas dos fluxos de potência ativa e reativa, computadas com relação aos valores exatos (obtidos pelo fluxo de potência), tanto para o estimador E1FC quanto para o estimador centralizado convencional E1C podem ser vistas na Fig. 15. Desta figura, chega-se à conclusão que a estrutura de estimação hierárquica proposta é válida, já que fornece resultados bastante aderentes aos produzidos por um estimador centralizado.

Para finalizar o processo de estimação de estados em dois níveis proposto, as estimativas das defasagens angulares entre referências locais e a referência global são levadas em conta para cada subestação. Isto é feito adicionando-se o valor dos ângulos inicialmente estimados no processo de coestimação de estados e topologia aos valores estimados de defasagem angular das barras de referência para cada subsistema, obtidos no nível hierárquico superior.

Os resultados obtidos neste processo de re-alimentação do estimador de nível hierárquico superior para o nível hierárquico local, ou seja, a obtenção da estimação de estados do sistema elétrico como um todo, são sumarizados nas primeiras linhas da Tabela 11, onde são apresentados os valores das tensões nodais estimadas para as barras de cada subestação, além das respectivas injeções de potência ativa e reativa. Corroborando as conclusões apresentadas em [3], observa-se que as injeções de potência localmente estimadas pouco diferem dos valores finais, não havendo portanto a necessidade de re-estimá-las.

Além das estimativas para as SEs, o nível de coordenação também estima os estados das barras que não foram modeladas no nível

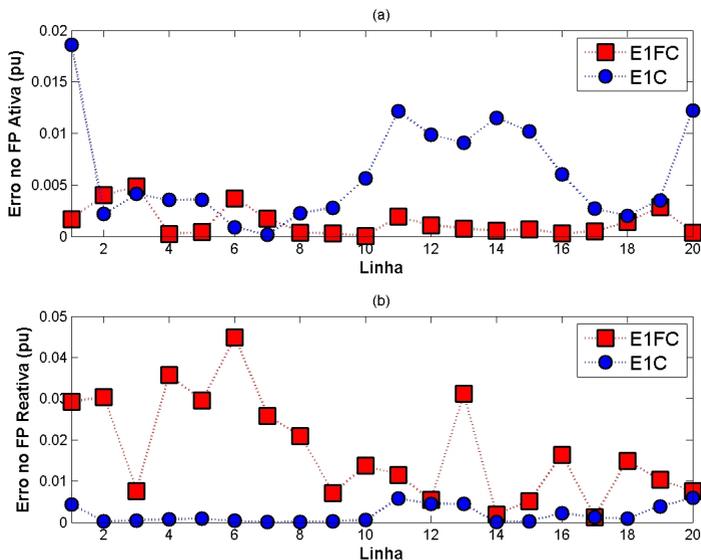


Figura 15 – Métrica dos erros nos fluxos de potência ativa (a) e reativa (b) nas linhas de transmissão para medidas convencionais para o sistema-teste IEEE 14.

de seção de barra. Sendo assim, os resultados para as barras 7 e 8 são fornecidos ao final da Tabela 11.

7.3.3 Resultados Obtidos Considerando-se a Inclusão de Medidas PMU de Tensão como informação *a priori* ao Sistema

A penetração cada vez maior de medidas fasoriais em sistemas elétricos de potência torna importante a inclusão de tais informações no processo de coestimação descentralizada, que é objeto desta proposta de pesquisa. Para tal, são adicionadas medidas fasoriais de tensão em algumas barras do sistema da Figura 14, sendo que as subestações às quais estas barras pertencem possuem algum tipo de geração. Posteriormente será considerada a total disponibilidade de PMUs no sistema-teste em questão. Enfatiza-se que nesta subseção apenas medidas fasoriais de tensão são consideradas.

Da mesma forma como foi realizada a simulação para o caso anterior, parte-se do pressuposto que não se tem conhecimento a respeito da topologia das subestações para a realização do processo de CET. Com isso, tem-se que os dispositivos chaveáveis estão abertos no início de todos os processos de coestimação.

Como resultado desta primeira etapa de estimação hierárquica em dois níveis, obtêm-se a topologia das subestações, bem como seus estados estimados.

A presença de medidas fasoriais de tensão em algumas barras do sistema faz com que informações extras com relação à defasagem angular (com respeito à referência global do sistema) das barras nas quais PMUs estão instaladas tornem-se disponíveis.

As informações relativas às defasagens angulares são processadas como informação a priori do estimador E1FC definido na Subsecção 6.5.1. Além disso, as informações de fluxos nas linhas de transmissão (que são medidas nos dois extremos das linhas) são utilizadas por este estimador de nível hierárquico superior localizado no COR. Esta abordagem mantém a proposta de estimação de estados hierárquica seguindo a metodologia proposta por Lo [3], segundo a qual apenas os ângulos de coordenação são estimados no nível superior.

Como resultado, obtêm-se novamente a estimação de estados global do sistema, bem como a estimativa dos fluxos de potência nas linhas de transmissão. Para analisarmos melhor o impacto da presença de PMUs no sistema, dois casos serão considerados: o primeiro diz respeito a instalação de medidores fasoriais de tensão apenas nas barras de geração; o segundo considera que a disseminação das PMUs é completa, tendo portanto uma PMU instalada em cada SE do sistema como um todo. Estes casos são apresentados a seguir.

7.3.3.1 Medidas PMU nas Barras 1, 2, 3, 6 e 8

Neste cenário, considera-se que PMUs são instaladas apenas nas SEs onde há algum tipo de geração. Com isso, medidas fasoriais de tensão estão disponíveis nas barras de referência de cinco subestações. Por uma questão de praticidade e sem perda de generalidade, as barras de referência das subestação também correspondem ao número atribuído à SE em questão, que corresponde também ao número da barra na modelagem barra-ramo da rede elétrica. Sendo assim, as PMUs instaladas estão presentes nas barras 1, 2, 3, 6 e 8 do sistema da Fig. 14.

Tabela 11 – Resultados obtidos considerando-se apenas medidas convencionais após re-alimentação dos dados para o estimador local e para as barras 7 e 8.

Resultados das grandezas nas Subestações									
Resultados do EIFC					Resultados do Fluxo de Potência				
SE	Tensão (pu)	Ângulo (graus)	P (MW)	Q (Mvar)	Tensão (pu)	Ângulo (graus)	P (MW)	Q (Mvar)	
1	1,063	0	232,298	-15,979	1,060	0,000	232,481	-19,079	
2	1,046	-4,918	18,705	22,711	1,045	-4,959	18,313	23,899	
3	1,013	-12,644	-94,258	7,153	1,010	-12,642	-94,191	3,113	
4	1,02	-10,22	-47,943	-10,5	1,025	-10,355	-47,803	3,920	
5	1,028	-8,808	-7,124	-7,941	1,031	-8,932	-7,582	-1,560	
6	1,07	-14,774	-10,976	48,731	1,070	-14,877	-11,197	42,289	
9	1,026	-14,945	-29,567	-17,761	1,027	-15,062	-29,493	-16,590	
10/	1,028	-15,224	-8,772	-2,354	1,027	-15,311	-8,998	-5,801	
14	1,016	-16,257	-14,809	-4,203	1,017	-16,389	-14,897	-5,001	
11	1,043	-15,068	-3,694	-4,159	1,045	-15,209	-3,500	-1,800	
12	1,052	-15,596	-5,869	-0,999	1,053	-15,717	-6,100	-1,600	
13	1,042	-15,522	-13,431	-10,353	1,046	-15,735	-13,500	-5,800	

Resultados das grandezas nas Barras 7 e 8									
Resultados do EIFC					Resultados do Fluxo de Potência				
Barras	Tensão (pu)	Ângulo (graus)	P (MW)	Q (Mvar)	Tensão (pu)	Ângulo (graus)	P (MW)	Q (Mvar)	
7	1,044	-13,319	0,16	2,576	1,044	-13,442	-0,008	0,005	
8	1,09	-13,324	-0,053	28,465	1,090	-13,442	0,000	28,242	

Após o processo de CET local, as estimativas obtidas são enviadas para coordenação no COR. Com isso, dá-se início ao processo de estimação de estados superior. Conforme citado anteriormente, apenas informações fasoriais de tensão serão processadas como informação *a priori* do estimador E1FC.

A comparação entre as métricas dos erros das tensões nodais para a proposta de estimação hierárquica aqui apresentada e as obtidas com a estimação centralizada fornecida pelo estimador E1C (que também processa as mesmas medidas fasoriais de tensão) podem ser vistas na Fig. 16. Percebe-se desta figura que a proposta inicial de estimação hierárquica em dois níveis apresenta resultados bastante aderentes aos da estimação centralizada.

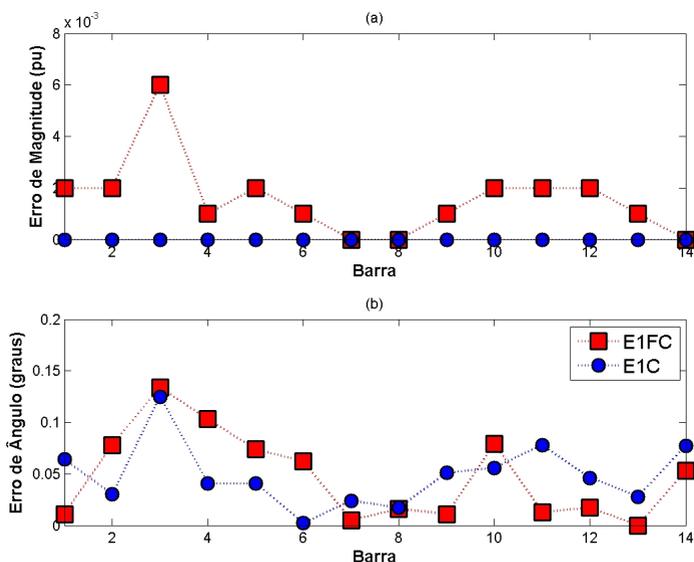


Figura 16 – Métrica dos erros das magnitudes (a) e ângulos (b) das tensões nodais considerando PMUs instaladas nas barras 1, 2, 3, 6 e 8 para o estimador convencional para o sistema-teste IEEE 14.

Como resultado da estimação no COR, obtêm-se também as estimativas para os fluxos de potência ativa e reativa, cujas métricas são apresentadas na Fig. 17. Ao compararmos tais resultados com os obtidos para a estimação centralizada, nota-se mais uma vez que a abordagem proposta fornece resultados consistentes.

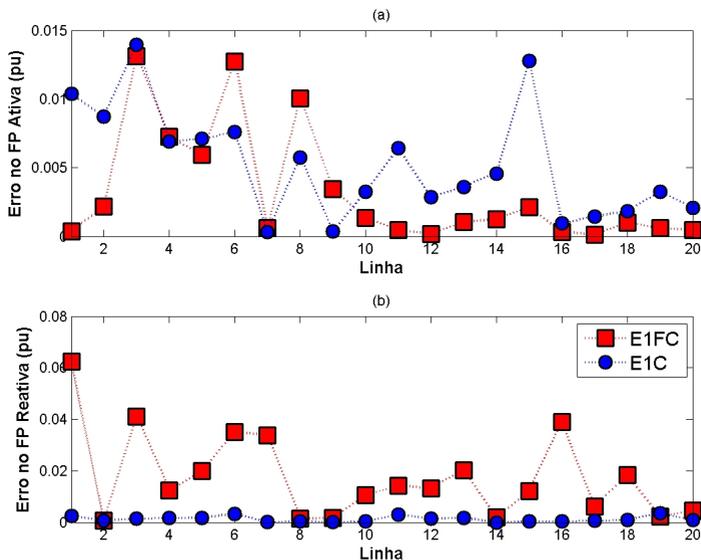


Figura 17 – Métrica dos erros nos fluxos de potência ativa (a) e reativa (b) nas linhas de transmissão considerando PMUs instaladas nas barras 1, 2, 3, 6 e 8 para o estimador convencional para o sistema-teste IEEE 14.

7.3.3.2 Medidas PMU em Todas as Subestações

Da mesma forma que foi feita para o caso anterior, as informações provenientes de PMUs são consideradas como informação *a priori* para o estimador E1FC. Neste caso, considera-se que a disseminação de medidores fasoriais é completa, sendo instaladas PMUs em cada barra do sistema (considerando a modelagem barra-ramo).

O processo de CET local ocorre como o apresentado anteriormente, com a diferença que há informações *a priori* de ângulo das tensões para todas as subestações. Assim como no caso anterior, os resultados obtidos para a estimação do sistema como um todo são apresentados pelas métricas em relação ao valor ideal (obtido pelo fluxo de potência), sendo comparados à estimação centralizada correspondente, cujos resultados são obtidos de um estimador E1C que processa as mesmas medidas SCADA e fasoriais.

A Fig. 18 apresenta as métricas das tensões nodais. Observa-se mais uma vez a consistência dos resultados obtidos para a estimação de estados proposta com os obtidos para a estimação centralizada.

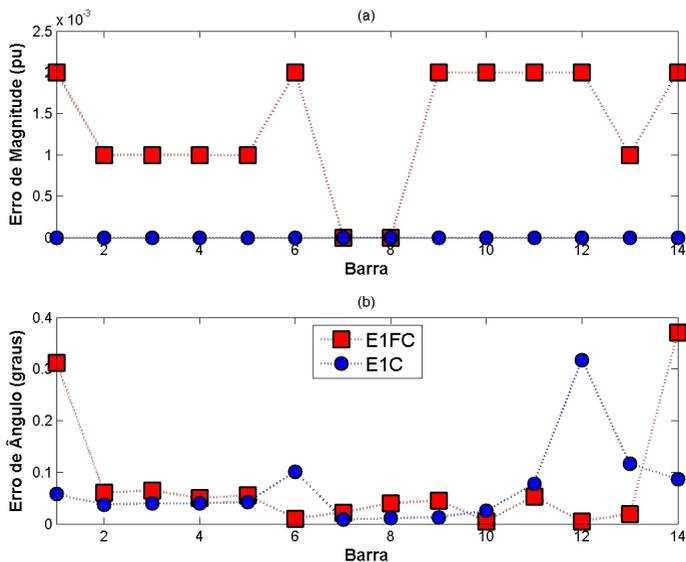


Figura 18 – Métrica dos erros das magnitudes (a) e ângulos (b) das tensões nodais considerando PMUs instaladas em todas as SEs para o estimador convencional para o sistema-teste IEEE 14.

De forma análoga ao apresentado para o caso em que há PMUs apenas para barras de geração, as métricas obtidas para a estimação dos fluxos de potência ativa e reativa são apresentadas na Fig. 19.

7.3.4 Resultados Obtidos Considerando-se a Adição de Medidas PMU ao Sistema: Estimador de Segundo Estágio

Ao considerarmos o estimador hierárquico da forma previamente apresentada, estamos descartando algumas informações disponíveis dos medidores fasoriais. Conforme o que foi apresentado na Subseção 6.5.1, a presença de PMUs no sistema elétrico faz com que não apenas informações referentes às tensões nodais das barras estejam disponíveis, mas também informações sobre correntes nos ramos conectados a elas.

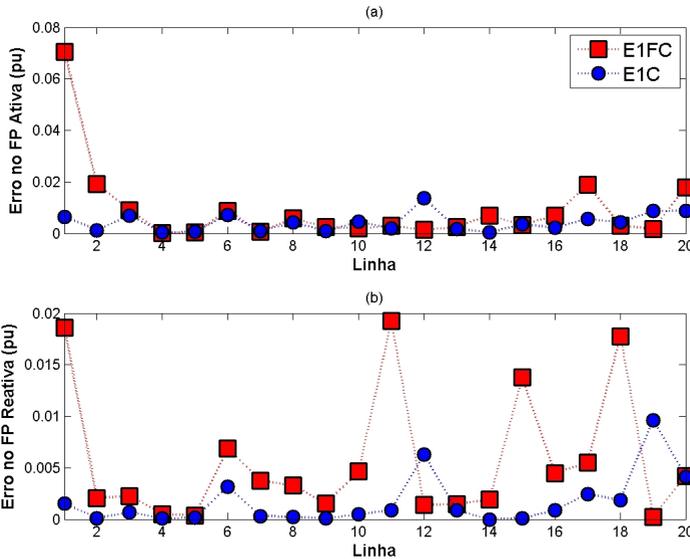


Figura 19 – Métrica dos erros nos fluxos de potência ativa (a) e reativa (b) nas linhas de transmissão considerando PMUs instaladas em todas as SEs para o estimador convencional para o sistema-teste IEEE 14.

A metodologia final proposta para estimação de estados hierárquica em dois níveis apresentada na Seção 6.6 leva as medidas fasoriais de corrente em consideração. De acordo com os procedimentos ali propostos, as medidas provenientes do SCADA são tratadas da forma convencional, com base na arquitetura de estimação hierárquica proposta em [3]. Porém, na saída deste estimador convencional é acoplado um segundo módulo de estimação capaz de lidar de forma mais eficiente com as informações provenientes de PMUs. No presente trabalho, este segundo módulo faz uso do estimador ortogonal em blocos proposto em [48, 56]. Previamente à execução do módulo de estimação adicional, as medidas fasoriais de corrente e tensão são transformadas para coordenadas retangulares. O mesmo tratamento é dado às estimativas provenientes do primeiro módulo de estimação, que processa medidas provenientes do SCADA (estimativas estas que contribuem como informação *a priori* a serem também processadas pelo estimador ortogonal em blocos). Por tratar essas informações na forma retangular ao invés da forma polar, as relações entre as quantidades medidas e as variáveis

de estado correspondentes são lineares, o que permite a utilização de um estimador linear no segundo módulo de estimação acima aludido. Este fato contribui significativamente para a eficiência computacional de todo o processo no segundo nível. Além disso, a utilização de um algoritmo que permite o processamento em blocos (consistindo das partes real e imaginária) de informações preserva as propriedades estatísticas da solução. Na terminologia da Subsecção 6.5.1, este estimador é referido como E2CB.

Nesta subsecção serão apresentados resultados obtidos para os mesmos casos da subsecção anterior, mas agora considerando o estimador E2CB, que corresponde à metodologia final proposta para a estimação hierárquica em dois níveis. O estimador centralizado E2C, apresentado em [48, 56] é utilizado como referência para comparação de resultados, por ser considerado a versão centralizada de estimador em dois estágios que corresponde ao estimador descentralizado E2CB.

7.3.4.1 Medidas PMU nas Barras 1, 2, 3, 6 e 8

Com a consideração de que PMUs estão instaladas nas barras 1, 2, 3, 6 e 8, será agora considerado que, além das medidas fasoriais de tensão, estão também disponíveis medidas fasoriais de corrente nos ramos incidentes a essas barras. Diferentemente do estimador E1FC considerado nas Subsecções 7.3.2 a 7.3.3 deste capítulo, estas informações serão utilizadas pelo estimador E2CB, com o objetivo de promover melhorias adicionais na qualidade das estimativas obtidas para o sistema elétrico como um todo. Deve-se ressaltar ainda que, exceto pela substituição do estimador E1FC pelo estimador E2CB, nada mais foi alterado quanto aos procedimentos adotados nas seções anteriores deste capítulo.

A Fig. 20 apresenta as métricas das tensões nodais para o estimador hierárquico proposto e o estimador centralizado, mostrando que a qualidade das estimativas melhoram com a proposta de estimação hierárquica em dois níveis se comparada com os resultados da Figura 16, obtendo-se resultados ainda mais próximos da estimação centralizada. A melhora se deve sobretudo à utilização de medidas fasoriais de corrente, viabilizada pela maior generalidade e propriedades de precisão do estimador E2CB.

Da mesma forma que nos casos anteriores, além dos estados estimados ficam disponíveis os fluxos de potência ativa e reativa nas linhas de transmissão, sendo que a comparação das respectivas métricas é

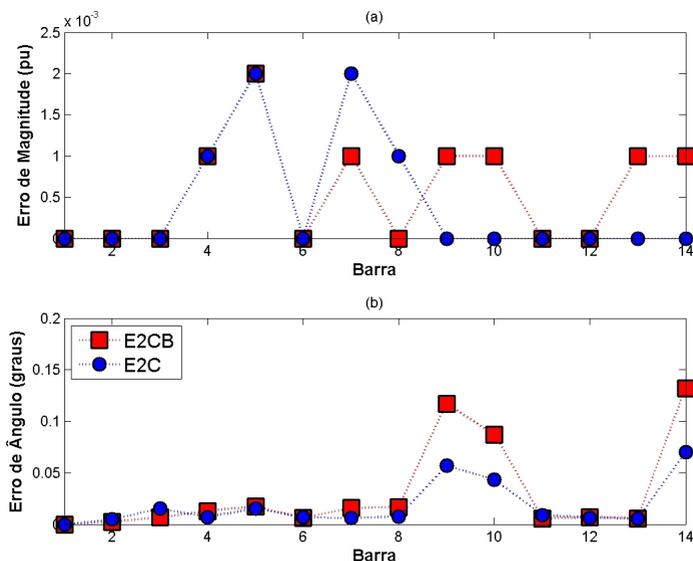


Figura 20 – Métrica dos erros das magnitudes (a) e ângulos (b) das tensões nodais considerando PMUs instaladas nas barras 1, 2, 3, 6 e 8 com estimador ortogonal em blocos para o sistema-teste IEEE 14.

apresentada na Fig. 21. Os picos de erros observados para os ramos 15 (potência ativa e reativa) e 16 (potência reativa) podem ser explicados pela baixa redundância do plano de medição na vizinhança da barra 7. Para isto contribuiu a ausência de medidas de injeção e tensão nodal tanto na barra 7 como na 8.

7.3.4.2 Medidas PMU em Todas as Subestações

Este caso considera o cenário ideal, no qual todas as barras do sistema têm PMUs instaladas (considerando a modelagem barra ramo, o que implica que há pelo menos uma PMU em cada SE). Trata-se da mesma condição considerada para o estimador E1FC na Subseção 7.3.3.2 deste capítulo.

Os resultados obtidos das métricas da tensão nodal e fluxos de potência nas linhas de transmissão para este novo cenário podem ser visualizados nas Figs. 22 e 23, respectivamente. Novamente verifica-se

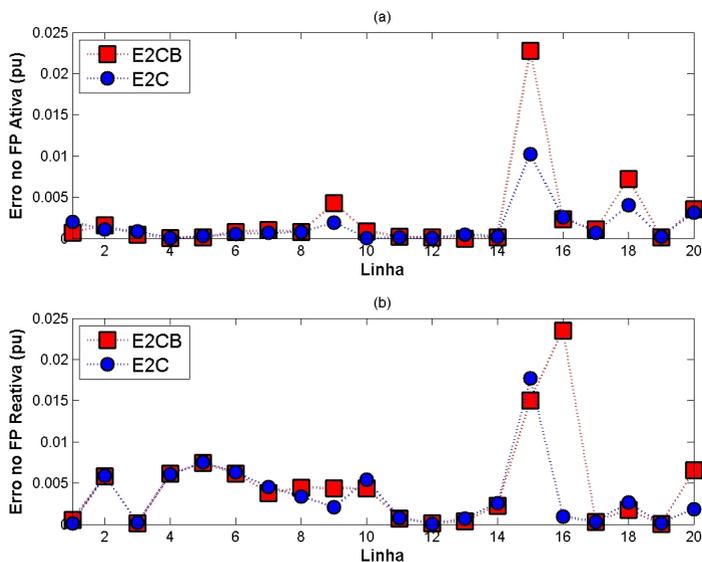


Figura 21 – Métrica dos erros nos fluxos de potência ativa (a) e reativa (b) nas linhas de transmissão considerando PMUs instaladas nas barras 1, 2, 3, 6 e 8 com estimador ortogonal em blocos para o sistema-teste IEEE 14.

que os resultados obtidos para a metodologia implementada mediante o estimador E2CB são bastante aderentes aos obtidos para a estimação centralizada para o mesmo contexto.

A Fig. 24 apresenta um comparativo dos resultados obtidos para as duas estratégias de estimação no nível de coordenação (E1FC e E2CB) propostos neste trabalho. Como seria de se esperar, os resultados obtidos para a estimação E2CB são melhores que os obtidos pela E1FC, já que a primeira faz uso de todas as informações fasoriais disponíveis, enriquecendo desta forma a qualidade das estimativas finais obtidas para os estados do sistema.

7.4 Resultados Obtidos para o Sistema IEEE 9 Barras

Na Fig. 25 é apresentado o diagrama unifilar para o sistema-teste IEEE 9 barras expandido no nível de seção de barra. Novamente,

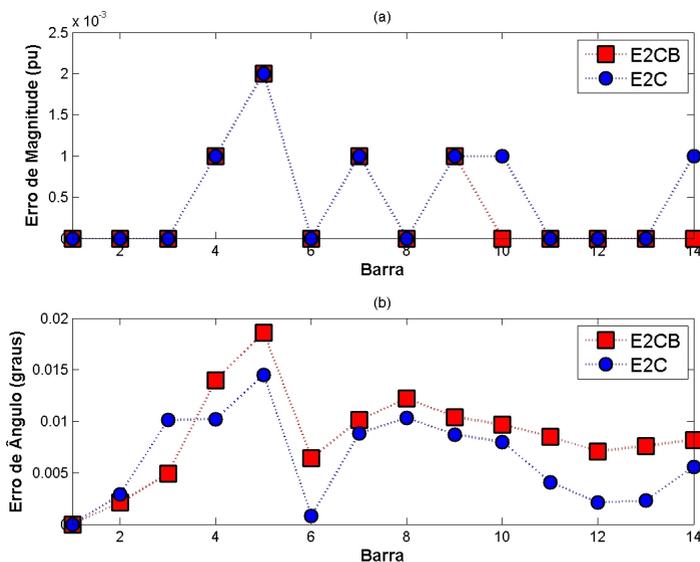


Figura 22 – Métrica dos erros das magnitudes (a) e ângulos (b) das tensões nodais considerando PMUs instaladas em todas as SEs do sistema com estimador ortogonal em blocos para o sistema-teste IEEE 14.

o plano de medição é composto pelas medidas de fluxo de potência nos dois extremos das linhas de transmissão, injeções de potência nas barras de geração e carga sinalizadas nas figuras, medidas de magnitude de tensão nas barras de referência de cada SE e uma medida de fluxo de potência em ramo chaveável fechado para cada SE.

Da mesma forma que para o sistema-teste IEEE 14 barras, são considerados dois cenários: apenas medidas provenientes do SCADA e com PMUs instaladas na rede elétrica. Para ambos os casos, o processo de CET local é o mesmo, sendo que as medidas fasoriais são consideradas apenas no nível de coordenação conduzido no COR.

Os resultados obtidos para este sistema-teste serão apresentados nas subseções a seguir.

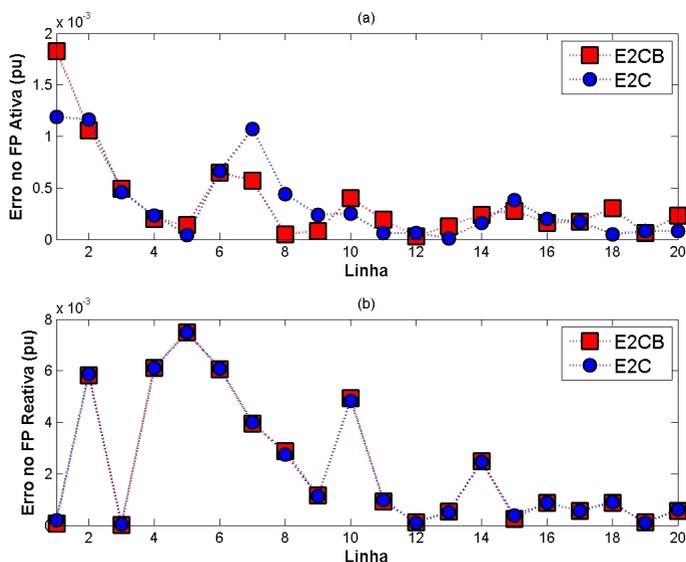


Figura 23 – Métrica dos erros nos fluxos de potência ativa (a) e reativa (b) nas linhas de transmissão considerando PMUs instaladas em todas as SEs do sistema com estimador ortogonal em blocos para o sistema-teste IEEE 14.

7.4.1 Resultados Considerando-se Apenas Medidas Convencionais

Da mesma forma que para o sistema-teste IEEE 14, o processo de CET local não levou mais que 3 (três) iterações para convergir o laço externo, além de não passar de 12 iterações para o MPDPI especializado. Quando é concluída a estimação local para a SE 1, que foi a SE que levou mais tempo para atingir a convergência final do processo de CET local (0,21283 segundos), dá-se início à estimação de estados no nível de coordenação.

Considerando primeiramente que não há medidas fasoriais disponíveis, ao final da estimação de estados no nível superior obtêm-se os resultados das métricas apresentado na Fig. 26. Ressalta-se que, assim como é feito para o sistema-teste de 14 barras, utiliza-se o estimador E1FC ignorando-se as contribuições de informações *a priori*,

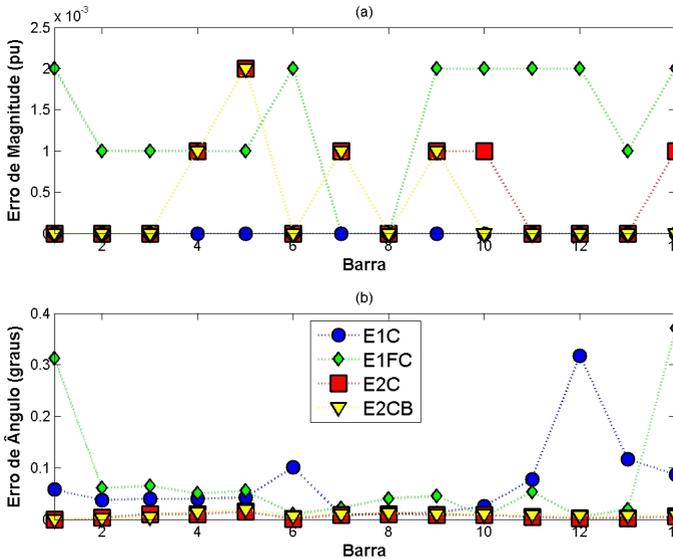


Figura 24 – Comparativo das métricas dos erros das magnitudes (a) e ângulos (b) das tensões nodais considerando PMUs instaladas em todas as SEs do sistema considerando as duas abordagens de EEH para o sistema-teste IEEE 14.

utilizadas por este estimador apenas quando medidas fasoriais de tensão encontram-se disponíveis.

Da Figura 26 percebe-se que as estimativas de magnitude de tensão obtidas pelo CET local são equivalentes às obtidas pelo estimador centralizado. Já os resultados para a estimação angular com a metodologia proposta chegam a ser melhores do que com a estimação centralizada.

7.4.2 Resultados Obtidos Considerando-se a Adição de Medidas PMU

Para levar em conta o aporte de medidas fasoriais ao processo de estimação hierárquica, esta subseção apresenta resultados obtidos considerando dois possíveis cenários: PMUs instaladas apenas em barras de geração (neste caso, nas barras 1, 2 e 3) e a presença de PMUs

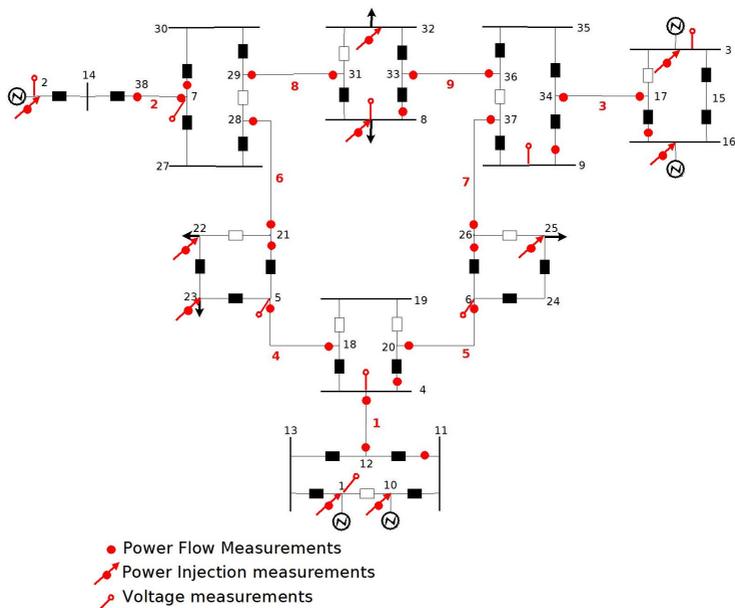


Figura 25 – Sistema-teste IEEE 9 barras modelado no nível de subestação.

em todas as barras do sistema.

Assim como para o sistema-teste IEEE 14, as informações provenientes de PMUs são tratadas de duas formas: como informação *a priori* para o estimador E1FC (considerando esta estimação como caso 1), ou; como entrada para o estimador ortogonal em blocos, E2CB (caso 2). Para ambos os casos a comparação é feita considerando-se o estimador centralizado correspondente (estimadores E1C e E2C, respectivamente).

7.4.2.1 Medidas PMU nas Barras 1, 2 e 3

Após a finalização do processo de CET local, inicia-se a etapa de coordenação. Os resultados obtidos ao final deste procedimento podem ser vistos na Fig. 27.

Esta figura faz um comparativo entre as duas abordagens desenvolvidas neste trabalho de doutorado com as suas respectivas versões

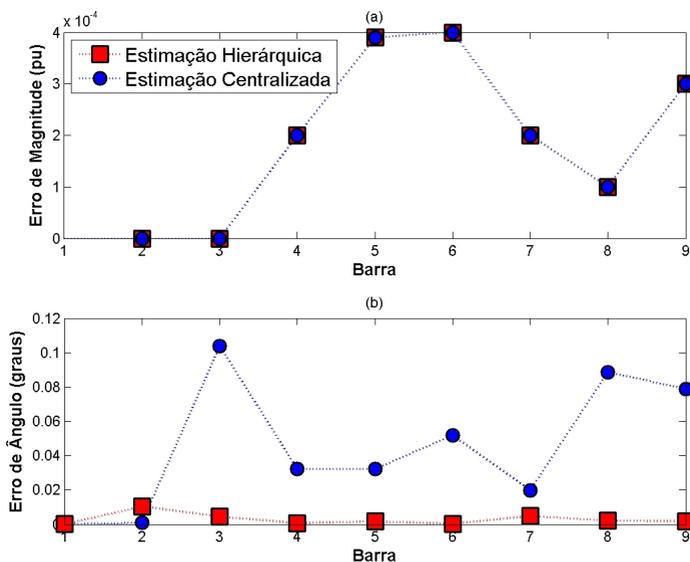


Figura 26 – Métrica dos erros nas magnitudes (a) e nos ângulos (b) das tensões nas barras para medidas convencionais para o sistema-teste IEEE 9.

centralizadas. Percebe-se que, ao tratarmos as medidas fasoriais como informação *a priori*, os resultados obtidos têm qualidade inferior à das estimativas fornecidas pelos estimadores de dois estágios. Tal fato era esperado, uma vez que a arquitetura E2CB, que acopla o estimador em blocos à saída do estimador convencional, utiliza também as medidas fasoriais de corrente, o que enriquece a qualidade das estimativas obtidas.

7.4.2.2 Medidas PMU em Todas as Subestações

Ao considerarmos o cenário ideal, com PMUs instaladas no sistema como um todo, obtêm-se ao final do processo de estimação hierárquica proposta os resultados das métricas para as tensões nodais apresentados na Fig. 28.

Estes resultados mostram-se superiores aos da seção anterior, evidenciando a contribuição do maior número de medidas fasoriais de

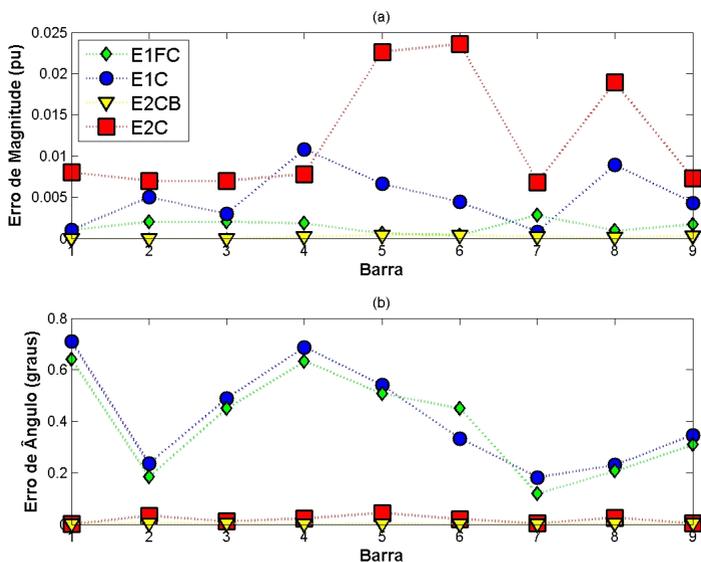


Figura 27 – Métrica dos erros nas magnitudes (a) e nos ângulos (b) das tensões nas barras considerando PMUs instaladas nas barras 1, 2 e 3 para o sistema-teste IEEE 9.

alta precisão para a qualidade das estimativas. Além disso, corroboram a superioridade do estimador descentralizado E2CB de dois estágios em relação aos seus correspondentes de um único estágio.

7.5 Desempenho computacional

7.5.1 Tempo de execução dos estimadores propostos

Conforme mencionado na Seção 7.1, o tempo de cálculo requerido pelo processo de Coestimação de Estados e Topologia, para um sistema de potência composto por várias subestações representadas no nível de seção de barra, é determinado pela subestação que exigir mais tempo para concluir o processo de coestimação, já que se supõe que os estimadores locais operam em paralelo. Tal fato deve ser portanto considerado na determinação do tempo total de estimação de estados para o sistema de potência como um todo. Se definirmos:

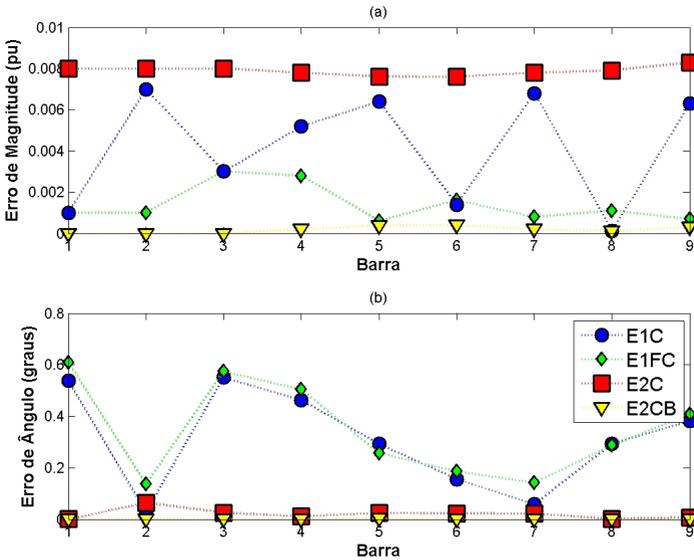


Figura 28 – Métrica dos erros nas magnitudes (a) e nos ângulos (b) das tensões nas barras considerando PMUs instaladas em todas as SEs para o sistema-teste IEEE 9.

- t_{SE}^i : tempo de execução da coestimação para a subestação i ;
 t_{coord} : tempo de cálculo necessário ao processo de coordenação executado no nível hierárquico superior;
 t_{total} : tempo total para a estimação de estados para o sistema de potência,

então teremos:

$$t_{total} = \max_i \{t_{SE}^i\} + t_{coord} \quad (7.1)$$

A equação (7.1) será utilizado para a determinação dos tempos de cálculo referentes aos casos simulados para os sistemas-teste de 14 e 9 barras apresentados nas seções anteriores deste capítulo. Conforme já mencionado, os aplicativos computacionais foram implementados em Matlab e executados em um microcomputador com 2 GB de memória RAM e processador Intel Dual-Core de 1.87 GHz. Ressalta-se ainda que não foram adotadas técnicas de esparsidade e de ordenação na programação, bem como não foram considerados os tempos necessários para a transmissão de dados.

7.5.2 Sistema-teste de 14 barras

Conforme mencionado anteriormente, o tempo total de cálculo do aplicativo desenvolvido é calculado adicionando-se os tempos necessários para a execução de cada etapa de estimação da arquitetura proposta.

Tendo-se como base o tempo total para a execução da estratégia centralizada correspondente, E1C e E2C, chega-se aos resultados apresentados na Tabela 12. Esta tabela apresenta a fração de tempo requerido para a execução das estratégias propostas, E1FC e E2CB, em relação a respectiva estimação centralizada. Destaca-se que, para as EESP centralizadas (E1C e E2C), considera-se que a topologia das SEs está correta, fazendo-se uso da modelagem barra-ramo da rede com todas as medidas, exceto as medidas de fluxo de potência ativa e reativa nos ramos chaveáveis, presentes nos planos de medição adotados e descritos na Seção 7.3.

Tabela 12 – Fração de tempo necessária para execução da arquitetura de estimação hierárquica proposta para o sistema IEEE 14 barras.

Estratégia de Estimação	Fração de Tempo
E1FC sem medidas fasoriais	0,24364637
E1FC com PMUs nas barras 1, 2, 3, 6 e 8	0,23300938
E1FC com PMUs em todas as SEs	0,25102506
E2CB com PMUs nas barras 1, 2, 3, 6 e 8	0,85173938
E2CB com PMUs em todas as SEs	0,86012021

Pode-se perceber da Tabela 12 que, apesar da estratégia de estimação hierárquica proposta fazer uso de até 3 estimadores distintos (CET, estimador ortogonal baseado no método de Givens com 3 multiplicadores e estimador ortogonal em bloco), o tempo necessário para a finalização do método proposto não chega a 90% do tempo requerido pela estimação centralizada. Isto se justifica pelo fato do volume de dados processados por cada estimador da arquitetura hierárquica ser muito menor do que o da estratégia centralizada.

7.5.3 Sistema-teste de 9 barras

Assim como o apresentado na Subseção 7.5.2, faz-se uma comparação entre os tempos necessários para a execução de cada etapa

de estimação da arquitetura proposta com a estratégia de estimação centralizada correspondente.

Novamente, os tempos base considerados são os obtidos na execução das estratégias centralizadas, E1C e E2C, obtendo os resultados apresentados na Tabela 13. Da mesma forma como o apresentado na Subseção 7.5.2, a tabela apresenta a fração de tempo requerido para a execução das estratégias propostas, E1FC e E2CB, em relação a respectiva estimação centralizada. Ressalte-se que as medidas, excetuando as de fluxo de potência ativa e reativa nos ramos chaveáveis, são as mesmas presentes nos planos de medição adotados e descritos na Seção 7.4.

Tabela 13 – Fração de tempo necessária para execução da arquitetura de estimação hierárquica proposta para o sistema IEEE 9 barras.

Estratégia de Estimação	Fração de Tempo
E1FC sem medidas fasoriais	0,10448036
E1FC com PMUs nas barras 1, 2 e 3	0,12015331
E1FC com PMUs em todas as SEs	0,13700179
E2CB com PMUs nas barras 1, 2 e 3	0,79259224
E2CB com PMUs em todas as SEs	0,7529828

Os resultados apresentados na Tabela 13 corroboram mais uma vez a aplicabilidade da metodologia de estimação hierárquica proposta neste trabalho.

7.6 Análise preliminar de erros grosseiros

A análise de erros grosseiros (EG) é pertinente ao estudo de estimação de estados, uma vez que perdas nos canais de transmissão de dados, erros de tradução e medição, deficiência na regulagem de equipamentos de medição, etc., podem levar a estimativas não-aderentes às condições operativas do sistema de potência que se deseja monitorar. Além disso, espera-se que estimadores de estados tenham a capacidade de explorar a redundância das informações que processam de modo a detectar e identificar erros grosseiros em medidas.

Considerando a importância do processamento de erros grosseiros na estimação de estados, neste trabalho foi desenvolvido um estudo preliminar a respeito da presença destes erros nas diferentes etapas do algoritmo de estimação hierárquica aqui proposto. Para tal, faz-se uso

do sistema-teste de 4 barras apresentado na Seção 6.7, Fig. 13, para avaliar a viabilidade de se associar o tratamento de erros grosseiros tanto à estimação local, no nível de SE, quanto à etapa de coordenação de estimativas locais. Para tal, os EGs simulados têm variância tipicamente na faixa de 10σ , sendo o seu processamento analisado para os novos estimadores aqui apresentados. Além disso, em todas as simulações foi considerada uma probabilidade de falso alarme de 5% na etapa de detecção de EGs.

7.6.1 Resultados Considerando-se Erros Grosseiros na CET

Tendo por base o que foi exposto na Subseção 6.4.1, diferentes tipos de erros são aplicados às SEs do sistema. Os erros grosseiros simulados foram alocados arbitrariamente às seguintes medidas: para a SE 1, o erro está na medida de injeção de potência ativa no nó 1; para a SE 2, o EG se encontra no fluxo de potência reativa no ramo chaveável 2 – 10; um erro no fluxo de potência ativa no ramo chaveável 3 – 15 está presente na SE 3; finalmente, a SE 4 apresenta erro na medida de injeção de potência reativa no nó 18.

No primeiro caso, a presença de EG na medida de injeção de potência ativa na barra 1, cujo valor real é de 1,8510 pu, faz com que o valor lido seja 2,0617 pu. Como consequência, o valor da parcela da J_{mqp} da função multi-objetivo com a presença deste EG ultrapassa o limiar estabelecido pelo critério do χ^2 , com probabilidade de falso alarme de 5% e 12 graus de liberdade, que é de 21,03, conforme se conclui do valor do critério dado abaixo:

$$J(\mathbf{r}_m, \hat{\mathbf{x}}) = J_{mqp} + J_{mvap} = 63,1464 + 9,5103 \times 10^{-6}.$$

É importante ressaltar que a parcela da função multi-objetivo que é usada para comparação com o critério do χ^2 é a referente às medidas analógicas, ou seja, J_{mqp} . Tendo sido detectado o erro grosseiro, o programa realiza o processo de identificação e eliminação da medida errônea, conforme descrito na Subseção 2.5.1. Tal procedimento é realizado analisando-se o vetor de resíduos normalizados, no qual a medida cujo resíduo normalizado possui maior valor é eliminada do conjunto de medidas, reiniciando-se o processo de estimação sem a medida portadora de EG. Após a eliminação, o valor final de J_{mqp} torna-se bastante reduzido, já que o valor final da função-objetivo é:

$$J(\mathbf{r}_m, \hat{\mathbf{x}}) = 2,7931 + 2,1762 \times 10^{-5}.$$

Como o novo valor de J_{mqp} é inferior ao limiar do teste do qui-quadrado, conclui-se que não há mais EGs nas medidas presentes na subestação.

No caso do EG da SE 2, o valor errôneo para a medida de fluxo de potência reativo no ramo 2–10, que era de 0,1527 pu e passa a ser de 0,2561 pu, faz com que a parcela correspondente às medidas análogas da função multi-objetivo seja $J_{mqp} = 42,4759$, ultrapassando o critério χ^2 estabelecido, que para esta SE é 15,51, considerando-se 8 graus de liberdade. Após a identificação e remoção correta da medida portadora do EG, realizada da mesma forma que para a SE 1, obtém-se:

$$J(\mathbf{r}_m, \hat{\mathbf{x}}) = 5,67 + 1,30 \times 10^{-5}.$$

Novamente, a eliminação da medida espúria faz com que a parcela J_{mqp} seja inferior ao limiar do teste do qui-quadrado, de onde se conclui que não há mais EG nas medidas desta SE.

A presença de EG na medida de fluxo de potência ativa no ramo 3–15, que passa de 0,1300 pu para 0,2392 pu, faz com que o algoritmo do MPDPI especializado atinja a convergência, porém para um valor de:

$$J(\mathbf{r}_m, \hat{\mathbf{x}}) = 53,3167 + 0,1123,$$

cuja parcela J_{mqp} , além de ser mais significativa que a parcela J_{mvap} , ultrapassa o critério do χ^2 estabelecido, que é de 28,87 para 18 graus de liberdade. Com isso, o programa realiza o procedimento de identificação de EG e aponta e elimina corretamente a medida errônea. Como consequência, o valor final da função multi-objetivo passa a ser:

$$J(\mathbf{r}_m, \hat{\mathbf{x}}) = 9,91 + 2,16 \times 10^{-5}.$$

Com a parcela J_{mqp} abaixo do limiar do qui-quadrado, conclui-se que não há mais EG no plano de medição desta subestação.

Na SE 4, a presença do erro grosseiro na injeção de potência reativa na barra 18, que era 0,0898 pu e passa a ser igual a 0,1808 pu, resulta em um valor muito elevado para a parcela $J_{mqp} = 41,9206$ se comparado à parcela $J_{mvap} = 1,037 \times 10^{-5}$. Além disso, tal valor ultrapassa o critério do χ^2 estabelecido para esta SE que é de 22,36 com 13 graus de liberdade. Com isso, é sinalizada a presença de EG no plano de medição e o programa identifica e elimina corretamente a medida errônea, fazendo com que o valor final da função multi-objetivo seja:

$$J(\mathbf{r}_m, \hat{\mathbf{x}}) = 4,48 + 1,91 \times 10^{-5}.$$

Mais uma vez, após a eliminação da medida portadora de EG, o

valor da parcela J_{mqp} é menor que o limiar do qui-quadrado estabelecido, podendo-se concluir que não há mais medidas espúrias no plano de medição.

7.6.2 Resultados Considerando-se Erros Grosseiros no Estimador Ortogonal Convencional

No caso da análise de EG para o estimador ortogonal baseado no método de Givens com três multiplicadores, foi aplicada a metodologia convencional apresentada na Subseção 2.5.2. Como este método encontra-se bem detalhado na literatura, apenas um exemplo é aqui apresentado. No contexto desta subseção, é importante considerar que o estimador aplicado no COR para tratar de medidas provenientes do SCADA lida apenas com as medidas de fluxo de potência ativa nas linhas de transmissão, conforme explicado na Seção 6.5.

Sendo assim, considera-se que há presença de EG na medida de fluxo de potência ativa na linha de transmissão da barra 7 para a barra 10. Isso faz com que o valor da função objetivo seja de 83,8478 que é muito maior que o valor estabelecido pelo critério do χ^2 , com probabilidade de falso alarme de 5% e 6 graus de liberdade, que é de 12,592. Após a identificação e eliminação deste erro, o valor passa a ser $J_{mqp} = 6,5469$.

Conclui-se, portanto que a medida portadora de EG foi eliminada e que não há mais indícios da presença de erros nas demais medidas de fluxo de potência ativa.

7.6.3 Resultados Considerando-se Erros Grosseiros no Estimador Ortogonal em Blocos

A presença de EG em medidas provenientes de PMU podem se manifestar nas tensões nodais ou nas correntes. Como o estimador utilizado para lidar com ambos os tipos de medidas é o estimador ortogonal em blocos E2CB, que trata as informações disponíveis em coordenadas retangulares, há correlação entre a parte real e imaginária de cada medida, fazendo com que o EG possa se manifestar de maneira mais significativa em uma dessas parcelas e menos na outra. Como consequência, se for detectada a presença de EG no plano de medição, ao se identificar EG em um dos componentes de uma dada medida, a eliminação deverá abranger também o outro componente. Sendo as-

sim, a eliminação da medida errônea será feita pela eliminação do bloco real/imaginário do plano de medição.

Primeiramente considera-se que há EG na medida do módulo do fasor tensão monitorado pela PMU instalada na barra 2. Isso resulta em um valor para função objetivo igual a 36,042, sendo este valor maior que o limiar do $\chi^2 = 18,307$, com probabilidade de falso alarme de 5% e 10 graus de liberdade, estabelecido para este sistema. A presença do erro faz com que a parte real da medida seja identificada como a medida portadora do erro grosseiro, por ser aquela cujo resíduo normalizado é maior que os demais. Como consequência, as linhas correspondentes ao bloco são processadas novamente, porém com peso negativo, conforme apresentado na Subseção 6.5.2. Este procedimento equivale a eliminar completamente os efeitos da medida original no processo de estimação, implicando na redução do valor final da soma ponderada dos quadrados dos resíduos para de 5,139.

Quando o EG é aplicado ao módulo do fasor corrente medida da barra 3 para a barra 1, o valor da soma ponderada dos quadrados dos resíduos resultante é de 36,558. Como mais uma vez o valor do limiar baseado na distribuição do qui-quadrado é ultrapassado, é detectada a presença de EG, que se manifesta na parte imaginária do bloco correspondente. Da mesma forma que no caso de EG em medida de tensão, ambas as componentes retangulares da medida identificada como portadora de EG são reprocessadas com peso negativo. Tal procedimento elimina a medida errônea e faz com que o valor final da função objetivo seja de 9,164, indicando que o processo de estimação foi expurgado de informações espúrias.

7.7 Análise dos Resultados

O processo de coestimação de estados e topologia proposto mostra-se eficaz na estimação concomitante dos estados e topologia de sistemas compostos unicamente por subestações. As adaptações à metodologia desenvolvida em [19] têm como objetivo viabilizar a aplicação da coestimação exclusivamente para as subestações, sem que haja perda da qualidade da estimação.

Durante todas as simulações, o processo de coestimação proposto não apresentou nenhuma dificuldade de convergência, que é atingido em não mais que 3 iterações. Como forma de melhor validar os resultados apresentados, cada caso analisado foi submetido a uma série de 50 simulações, que se distinguem entre si pelos erros aleatórios utilizados

para simulação das medidas.

Ao compararmos os resultados obtidos apresentados na Tabela 9 com os valores dos estudos de fluxo de potência originais, verifica-se que a estimação de estados descentralizada apresenta excelente desempenho, com resultados bastante aderentes aos esperados. Esta conclusão também se aplica às comparações de métricas dos erros apresentadas neste capítulo.

Um ponto importante a ser destacado está no fato de que as estimativas produzidas pela estratégia descentralizada proposta apresentam precisão semelhante, e em alguns casos até superior, às estimativas obtidas pela estimação centralizada. Este fato ressalta a validade da proposta de estimação de estados hierárquica apresentada em [3, 4] e adaptada para aplicação neste trabalho de pesquisa. Destaca-se ainda que a estrutura de estimação hierárquica que lida com as medidas oriundas do sistema SCADA segue a arquitetura de estimação proposta por Lo et. al [3], sendo enriquecida pela adição do estimador capaz de processar integralmente as informações favoráveis disponíveis no sistema.

Além disso, os resultados da análise de erros grosseiros nos três estimadores, embora preliminares e conduzidos em um sistema de pequeno porte, mostram-se bastante satisfatórios e encorajadores quanto ao aprofundamento deste tópico em trabalhos futuros.

Em resumo, pode-se inferir dos resultados apresentados neste capítulo que a metodologia proposta de estimação de estados hierárquica em dois níveis, tendo como nível local as subestações do sistema elétrico, é plenamente viável para a modelagem em tempo real de sistemas elétricos de potência.

7.8 Conclusões

Neste capítulo são apresentados resultados obtidos para a arquitetura proposta de estimação de estados hierárquica em dois níveis.

A modificação do método de coestimação de estados e topologia para aplicação no nível de seção de barra permite a estimação tanto das variáveis analógicas quanto da topologia de cada subestação de forma individualizada, com resultados bastante promissores.

A arquitetura proposta para estimação hierárquica em dois níveis mostra-se eficaz, pois os resultados obtidos para este modelo de estimação de estados são bastante aderentes aos obtidos pela estimação de estados centralizada.

Quanto aos algoritmos de estimação que combinam medidas con-

vencionais e medidas fasoriais, observa-se que o método E2CB é superior no que tange à qualidade das estimativas, as expensas de um maior tempo de processamento. Por outro lado, o algoritmo E1FC apresenta menores tempos de execução porém, por não processar medidas fasoriais de corrente, fornece resultados de qualidade inferior aos obtidos pelo método E2CB.

Como principais vantagens da metodologia proposta podem ser citadas: a estimação concomitante de estados e topologia no nível local (subestações); a redução no volume de informações transmitidas para o centro de operação regional, sem que haja perdas para o processo de estimação no nível hierárquico superior, e a possibilidade de se utilizar um módulo de estimação específico para processamento de medidas fasoriais no nível superior, as quais podem contribuir significativamente para melhorar a qualidade das estimativas finais.

8 CONCLUSÕES FINAIS

8.1 Introdução

Neste Capítulo são apresentadas as conclusões gerais obtidas durante este trabalho de pesquisa.

A primeira linha de desenvolvimento abordada contempla o aprofundamento do problema da coestimação de estados e topologia em relação ao estado da arte, privilegiando a sua aplicação a subestações individuais, bem como a modelagem não linear elementos da rede elétrica.

A outra grande vertente do trabalho é a de estimação de estados hierarquizada. Neste aspecto, a principal contribuição do trabalho é a extensão de algoritmos anteriormente propostos para coordenação das estimativas locais de modo a permitir o processamento eficiente de classes distintas de medidas.

8.2 Proposta para a Estimação de Estados Hierárquica em dois Níveis

A proposta de coestimação de estados e topologia apresentada no Capítulo 6 para a modelagem em tempo real de subestações se baseia na extensão da coestimação de estados e topologia para contemplar a modelagem não linear das subestações e demais elementos da rede, expandido a proposta apresentada em [18] e [19], utilizando a CET de forma plena, ou seja, aplicada a cada subestação individual do sistema elétrico ao invés do sistema modelado na forma barra-ramo estendido.

Em sistemas reais, medidas fasoriais ocorrem sob a forma de medidas de tensão e também de corrente elétrica. No desenvolvimento deste trabalho duas arquiteturas de estimação foram desenvolvidas para agregar medidas fasoriais às medidas oriundas do sistema SCADA, referidas como E1FC e E2CB. A primeira consiste de um estimador convencional de apenas um estágio, capaz de processar informações *a priori*. Medidas fasoriais de tensão são utilizadas na inicialização deste estimador, o que contribui para estabelecer relações entre fasores de tensão em diferentes subestações. Apesar da estratégia E1FC apresen-

tar tempos de processamento melhores, há a desvantagem da qualidade das estimativas serem ligeiramente inferiores às obtidas pela estratégia E2CB.

O estimador E2CB apresenta como principal vantagem a inclusão de medidas fasoriais de corrente, que também podem contribuir significativamente para o processo de estimação de estados. O estimador resultante é composto de dois estágios, sendo o primeiro um estimador convencional e o segundo um estimador ortogonal em blocos capaz de processar ambos os tipos de medidas fasoriais. Este segundo módulo apresenta como propriedade desejável o fato de ser não-iterativo, em consequência do uso da forma retangular para as medidas fasoriais. O processamento em bloco dos componentes retangulares permite a correta representação das correlações entre os mesmos, assegurando assim a manutenção das propriedades estatísticas da solução.

Outro aspecto abordado neste trabalho diz respeito à presença de erros grosseiros nos planos de medição. Sabe-se que, em sistemas reais, a incidência de erros grosseiros em medidas analógicas é comum, constituindo-se portanto em um fator a ser considerado quando da proposta de novas estratégias de estimação de estados. São portanto investigados procedimentos para tratamento de erros grosseiros em medidas analógicas associados à coestimação de estados e topologia no nível local.

Adicionalmente, o estimador de nível hierárquico superior deve ser também capaz de identificar e eliminar erros grosseiros, desde que haja redundância suficiente no nível hierárquico superior. O processamento de erros no nível de coordenação é também um dos tópicos abordados neste trabalho, tendo para isso sido exploradas as propriedades de reproprocessamento de medidas dos estimadores ortogonais.

Deve-se mencionar ainda que as arquiteturas propostas são aplicadas a configurações realísticas e variadas de subestações, como forma de melhor validar as metodologias desenvolvidas neste trabalho.

8.3 Etapas Desenvolvidas do Trabalho

As etapas desenvolvidas neste trabalho de doutorado tiveram por objetivo cumprir as metas estabelecidas e citadas na seção anterior. São elas:

- Implementação do processo de coestimação não-linear no nível local;

- Aplicação da nova arquitetura a sistemas-teste de pequeno porte com e sem a presença de PMUs;
- Estudos sobre o comportamento do estimador proposto mediante a presença de erros grosseiros:
 - Incursão em estudos com erros grosseiros em medidas na subestação;
 - Erros grosseiros em medidas no nível hierárquico superior:
 - * erros grosseiros em medidas SCADA processadas pelo estimador convencional;
 - * estudos preliminares a respeito de erros grosseiros em medidas fasoriais processadas pelo estimador em blocos.
- Extensão das simulações para abranger sistemas mais realísticos;
- Elaboração de artigos que apresentem a evolução deste trabalho de pesquisa [27] e [28].

Ao final destas etapas, verificou-se que a arquitetura proposta E2CB para o nível de coordenação apresenta melhor desempenho que a E1FC, com resultados bastante aderentes aos obtidos se for aplicada a estratégia centralizada. Além disso, o algoritmo final proposto (utilizando a estratégia E2CB no nível hierárquico superior) se mostrou eficiente, processando as informações disponíveis nas subestações localmente, reduzindo o volume de dados transmitidos e estimados no nível de coordenação, com tempos de cálculo satisfatórios. Os resultados obtidos apresentados no Capítulo 7 demonstram a aplicabilidade e desempenho da arquitetura de estimação hierárquica em dois níveis desenvolvidas neste trabalho.

8.4 Sugestões para Trabalhos Futuros

A implementação das propostas de estimação de estados hierárquica em dois níveis aqui apresentadas têm por objetivo selecionar e diminuir o volume de dados a serem enviados para os centros de operação regionais. Os estudos de aplicabilidade da pesquisa de doutorado foram promissores, condizentes com as necessidades apresentadas na estimação de estados em sistemas elétricos reais.

Embora diversos aspectos relevantes tenham sido abordados, há alguns pontos que podem ser melhor explorados, sendo portanto sugeridos como trabalhos futuros:

- A possibilidade de se identificar erros grosseiros nos dois níveis hierárquicos propostos está atrelada a outro aspecto relativo à estimação de estados, o da observabilidade. Os testes de aplicabilidade aqui apresentados partem do princípio de que o sistema é observável. Porém, perda de medidores, falhas na comunicação, etc., podem levar o sistema à não-observabilidade. Surge portanto a necessidade de se considerar a análise de observabilidade em conexão com o estimador hierárquico proposto, para que se possa avaliar o impacto da eventual perda de observabilidade e possibilidades para a restauração da mesma;
- Estudos mais aprofundados a respeito de erros grosseiros em medidas SCADA convencionais no processo de coestimação de estados e topologia;
- Aprimoramento do estudo preliminar de detecção, identificação e remoção de erros grosseiros em medidas fasórias para o estimador baseado no método de Givens em blocos;
- A proposta atual para a coestimação de estados e topologia tem por objetivo minimizar uma função multi-objetivo. Pode-se alterar esta abordagem de forma a realizar estudos sobre incluir o tratamento da topologia sob a forma de informações *a priori* em estimadores de mínimos quadrados.

REFERÊNCIAS

- [1] SIMÕES COSTA, A.; SALGADO, R. *Análise Estática de Segurança de Sistemas Elétricos de Potência*. [S.l.]: Notas de Aula, UFSC, 2002.
- [2] VAN CUTSEM, T.; HORWARD, J.; RIBBENS-PAVELLA, M. A two-level static state estimator for electric power systems. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, PAS-100, n. 8, p. 3722 –3732, aug. 1981. ISSN 0018-9510.
- [3] LO, K.; SALEM, M.; MCCOLL, R.; MOFFATT, A. Two-level state estimation for large power system. i. algorithms. *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings C*, v. 135, n. 4, p. 299 –308, jul 1988. ISSN 0143-7046.
- [4] LO, K.; SALEM, M.; MCCOLL, R.; MOFFATT, A. Two-level state estimation for large power system. ii. computational experience. *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings C*, v. 135, n. 4, p. 309 –318, jul 1988. ISSN 0143-7046.
- [5] YANG, T.; SUN, H.; BOSE, A. Transition to a two-level linear state estimator - part i: Architecture. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 26, n. 1, p. 46 –53, feb. 2011. ISSN 0885-8950.
- [6] YANG, T.; SUN, H.; BOSE, A. Transition to a two-level linear state estimator - part ii: Algorithm. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 26, n. 1, p. 54 –62, feb. 2011. ISSN 0885-8950.
- [7] SCAGLIONE, A. *State-aware decentralized database systems for smart grid*. Acesso em 18/03/2015. Disponível em: <http://tcipg.org/research_State-Aware-DDS>.
- [8] MONTICELLI, A.; GARCIA, A. Modeling zero impedance branches in power system state estimation. *IEEE Transaction on Power Systems*, v. 6, n. 4, p. 1561–1570, Nov 1991.
- [9] MONTICELLI, A.; GARCIA, A. Modeling zero impedance branches in power system state estimation. *IEEE/PES Winter Meeting, Nova York, EUA*, v. 8, n. 1, p. 364 – 370, Jan 1991.

- [10] ALSAC, O.; VEMPATI, N.; STOTT, B.; MONTICELLI, A. Generalized state estimation. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 13, n. 3, p. 1069 – 1075, Aug 1998.
- [11] CLEMENTS, K.; SIMÕES COSTA, A. Topology error identification using normalized Lagrange multipliers. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 13, n. 2, p. 347–353, 1998. ISSN 0885-8950.
- [12] VEMPATI, N.; SILVA, C.; ALSAC, O.; STOTT, B. Topology estimation. In: *Power Engineering Society General Meeting, 2005. IEEE*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 806 – 810 Vol. 1.
- [13] SIMÕES COSTA, A.; LOURENÇO, E. M.; CLEMENTS, A. Power system topological observability analysis including switching branches. *IEEE Transaction on Power Systems*, v. 17, n. 2, p. 250 – 256, May 2002.
- [14] LOURENÇO, E. M.; SIMÕES COSTA, A. Identificação de erros de topologia via multiplicadores de lagrange normalizados e testes de hipóteses. *Revista Controle e Automação*, v. 14, n. 2, p. 166 – 175, Abril, Maio, Junho 2003.
- [15] SIMÕES COSTA, A.; LOURENÇO, E. M.; VIEIRA, F. Topology error identification for orthogonal estimators considering a priori state information. *15th Power Systems Computation Conference, Liege*, Aug 2005.
- [16] VOSGERAU, F. F.; SIMÕES COSTA, A.; LOURENÇO, E. M.; CLEMENTS, K. Coestimação de estados e topologia em sistemas de potência. *XVIII Congresso Brasileiro de Automática*, 2010.
- [17] VOSGERAU, F. F.; SIMÕES COSTA, A.; LOURENÇO, E. M.; CLEMENTS, K. Power system state and topology coestimation. *Bulk Power System Dynamics and Control (IREP)*, 2010.
- [18] VOSGERAU, F. F. *Coestimação de Estados e Topologia em Sistemas de Potência*. Dissertação (Mestrado) — PPGEEL - UFSC, 2011.
- [19] ANDREOLI, E. *Coestimação de Estados e Topologia em Sistemas de Potência Utilizando Modelo de Medição Não Linear*. Dissertação (Mestrado) — PPGEEL - UFSC, 2013.

- [20] KEZUNOVIC, M. Future trends in protective relaying, substation automation, testing and related standardization. In: *Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES*. [S.l.: s.n.], 2002. v. 1, p. 598 – 602 vol.1.
- [21] KEZUNOVIC, M.; TAYLOR, H. New solutions for substation sensing, signal processing and decision making. In: *System Sciences, 2004. Proceedings of the 37th Annual Hawaii International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2004. p. 9 pp.
- [22] KEZUNOVIC, M.; POPOVIC, T. Developing future substation automation strategies: Selecting appropriate ieds and developing new applications. *International Energy Journal*, v. 6, n. 1, 2005.
- [23] KEZUNOVIC, M.; GUAN, Y.; GUO, C.; GHAVAMI, M. The 21st century substation design: Vision of the future. In: *Bulk Power System Dynamics and Control (iREP) - VIII (iREP), 2010 iREP Symposium*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1 –8.
- [24] BOSE, A. Smart transmission grid applications and their supporting infrastructure. *Smart Grid, IEEE Transactions on*, v. 1, n. 1, p. 11 –19, june 2010. ISSN 1949-3053.
- [25] GOMEZ-EXPOSITO, A.; ABUR, A.; JAEN, A. de la V.; GOMEZ-QUILES, C. A multilevel state estimation paradigm for smart grids. *Proceedings of the IEEE*, v. 99, n. 6, p. 952 –976, june 2011. ISSN 0018-9219.
- [26] GÓMEZ-EXPÓSITO, A.; JAÉN, A. de la V.; GÓMEZ-QUILES, C.; ROUSSEAU, P.; CUTSEM, T. V. A taxonomy of multi-area state estimation methods. *Electric Power Systems Research*, v. 81, n. 4, p. 1060 – 1069, 2011. ISSN 0378-7796.
- [27] SILVA, N.; SIMÕES COSTA, A.; CLEMENTS, K. Hierarchical state estimation based on state and topology coestimation at substation level. In: *PowerTech (POWERTECH), 2013 IEEE Grenoble*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–6.
- [28] SILVA, N. S. da; SIMÕES COSTA, A. J. A. Estimaco de estados hierárquica em sistemas elétricos considerando modelagem local de subestaes. In: *XX Congresso Brasileiro de Automática*. [S.l.: s.n.], 2014.

- [29] MONTICELLI, A. The impact of modeling short circuit branches in state estimation. *IEEE Transaction on Power Systems*, v. 8, n. 1, p. 1561–1570, Feb 1993.
- [30] MONTICELLI, A. Electric power system state estimation. *Proceedings of the IEEE*, v. 88, n. 2, p. 262 – 282, Feb 2000.
- [31] CLEMENTS, K. A. Robust state estimation for the restructured electric power environment. *X SEPOPE, Florianopolis, SC, Brasil*, 2006.
- [32] VAN CUTSEM, T.; RIBBENS-PAVELLA, M. Critical survey of hierarchical methods for state estimation of electric power systems. *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, PAS-102, Issue: 10, n. 10, p. 3415 – 3424, Out 1983.
- [33] SIQUEIRA, M. S. D. de. *Hierarchical Dynamic State Estimation for Electric Power Systems*. Dissertação (Mestrado) — IFAC, Rio, 1985.
- [34] GOUVÊA, J. P. S. *Estimadores de Estado Hierarquicos em Sistemas Eletricos Interligados: uma analise comparativa*. Dissertação (Mestrado) — PPGEEL - UFSC, 1990.
- [35] GOMEZ-EXPOSITO, A.; JAEN, A. de la V. Two-level state estimation with local measurement pre-processing. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 24, n. 2, p. 676 –684, may 2009. ISSN 0885-8950.
- [36] NAZIRI, I.; KARRARI, M. Hierarchical robust state estimation in power system using phasor measurement units. In: *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2011 IEEE PES*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1 –6.
- [37] LOURENÇO, E. M.; SIMÕES COSTA, A.; CLEMENTS, K. A. Bayesian-based hypothesis testing for topological error identification in generalized state estimation. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 19, n. 2, p. 1206–1215, May 2004.
- [38] LOURENÇO, E. M. *Análise de Observabilidade e Identificação de Erros de Topologia na Estimção de Estados Generalizada*. Tese (Doutorado) — PPGEEL - Universidade Federal de Santa Catarina, Dez 2001.

- [39] GJELSVIK, A.; AAM, S.; HOLTEN, L. Hachtel's augmented matrix method - a rapid method improving numerical stability in power system static state estimation. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, PAS-104, n. 11, p. 2987 –2993, nov. 1985. ISSN 0018-9510.
- [40] SINGH, H.; ALVARADO, F. Weighted least absolute value state estimation using interior point methods. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 9, n. 3, p. 1478 –1484, aug 1994. ISSN 0885-8950.
- [41] WRIGHT, S. J. *Primal-Dual Interior-Point Methods*. [S.l.]: SIAM, 1997.
- [42] ABUR, A.; EXPÓSITO, A. G. *Power System State Estimation: Theory and Implementation*. 1. ed. [S.l.]: CRC Press, 2004.
- [43] SIMÕES COSTA, A.; QUINTANA, V. H. An orthogonal row-processing algorithm for power system sequential state estimation. *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, PAS-100, n. 8, p. 3791 – 3800, Aug 1981.
- [44] VIEIRA, F. *Identificação de Erros de Topologia em Sistemas de Potência através de Métodos Ortogonais e Testes de Hipóteses*. Dissertação (Mestrado) — PPGEEL - Universidade Federal de Santa Catarina, Fev 2001.
- [45] SIMÕES COSTA, A. J. A. *Power System State Estimation: Orthogonal Methods for Estimation and Bad Data Processing, and Techniques for Topological Observability*. Tese (Doutorado) — University of Waterloo, Canada, 1981.
- [46] GENTLEMAN, W. M. Least squares computations by givens transformations without square roots. *Journal of Inst. Math Applics*, n. 12, p. 329 – 336, 1973.
- [47] SIMÕES COSTA, A.; QUINTANA, V. An orthogonal row processing algorithm for power system sequential state estimation. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, PAS-100, n. 8, p. 3791–3800, Aug 1981. ISSN 0018-9510.
- [48] BEZ, D. M. *Estratégia em dois estágios utilizando rotações de givens em blocos para a inclusão de medidas fasoriais na estimação de estados em sistemas de potência*. Dissertação (Mestrado) — PPGEEL - Universidade Federal de Santa Catarina, Jun 2013.

- [49] HALLECK, J. *Block Matrix Givens Rotation*. Ago 2011. Disponível em: <<http://home.utah.edu/~nahaj/math/blockgivens.html>>.
- [50] HANDSCHIN, E.; SCHWEPPE, F.; KOHLAS, J.; FIECHTER, A. Bad data analysis for power system state estimation. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, v. 94, n. 2, p. 329–337, Mar 1975. ISSN 0018-9510.
- [51] VAN CUTSEM, T.; RIBBENS-PAVELLA, M.; MILI, L. Hypothesis testing identification: A new method for bad data analysis in power system state estimation. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, PAS-103, n. 11, p. 3239–3252, Nov 1984. ISSN 0018-9510.
- [52] SIMÕES COSTA, A.; LOURENÇO, E.; COLZANI, L. Reduced anomaly zone determination for topology error processing in generalized state estimation. In: *Power Tech, 2007 IEEE Lausanne*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 137–142.
- [53] MARLER, R.; ARORA, J. Survey of multi-objective optimization methods for engineering. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Springer-Verlag, v. 26, n. 6, p. 369–395, 2004. ISSN 1615-147X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s00158-003-0368-6>>.
- [54] MILI, L. Discussion of the paper: Linear programming state estimation: error analysis and gross error identification (Falcao, D.M. and de Assis, S. M.). *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 3, n. 3, p. 809–815, 1988. ISSN 0885-8950.
- [55] LOURENÇO, E.; SIMÕES COSTA, A.; P, R. R. Steady-state solution for power networks modeled at bus section level. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 25, n. 1, p. 10–20, Feb 2010. ISSN 0885-8950.
- [56] BEZ, D. M.; SIMÕES COSTA, A. Enhanced probabilistic modeling of phasor measurement errors in hybrid scada-pmu state estimation. In: *12th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*. [S.l.: s.n.], 2012.
- [57] FINK, D.; BEATY, H. W. Standard handbook of electrical engineering. In: _____. 15th. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Professional, 2006. cap. 17: Substations, p. 17–1:17–51.

- [58] LOURENÇO, E.; SILVA, N. da; SIMÕES COSTA, A. Fast decoupled steady-state solution for power networks modeled at the bus section level. In: *PowerTech, 2009 IEEE Bucharest*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–7.
- [59] GOMEZ-EXPOSITO, A.; JAEN, A. de la V. Reduced substation models for generalized state estimation. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 16, n. 4, p. 839–846, Nov 2001. ISSN 0885-8950.
- [60] KEMA. *Metrics for determining the impact of phasor measurements on power system state estimation*. [S.l.], Jan 2006.
- [61] MONTICELLI, A.; WU, Felix F. Network observability: theory. *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, PAS-104(5):1042–1048, May 1985.
- [62] MONTICELLI, A.; WU, Felix F.. Network observability: Identification of observable islands and measurement placement. *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, PAS-104(5):1035–1041, May 1985.
- [63] MONTICELLI, A. *State Estimation in Electric Power Systems: A generalised Approach*. Springer, 1 edition, May 1999.
- [64] KORRES, G. N.; KATSIKAS, P. J. A hybrid method for observability analysis using a reduced network graph theory. *IEEE Transaction on Power Systems*, 18(1):295 – 304, Feb 2003.
- [65] KORRES, G. N.; KATSIKAS, P. J.; CLEMENTES, K. A. Numerical observability analysis based on network graph theory. *IEEE Transaction on Power Systems*, 18(3):1035 – 1045, Aug 2003.
- [66] GOU, B.; ABUR, A. An improved measurement placement algorithm for network observability. *IEEE Transaction on Power Systems*, 16(4):819 – 824, Nov 2001.
- [67] GOU, B.; ABUR, A. A direct numerical method for observability analysis. *IEEE Transaction on Power Systems*, 15(2):625 – 630, May 2000.
- [68] GOU, B. Observability analysis by measurement Jacobian matrix for state estimation. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 4:3881 – 3884, May 2005.

- [69] GOU, B. Extension of observability analysis to Hachtel's augmented matrix. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 5:5282 – 5285, May 2005.
- [70] DOPAZO, J. F.; KLITIN, O.A.; VAN SLYC, L. S. State estimation for power systems: detection and identification of gross measurement errors. *PICA Conference*, Paper X-2, Minneapolis, 1973.

APÊNDICE A - Dados do sistema-teste IEEE 9 barras

A.1 SISTEMA ANALISADO NO COR

Este apêndice tem por objetivo apresentar alguns dados omitidos no corpo da tese para o sistema-teste IEEE 9 barras.

Conforme discutido no Capítulo 7, o sistema modelado no nível de seção de barra da figura 25 é reduzido para apenas 9 barras na modelagem barra-ramo obtida pela topologia estimada no nível local. Sendo assim, após o processo de CET no nível local, o sistema analisado no COR é o apresentado na figura 29.

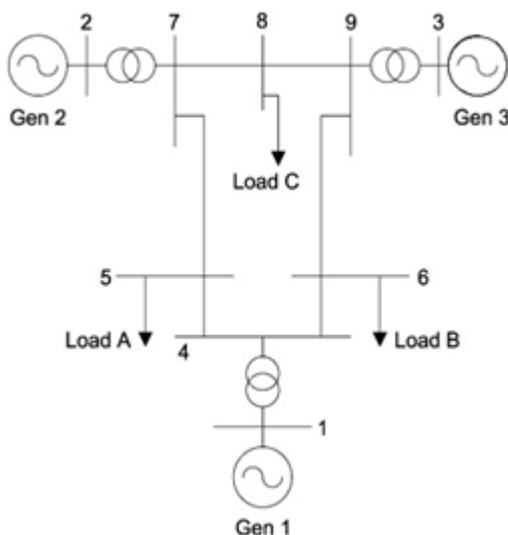


Figura 29 – Sistema-teste IEEE 9 barras.

A.2 AMOSTRA DO VETOR DE MEDIDAS

Conforme mencionado no Capítulo 7, cada sistema-teste foi submetido a uma série de 50 simulações, diferenciando em cada uma delas pela semente geradora de pequenos erros aleatórios acrescentados aos vetores de medidas perfeitas obtidas por um aplicativo de fluxo de potência. Nesta seção serão apresentados os vetores de medidas e variâncias utilizados em uma das simulações para todas as etapas do algoritmo (subestações individuais e sistema analisado no COR) para

as medidas provenientes do SCADA.

Tabela 14 – Medidas e suas correspondentes covariâncias para o sistema-teste 9 barras: Nível de Subestação.

SE	Valor da medida pu	Covariância
1	1,0273	0,00020816
	0,37114	0,00011296
	0,0018427	0,0001
	-0,71705	0,00015132
	0,0012957	0,0001
	0,12474	0,00010181
	0,00069214	0,0001
	-0,27651	0,00010729
	-0,0013229	0,0001
	0,34639	0,0001127
	-0,35012	0,0001127
	0,35173	0,00011296
	0,34611	0,00011296
	0,12557	0,00010181
	-0,13462	0,00010181
0,14029	0,00010181	
0,13698	0,00010181	
2	1,0318	0,00020506
	0,008793	0,0001
	-1,6374	0,00036569
	-0,0077031	0,0001
	-0,062023	0,00010044
	1,6016	0,00036569
	1,6481	0,00036569
	0,066751	0,00010044
0,060341	0,00010044	
3	1,0462	0,00020506
	0,41833	0,00011806
	-0,0023106	0,0001
	0,42399	0,00011806
	-0,85097	0,00017225
	-0,05352	0,0001003
	0,0056205	0,0001
	-0,056399	0,0001003
	0,093861	0,00010118
0,43532	0,00011806	

Continua na próxima página

Tabela 14 – Continuação da página anterior

SE	Valor da medida pu	Covariância
3	0,43974	0,00011806
	0,85923	0,00017225
	-0,057436	0,0001003
	-0,041463	0,0001003
	-0,10535	0,00010118
4	1,033	0,00020523
	0,7287	0,00015132
	-0,41031	0,00011676
	-0,3096	0,00010942
	0,2364	0,0001057
	-0,21623	0,00010523
	-0,013585	0,00010001
	0,39975	0,00011676
	0,31685	0,00010942
	0,23523	0,00010522
-0,0025095	0,00010001	
5	0,98442	0,00019914
	0,3961	0,00011655
	0,82947	0,0001711
	-0,62881	0,00013906
	-0,62466	0,00013906
	0,38537	0,00011495
	0,10878	0,00010127
	-0,25212	0,00010625
	-0,25816	0,00010625
	-0,84194	0,0001711
	1,2284	0,00025625
	-0,62717	0,00013906
	-0,11781	0,00010128
0,5111	0,000125	
-0,24442	0,00010625	
6	1,0212	0,00020256
	0,30641	0,00010933
	-0,0037388	0,0001
	-0,89827	0,000181
	0,58923	0,00013535
	0,17388	0,00010273
	-0,0098404	0,0001
	-0,30455	0,000109
	0,14463	0,00010181
	0,90441	0,000181

Continua na próxima página

Tabela 14 – *Continuação da página anterior*

SE	Valor da medida pu	Covariância
6	-0,59373	0,00013535
	0,89339	0,000181
	0,30285	0,000109
	-0,1359	0,00010181
	0,31519	0,000109
7	1,0086	0,00020523
	1,629	0,00036569
	-0,00080354	0,0001
	-0,86475	0,00017503
	-0,76481	0,00015834
	-0,0018468	0,0001
	-0,10092	0,00010085
	-0,010723	0,0001
	0,077281	0,00010071
	0,01119	0,00010001
	-0,011257	0,0001
	0,87021	0,00017503
	0,74994	0,00015834
	0,874	0,00017503
	-0,76361	0,00015834
-0,086885	0,00010071	
-0,0099364	0,00010001	
-0,081769	0,00010071	
-0,0036786	0,00010001	
8	1,0111	0,00020321
	-0,50013	0,000125
	0,76817	0,00015761
	-0,499	0,000125
	0,2333	0,00010581
	-0,16075	0,00010306
	0,10559	0,00010115
	-0,16625	0,00010306
	0,22779	0,0001059
	-0,759	0,00015761
	0,26974	0,00010671
	-0,50123	0,000125
	-0,11061	0,00010114
-0,0748	0,00010046	
-0,17375	0,00010306	
9	1,0188	0,00020658
	-0,0045753	0,0001

Continua na próxima página

Tabela 14 – Continuação da página anterior

SE	Valor da medida pu	Covariância
9	0,84516	0,00017225
	-0,0089864	0,0001
	-0,24605	0,00010585
	-0,60549	0,00013699
	-0,0037624	0,0001
	-0,16407	0,00010224
	0,009754	0,0001
	-0,021098	0,0001001
	0,17896	0,00010327
	-0,60684	0,00013699
	0,60669	0,00013699
	0,22848	0,00010585
	0,24661	0,00010585
	0,16846	0,00010327
	-0,18124	0,00010327
	0,042834	0,0001001
0,032772	0,0001001	

Tabela 15 – Medidas e suas correspondentes covariâncias para o sistema-teste 9 barras: Nível de Coordenação.

Nível	Valor da medida pu	Covariância
COR	0,70442	0,00015132
	-0,71831	0,00015132
	1,6169	0,00036569
	-1,6412	0,00036569
	0,84462	0,00017225
	-0,85108	0,00017225
	0,40229	0,00011676
	-0,41119	0,00011655
	0,30753	0,00010942
	-0,30668	0,00010933
	-0,842	0,0001711
	0,862	0,00017503
	-0,59871	0,00013535
	0,60664	0,00013699

Continua na próxima página

Tabela 15 – *Continuação da página anterior*

Nível	Valor da medida pu	Covariância
COR	0,76223	0,00015834
	-0,75945	0,00015761
	-0,24749	0,00010581
	0,22819	0,00010585

APÊNDICE B - Dados do sistema-teste IEEE 14 barras

B.1 SISTEMA ANALISADO NO COR

Este apêndice tem por objetivo apresentar alguns dados omitidos no corpo da tese para o sistema-teste IEEE 14 barras.

Conforme discutido no Capítulo 7, o sistema modelado no nível de seção de barra da figura 14 é reduzido para apenas 14 barras na modelagem barra-ramo obtida pela topologia estimada no nível local. Sendo assim, após o processo de CET no nível local, o sistema analisado no COR é o apresentado na figura 30.

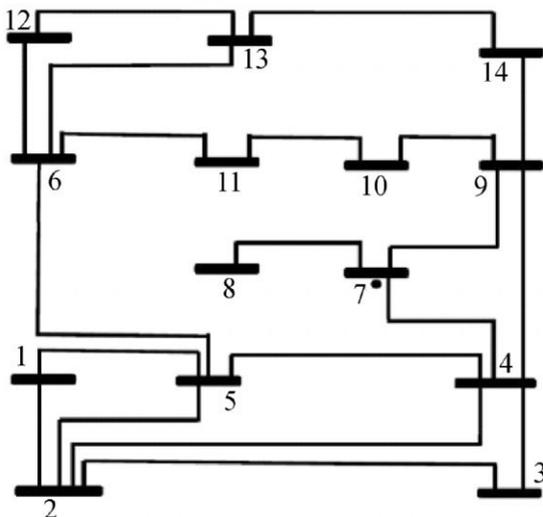


Figura 30 – Sistema-teste IEEE 14 barras.

B.2 AMOSTRA DO VETOR DE MEDIDAS

Conforme mencionado no Capítulo 7, cada sistema-teste foi submetido a uma série de 50 simulações, diferenciando em cada uma delas pela semente geradora de pequenos erros aleatórios acrescentados aos vetores de medidas perfeitas obtidas por um aplicativo de fluxo de potência. Nesta seção serão apresentados os vetores de medidas e variâncias utilizados em uma das simulações para todas as etapas do algoritmo (subestações individuais e sistema analisado no COR) para as medidas provenientes do SCADA.

Tabela 16 – Medidas e suas correspondentes covariâncias para o sistema-teste 14 barras: Nível de Subestação.

SE	Valor da medida pu	Covariância
1	1,0739	0,00021236
	-0,0061446	0,0001
	1,1459	0,00023456
	0,0032599	0,0001
	-0,76386	0,00015837
	-1,5676	0,00034398
	-0,00095199	0,0001
	-0,091184	0,00010091
	0,010648	0,0001
	0,01678	0,00010003
	0,19543	0,0001041
	-0,76382	0,00015831
	0,75562	0,00015831
	0,39855	0,00011574
	1,5595	0,00034389
	1,5849	0,00034389
	-0,0021053	0,0001
	0,0090248	0,0001
-0,082906	0,00010085	
-0,19067	0,00010352	
-0,19142	0,00010352	
2	1,0651	0,0002092
	1,5072	0,00033077
	0,18582	0,00010335
	-0,40595	0,00011735
	-0,55137	0,00013119
	-0,7272	0,00015285
	-0,27732	0,0001075
	0,24332	0,0001057
	0,049493	0,00010034
	0,050821	0,00010033
	-0,029333	0,00010013
	1,4951	0,00033077
	1,7229	0,00038971
	-0,4049	0,00011735
	-0,97854	0,00019508
-0,29642	0,00010831	
-0,050635	0,00010024	

Continua na próxima página

Tabela 16 – Continuação da página anterior

SE	Valor da medida pu	Covariância
2	0,041873	0,00010024
	0,099186	0,00010094
3	1,0215	0,00020201
	-0,45671	0,00012218
	-0,47886	0,00012218
	0,7195	0,00014958
	0,24848	0,00010566
	0,015481	0,00010002
	0,012032	0,00010002
	-0,010231	0,00010002
	0,0014484	0,0001
	-0,46915	0,00012218
	-0,70446	0,00014958
	0,24621	0,00010543
	0,0088386	0,00010002
	0,018037	0,00010006
-0,021888	0,00010001	
4	1,026	0,00020506
	-0,0094182	0,0001
	0,0027609	0,0001
	-0,14901	0,00010241
	0,61575	0,00013705
	-0,27243	0,0001076
	0,53599	0,00012937
	-0,47185	0,00012285
	-0,25688	0,00010584
	-0,012238	0,0001
	0,00053916	0,0001
	-0,0038295	0,0001
	-0,046608	0,00010022
	0,095782	0,00010076
	-0,078563	0,00010051
	0,049698	0,00010015
	-0,0065514	0,0001
	-0,75357	0,00015681
	0,26542	0,0001076
	0,48896	0,00012285
-0,91165	0,00018263	
0,28755	0,00010902	
-0,54829	0,00012937	
0,22725	0,00010584	

Continua na próxima página

Tabela 16 – *Continuação da página anterior*

SE	Valor da medida pu	Covariância
4	0,13136	0,0001016
	-0,097202	0,00010076
	-0,033091	0,00010015
	0,13737	0,00010154
	-0,071746	0,0001006
	0,075697	0,00010065
	-0,0059544	0,0001
5	0,98507	0,0002
	1,0218	0,0002065
	-0,0035598	0,0001
	-0,083511	0,00010058
	0,0016927	0,0001
	0,74089	0,00015411
	-0,45356	0,00012057
	0,39749	0,0001166
	-0,61499	0,00013764
	0,0017457	0,0001
	-0,024366	0,00010003
	-0,0059551	0,0001
	-0,068236	0,00010062
	0,13062	0,00010181
	-0,045105	0,00010024
	0,026306	0,0001001
	0,067312	0,00010058
	-0,73565	0,00015411
	0,46583	0,00012057
-0,40376	0,0001166	
0,61096	0,00013764	
0,0093653	0,00010003	
0,078617	0,00010085	
-0,12745	0,00010181	
0,057871	0,00010034	
-0,027836	0,0001001	
6	1,0759	0,00021492
	0,014646	0,0001
	-0,086193	0,00010063
	-0,0061448	0,0001
	-0,10248	0,00010125
	-0,081808	0,00010065
	0,46594	0,00012057
-0,18466	0,0001033	

Continua na próxima página

Tabela 16 – Continuação da página anterior

SE	Valor da medida pu	Covariância
6	-0,004328	0,0001
	-0,10135	0,00010096
	-0,0017305	0,0001
	0,42898	0,00011788
	-0,030769	0,00010011
	-0,18374	0,00010352
	-0,10905	0,00010109
	0,2014	0,00010366
	0,091898	0,00010065
	-0,45369	0,00012057
	0,19217	0,0001033
	-0,072704	0,00010063
	0,11328	0,00010125
	-0,32678	0,00011057
	0,031232	0,00010011
	0,18045	0,00010352
	0,09302	0,00010109
-0,086493	0,00010096	
-0,43016	0,0001179	
9	1,0382	0,00020551
	1,0394	0,00020551
	0,00041936	0,0001
	-0,0066004	0,0001
	-0,049892	0,00010023
	0,15956	0,00010241
	-0,087741	0,00010078
	0,28223	0,0001076
	-0,30059	0,0001087
	0,0047352	0,0001
	0,011736	0,0001
	0,011638	0,00010003
	-8,0034e-005	0,00010001
	-0,0081554	0,0001
	0,16194	0,00010244
	-0,17331	0,00010276
	-0,082428	0,00010078
0,098194	0,00010078	
-0,14478	0,00010185	
-0,01187	0,00010004	
-0,26671	0,0001076	
0,2975	0,0001087	

Continua na próxima página

Tabela 16 – *Continuação da página anterior*

SE	Valor da medida pu	Covariância
9	0,0089383	0,0001
	-0,014094	0,0001
	0,021636	0,00010004
	-0,0021267	0,00010001
	-0,14437	0,00010244
	0,16657	0,00010276
10/ 14	1,032	0,00020568
	1,0366	0,00020323
	0,0046483	0,0001
	0,0076653	0,0001
	-0,093996	0,00010081
	0,028485	0,00010018
	0,046644	0,00010023
	-0,13998	0,00010222
	0,062381	0,00010038
	0,099224	0,00010076
	0,0078224	0,0001
	-0,010231	0,0001
	-0,064769	0,00010034
	0,067415	0,00010058
	-0,022137	0,00010003
	-0,0546	0,00010025
	0,067921	0,00010003
	0,00019373	0,0001
	0,077502	0,00010081
	-0,08795	0,00010081
	0,052326	0,00010018
	-0,091798	0,00010076
0,16145	0,00010222	
-0,14644	0,00010222	
0,055703	0,00010034	
-0,060707	0,00010034	
0,065142	0,00010058	
0,01554	0,0001	
0,041496	0,00010025	
-0,052986	0,00010025	
11	1,028	0,0002092
	0,99325	0,0002
	-0,025164	0,00010012
	-0,040249	0,00010018
	-0,014248	0,0001

Continua na próxima página

Tabela 16 – Continuação da página anterior

SE	Valor da medida pu	Covariância
11	0,079569	0,00010061
	-0,0035076	0,00010003
	-0,079133	0,0001006
	0,014964	0,0001
	0,098283	0,00010091
	0,053313	0,00010018
	-0,087325	0,00010061
	0,074397	0,0001006
-0,10682	0,00010091	
12	1,0429	0,00021088
	1,0502	0,00021088
	-0,049559	0,00010037
	-0,013809	0,00010003
	0,08317	0,00010063
	-0,014061	0,00010003
	-0,015283	0,00010002
	0,027143	0,0001001
	0,012226	0,00010003
	-0,079628	0,00010063
	0,020193	0,00010002
-0,02951	0,0001001	
13	1,063	0,00020941
	-0,13997	0,00010182
	-0,064667	0,00010039
	0,019059	0,00010003
	0,18281	0,00010321
	-0,054357	0,00010034
	-0,060478	0,00010032
	0,0083402	0,00010002
	0,094811	0,00010099
	0,068722	0,00010039
	-0,19211	0,00010391
	-0,17592	0,00010321
	0,046973	0,00010032
-0,11873	0,00010131	
-0,087395	0,00010099	

Tabela 17 – Medidas e suas correspondentes covariâncias para o sistema-teste 14 barras: Nível de Coordenação.

Nível	Valor da medida pu	Covariância
	1,5393	0,00034389
	-1,5199	0,00033077
	0,76558	0,00015831
	-0,73576	0,00015411
	0,72286	0,00015285
	-0,70226	0,00014958
	0,56544	0,00013119
	-0,54497	0,00012937
	0,40524	0,00011735
	-0,41067	0,0001166
	-0,23849	0,00010566
	0,22717	0,00010584
	-0,61057	0,00013705
	0,6176	0,00013764
	0,2732	0,0001076
	-0,27552	0,0001076
	0,15958	0,00010241
	-0,14624	0,00010241
	0,45616	0,00012057
	-0,4568	0,00012057
	0,06666	0,00010063
	-0,078638	0,00010061
	0,095298	0,00010065
	-0,075151	0,00010063
	0,17511	0,0001033
	-0,18881	0,00010321
	-0,0044941	0,0001
	0,0099092	0,0001
	0,26741	0,0001076
	-0,2835	0,0001076
	0,052187	0,00010023
	-0,042215	0,00010023
	0,10033	0,00010078
	-0,086806	0,00010076
	-0,035154	0,00010018
	0,040371	0,00010018
	0,017011	0,00010003
	-0,0061716	0,00010003

Continua na próxima página

Tabela 17 – *Continuação da página anterior*

Nível	Valor da medida pu	Covariância
	0,064585	0,00010039
	-0,057849	0,00010038