CAMILA DOS ANJOS FANTIN

**Análise de observabilidade e de redundância de
medidas no contexto de estimação de estado trifásica**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de
São Carlos, da Universidade de São Paulo, para
obtenção do Título de Mestre em Ciências, Programa
de Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Prof. Dr. João Bosco Augusto London Jr.

São Carlos

2012

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL
DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU
ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE
CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

Fantin, Camila dos Anjos.

F216a Análise de observabilidade e de redundância de medidas
no contexto de estimação de estado trifásica. / Camila
dos Anjos Fantin; orientador João Bosco Augusto London
Junior. São Carlos, 2012.

Dissertação - Mestrado (Programa de Pós-Graduação em
Ciências em Engenharia Elétrica e Área de Concentração em
Sistemas Elétricos de Potência)-- Escola de Engenharia de
São Carlos da Universidade de São Paulo, 2012.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheira **CAMILA DOS ANJOS FANTIN**.

Título da dissertação: "Análise de observabilidade e de redundância de medidas no contexto de estimação de estado trifásica".

Data da defesa: 27/02/2012

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. **João Bosco Augusto London (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovada

Prof. Dr. **Eduardo Nobuhiro Asada**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovada

Prof. Dr. **Edmarcio Antonio Belati**
(Universidade Federal do ABC)

Aprovada

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica:
Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo Cesar Lima Segantine**

*Aos meus pais **César** e **Ayrna**, razões da minha existência.*

*Às minhas irmãs, **Luana** e **Caroline**, eternas e verdadeiras amigas*

*Ao **Tiaguinho**, meu afilhado, amor da minha vida.*

Agradecimentos

A Deus, sem ele nada teria sentindo na minha vida.

Aos meus pais, Cézar e Ayrna e minhas irmãs, Luana e Caroline, sem o apoio e o amor de vocês não teria conseguido vencer mais esta etapa na minha vida.

Ao Tiago Henrique, meu afilhado, alegria da minha vida.

Ao Prof^o Dr. João Bosco Augusto London Jr., ufa, chegamos ao fim. Um muito obrigada, pela paciência, orientação e amizade.

A todos os meus familiares, que sempre estiveram do meu lado, me incentivando e me apoiando, em especial a minha vózinha Antonina, por me mostrar o verdadeiro sentido da vida, nunca fraquejar e apoiar sempre em Deus.

Aos professores Arnulfo e Mário da Universidade Federal do Mato Grosso, que me abriram caminhos nunca antes pensados e me fizeram chegar até aqui com seus ensinamentos.

Aos amigos e professores do LACO (Laboratório de análise computacional), que me apoiaram direta ou indiretamente, para realização do meu mestrado. Em especial, ao Denis Toyoshima, por não medir esforços colaborando comigo para a realização desta pesquisa.

As amizades feitas em São Carlos, pelos momentos compartilhados, em especial a Tatiane Fernandes e Thais Kempner, minhas queridas amigas, obrigada por sempre estarem ao meu lado. Também ao Danilo, Eduardo, Guilherme, Fabio, Fabbinho, Lucas, Luciana, Marcelo, Pedrão, Rafael, Remy, Samuel e Venceslau pelos momentos de muitas risadas e pelo apoio incondicional.

Ao Rafa, agradeço por estar ao meu lado e pelo apoio em um dos momentos que mais precisei.

As amigas e amigos, que mesmo eu estando distante, estão sempre por perto me dando forças.

À CAPES, pelo apoio financeiro.

Meu muito obrigada.

RESUMO

FANTIN, C.A. Análise de Observabilidade e de Redundância de Medidas no Contexto de Estimação de Estado Trifásica. 2012. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

Este trabalho de dissertação trata do problema de observabilidade e redundância de medidas para efeito de estimação de estado trifásica. É proposta a extensão de uma metodologia numérica eficiente para análise de observabilidade e identificação de medidas críticas e conjuntos críticos de medidas, desenvolvida para modelagem por fase, a fim de considerar redes trifásicas de energia, nas quais os desbalanços nas cargas e os desequilíbrios na rede são considerados. Ao longo do trabalho apresenta-se uma revisão dos principais conceitos de estimação de estado, observabilidade de redes e redundância de medidas, destacando a importância da estimação de estado trifásica para obtenção de uma operação segura de sistemas elétricos de potência desbalanceados e/ou desequilibrados. Os resultados obtidos em diversos testes realizados, com sistemas trifásicos já empregados em outros trabalhos da área contendo 4, 7 e 38 barras, atestam o adequado desempenho da extensão proposta e são apresentados detalhadamente nesta dissertação. Por fim, o conceito de observabilidade topológica, desenvolvido para modelagem monofásica da rede, é estendido para modelagem trifásica, permitindo um entendimento melhor do problema de observabilidade no contexto de estimação trifásica.

Palavras-Chave: Sistemas Elétricos de Potência, Estimação de Estado Trifásica, Análise de Observabilidade, Medidas Críticas, Conjuntos Críticos de Medidas.

ABSTRACT

FANTIN, C.A. Observability and Measurement Redundancy Analysis on Three-Phase State Estimation. 2012. Dissertation (M.S. Degree) - School of Engineering of Sao Carlos, University of Sao Paulo, São Carlos, 2012.

This thesis focuses on the problem of observability and measurement redundancy in the context of three-phase state estimation. It is proposed an extension of an efficient numerical methodology for observability and redundancy analysis, developed for the single-phase network model, in order to consider the three-phase network model, where the unbalanced loads and the asymmetric nature of the system are considered. During this work, a review of the main concepts related to state estimation, network observability and measurement redundancy are presented, highlighting the importance of the three-phase state estimation in order to obtain a reliable operation of unbalanced and/or asymmetric power systems. Simulations results obtained for several cases studies based on three three-phase systems already used in the literature, with 4, 7 and 38 buses, validate the proposed methodology extension and are presented in detail in this thesis. Finally, the concept of topological observability, developed for the single-phase network model, is extended for the three-phase model.

Keywords: Three-Phase State Estimation, Observability Analysis, Critical Measurements, Critical Sets.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Representação de um SEP.	1
Figura 2.1: Modelo para Estimação de Estado	8
Figura 3.1: Fluxograma - metodologia para análise e restauração de observabilidade e identificação de MCs e de CCMs.	31
Figura 3.2: Sistema teste de 6 barras IEEE	32
Figura 4.1: Representação da linha de transmissão trifásica	41
Figura 4.2: Linha trifásica curta	42
Figura 4.3: Linhas trifásicas mutuamente acopladas.....	42
Figura 4.4: Transformador trifásico.....	44
Figura 4.5: Modelo equivalente π do gerador síncrono trifásico.....	45
Figura 4.6: Modelo π equivalente para um componente da rede.....	49
Figura 4.7 - Representação dos medidores	53
Figura 4.8: Sistema trifásico 2 barras.	55
Figura 5.1: Sistema de 4 barras.	62
Figura 5.2: Sistema de 7 barras.	65
Figura 5.3: Topologia do sistema 37 barras.	68
Figura 6.2: Sistema trifásico de duas barras.	78
Figura 6.3: Grafo da rede trifásica apresentada na Figura 6.2.....	79
Figura 6.4: Árvore geradora de posto completo para o Sistema exemplo de 2 barras apresentado na Figura 6.2.	80
Figura 6.5: Árvore Geradora de Posto Completo para o Sistema de 4 barras apresentado no caso 2 do capítulo 5.....	81
Figura 6.6: Árvore Geradora de Posto Completo para o Sistema de 4 barras apresentado no caso 2 do capítulo 5.....	81
Figura 6.7: Árvore Geradora de Posto Completo para o Sistema de 4 barras apresentado no caso 3 do capítulo 5, considerando a medida $P:1_a$	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Medidas disponíveis para o sistema IEEE 6 barras (Figura 3.1).....	32
Tabela 3.2: Pseudo-medidas	32
Tabela 4.1: Matriz admitância de um transformador conforme o tipo de ligação.....	44
Tabela 4.2 - Dados da rede trifásica do Sistema ilustrado na Figura 4.8.	55
Tabela 4.3 - Dados de barra do Sistema ilustrado na Figura 4.8.	55
Tabela 4.4: Cenário de medidas para o sistema ilustrado na Figura 4.8.	57
Tabela 5.1: Sistema de Medição – Caso 1 – Sistema de 4 barras.....	62
Tabela 5.2: Resultado - Caso 1 - Sistema de 4 barras.	63
Tabela 5.3: Sistema de Medição – Caso 2 – Sistema de 4 barras.....	63
Tabela 5.5: Sistema de Medição - Caso 3- Sistema de 4 barras.....	63
Tabela 5.6: Resultado Caso 3 - sistema de 4 barras	64
Tabela 5.7: Sistema de Medição – Caso 4 – Sistema de 4 barras.....	64
Tabela 5.8: Resultado Caso 4 - sistema de 4 barras	64
Tabela 5.9: Sistema de Medição – Caso 1 – Sistema de 7 barras.....	65
Tabela 5.10: Resultado Caso 1 - sistema de 7 barras.	65
Tabela 5.12: Sistema de Medição – Caso 2 – Sistema de 7 barras.....	66
Tabela 5.13: Resultado caso 2 – sistema 7 barras	66
Tabela 5.14: Sistema de Medição – Caso 3 – Sistema de 7 barras.....	66
Tabela 5.15: Resultado Caso 3 - sistema de 7 barras	66
Tabela 5.16: Sistema de Medição – Caso 4 – Sistema de 7 barras.....	67
Tabela 5.17: Resultado caso 4 – sistema 7 barras	67
Tabela 5.18: Sistema de Medição – Caso 1 – Sistema de 38 barras.....	68
Tabela 5.19: Resultado caso 1 – Sistema de 38 barras.....	69
Tabela 5.20: Sistema de Medição – Caso 2 – Sistema de 38 barras.....	70
Tabela 5.21: Resultado caso 2 – Sistema de 38 barras.....	70
Tabela 5.22: Resultado caso 3 – sistema 38 barras	71
Tabela 5.23: Sistema de Medição – Caso 4 – Sistema de 38 barras.....	72
Tabela 5.24: Resultado caso 4 – sistema 38 barras	72
Tabela 6.1 – Grau de cada um dos nós do grafo apresentado na Figura 6.1.	76
Tabela A.1: Dados do sistema de 4 barras.....	97
Tabela A.2: Parâmetros da rede do sistema de 7 barras.	98
Tabela A.3: Dados sistema 38 barras.	99

LISTA DE SIGLAS

SEP – Sistemas Elétricos de Potência.

EESEP – Estimação de Estado em Sistemas Elétricos de Potência.

SCADA – do inglês, *Supervisory Control and Data Acquisition*.

EGs – Erros Grosseiros.

WLS – do inglês, *Weighted Least Squares*.

EEL – Estimador de Estado Linearizado.

MC – Medidas Críticas.

CCM – Conjunto Crítico de Medidas.

MFSs – Medidas Fasoriais Sincronizadas.

PMU – do inglês, *Phasor Measurement Units*.

FASE – do inglês, *Forecasting-Aided State Estimators*.

NR – Nível de Redundância.

MB – Medidas Básicas.

PC – Pares Críticos

LISTA DE SÍMBOLOS

z – vetor de medidas.

h – vetor de funções não lineares.

x – vetor de variáveis de estado verdadeiros.

w – vetor de erro das medidas.

W – Matriz de Covariância.

σ^2 – Variância do erro da medida.

H – Matriz Jacobiana.

H_A – Matriz Jacobiana Fatorada.

G – Matriz Ganho.

θ – Ângulos de tensão.

v – Magnitude da tensão.

r – vetor dos resíduos.

M – número total de medidas.

n – número de variáveis de estado.

nb – número de barras de carga.

ng – número de barras de geração.

$N_{3\phi}$ – número de variáveis de estado no modelo trifásico.

$H_{3\phi}$ – Matriz Jacobiana Trifásica.

$H_{A3\phi}$ – Matriz Jacobiana Trifásica Fatorada.

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.2	Objetivos	4
1.3	Organização da dissertação	5
2	Revisão Bibliográfica	7
2.1	Estimação de Estado monofásica em Sistemas Elétricos de Potência	7
2.1.1	Estimador monofásico por mínimos quadrados ponderados	8
2.1.2	Estimador de Estado Linearizado	10
2.1.3	Processamento de Erros Grosseiros	12
2.1.4	Observabilidade de Sistemas Elétricos de Potência	13
2.1.5	Medidas Críticas e Conjuntos Críticos de Medidas	17
2.2	Processo de Estimação de Estado trifásica em Sistemas Elétricos de Potência ...	18
2.3	Conclusão	20
3	Análise de Observabilidade e de Redundância de Medidas, no Contexto de Estimação de Estado Monofásica, Através da Obtenção e Análise da Matriz $H\Delta$	23
3.1	Introdução	24
3.2	Matriz Jacobiana	24
3.3	Análise e Restauração da Observabilidade	26
3.4	Identificação de MCs e de CCMs	30
3.5	Exemplo	31
3.6	Conclusões	37
4	Metodologia Proposta Para Análise de Observabilidade e Identificação de Medidas Críticas e de Conjuntos Críticos de Medidas no contexto de Estimação de Estado Trifásica	39
4.1	Modelagem Trifásica dos Componentes da Rede Elétrica	40
4.2	Estimador de Estado Trifásico por Mínimos Quadrados Ponderados	47
	Matriz Jacobiana do Estimador de Estado WLS Trifásico	49
4.3	Observabilidade e Redundância de Medidas no contexto de Estimação de Estado Trifásica	52
4.4	Algoritmo Proposto	54
4.5	Exemplos de Aplicação	54
4.6	Conclusões	59
5	Testes e análises dos resultados	61
5.1	Testes com o sistema de 4 Barras	61
5.2	Testes com o sistema de 7 Barras	64
5.3	Testes com o sistema de 38 Barras	67

5.4 Conclusões	73
6 Análise de observabilidade topológica para sistemas trifásicos	75
6.1 Conceitos e Definições da Teoria de Grafos.....	75
6.2 Observabilidade Topológica – Modelagem Monofásica da Rede	77
6.3 Observabilidade Topológica – Modelagem Trifásica da Rede.....	78
6.4 Conclusões	82
7 Conclusões, Artigos Publicados e Perspectivas Futuras	85
7.1 Conclusões	85
7.2 Trabalhos Publicados	87
7.2.1 Relacionados à pesquisa.....	87
7.2.2 Em outros tópicos de pesquisa	87
7.3 Perspectivas Futuras	88
8 Referências Bibliográficas.....	89
APÊNDICE A.....	97

Capítulo 1

1 Introdução

No final da década de 60 ocorreram mudanças significativas na filosofia da operação dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP). Isso em função dos "Black-outs" ocorridos na costa leste dos Estados Unidos, que mostraram a relevância de questões relacionadas à segurança da operação dos SEP. A Figura 1.1 retrata um SEP, o qual é dividido em 3 sistemas: Geração, Transmissão e Distribuição. De forma sucinta, a Geração é responsável por gerar a energia elétrica, a partir da conversão de alguma forma de energia para elétrica, o Sistema de Transmissão é responsável por transportar a energia elétrica até os pontos de consumo e o Sistema de Distribuição é responsável por distribuir a energia elétrica recebida do Sistema de Transmissão aos centros consumidores.

Figura 1.1: Representação de um SEP.

Nessa mesma época, a junção de dois fatores, o aumento da dificuldade para operação dos SEP (cada vez mais interligados) e os avanços tecnológicos em computação e telecomunicação, propiciou o desenvolvimento de funções relacionadas com a monitoração e análise de segurança, dando origem ao chamado Controle de Segurança, ou simplesmente, Operação em Tempo Real (WU; MOSLEHI; BOSE, 2005).

A operação em tempo real requer uma grande quantidade de informação. Dentre estas, as variáveis de estado do sistema¹, são fundamentais, pois, através das mesmas torna-se possível determinar o estado operativo do SEP.

Devido as grandes dimensões do SEP, tais informações são obtidas através dos sistemas de telemedição, isto é, medições feitas a distância, que estão sujeitas a uma série de erros. Dessa forma, para a obtenção de um banco de dados confiável, para realização da operação em tempo real, é necessário que as medidas sejam filtradas. A ferramenta utilizada nos centros de operação, para realizar essa filtragem, é o estimador de estado.

Importa destacar que o processo de estimação de estado em SEP (EESep) foi inicialmente proposto no começo da década de 70, por SCHWEPPE e colaboradores (SCHWEPPE; WILDES; RON, 1968; SCHWEPPE; WILDES, 1970; e SCHWEPPE; RON, 1970;), passando a ser alvo de inúmeras pesquisas.

A estimação de estado consiste na obtenção, em tempo real, das variáveis de estado de um SEP, a partir do processamento das seguintes informações: medidas analógicas² obtidas em tempo real, provenientes do Sistema de Aquisição e Supervisão de Dados (SCADA do inglês, *Supervisory Control and Data Acquisition*); parâmetros dos elementos do SEP³, disponíveis no banco de dados das companhias de energia elétrica; e topologia atual do SEP, obtida previamente pelo configurador de rede. A função do configurador de redes é determinar, em tempo real, a topologia atual da rede e a correspondente configuração de medidores, no modelo barra-ramo (MONTICELLI, 1999).

Analizando a bibliografia especializada (MONTICELLI, 1999; ABUR e EXPOSITO, 2004), verifica-se que a maioria das pesquisas desenvolvidas, tratando do processo EESep, faz uso do modelo por - fase, ou monofásico (modelo de sequência positiva), que é mais simples do que o modelo trifásico.

No modelo por - fase considera-se que as cargas são balanceadas e as redes equilibradas, ou seja, admite-se a hipótese de sistema equilibrado, onde as grandezas elétricas nas fases apresentam a mesma magnitude, porém com defasagem angular de 120°, e os parâmetros da rede trifásica, bem como as cargas, sejam equilibrados.

1 Tensões complexas nas barras.

2 Usualmente são medidas de fluxo de potência ativa e reativa nas linhas, injeção de potência ativa e reativa e algumas magnitudes de tensão nas barras.

3 Impedância de linhas de transmissão, posição de taps de transformadores, etc.

A consideração de um equivalente monofásico é adequada para maioria dos sistemas de transmissão, em extra-alta e ultra-alta tensão (extra-alta tensão para tensões entre 230 e 750 kV e ultra-alta tensão para as tensões superiores a 750 kV), isto porque, tais sistemas possuem como características linhas simétricas e cargas balanceadas.

Entretanto, em situações que os desbalanços nas cargas e os desequilíbrios na rede são bastante acentuados, inviabiliza a utilização do modelo por – fase (HANSEN e DEBS, 1995; ZHONG e ABUR, 2002; MELIOPOULOS et al., 2005; ALMEIDA et al., 2006ab; STEFOPOULOS et al., 2007), pois, em virtude das simplificações, o estimador de estado poderia convergir para um estado incorreto.

Vale apenas destacar que os desbalanços nas cargas aparecem principalmente nos sistemas de distribuição e ocorrem em virtude da impossibilidade de distribuir uniformemente as cargas entre os alimentadores, bem como em virtude da presença de cargas monofásicas e bifásicas. Por outro lado, os desequilíbrios na rede são mais acentuados nos sistemas de transmissão, causados, por exemplo, pela não-transposição das fases das linhas (HANSEN e DEBS, 1995).

Tendo em vista que a modelagem trifásica possibilita um grau de detalhamento maior que a modelagem por – fase, a mesma permite a obtenção de estimativas mais precisas para as variáveis de estado. Além disto, ressalta-se o fato de a modelagem trifásica possibilitar o tratamento, sem distinção, dos sistemas de distribuição e transmissão. Dessa forma, um estimador de estado trifásico pode ser aplicado simultaneamente, para ambos os sistemas, nos diversos níveis de tensão da rede.

Além das vantagens supracitadas do estimador de estado trifásico, em relação ao monofásico, em (HANSEN e DEBS, 1995) destacam-se: melhor entendimento do estado de operação corrente, tendo em vista a melhor precisão das estimativas obtidas; detecção de desbalanceamentos prejudiciais ao sistema; processamento de medidas com erros grosseiros (EGs)⁴ mais eficiente, devido à diminuição de erros sistemáticos de modelagem; e, determinação de perdas devido ao desbalanceamento das cargas.

Face ao exposto, torna-se necessário o desenvolvimento de pesquisas tratando das diversas etapas do processo de EESEP, considerando a modelagem trifásica da rede. A primeira etapa do processo de EESEP é a obtenção da topologia do sistema, que se realiza a partir de medidas lógicas, realizadas continuamente consistindo em estados de

⁴ Diz-se que uma medida é portadora de EG, quando apresenta grau de imprecisão muito maior do que é suposto no modelo de medição. Mais precisamente, uma medida é portadora de EG se a mesma desvia do seu valor “verdadeiro” de, no mínimo, três vezes o seu desvio padrão.

chaves e disjuntores (PIERETI et al., 2007). Uma vez obtida a topologia do sistema, o próximo passo é verificar se é possível, através do conjunto de medidas analógicas disponível, determinar todas as variáveis de estado do sistema. Em caso afirmativo, o sistema dir-se-á observável (MONTICELLI et al., 1985a; BRETAS, 1996; BENEDITO et al., 2008). Caso contrário, a falta de medidas pode ser suprida por pseudo-medidas⁵, através das quais o sistema se torna observável como um todo. Sendo o sistema observável, a partir da topologia do sistema e dos seus parâmetros, bem como do conjunto de medidas analógicas disponível, realiza-se a estimação de estado propriamente dita. Entretanto, em razão de as medidas analógicas estarem sujeitas a EGs, que podem inviabilizar todo o processo de estimação de estado, é necessário detectar e identificar medidas com EGs, pois estas medidas devem ser eliminadas e as variáveis de estado estimadas novamente.

Em razão de não ser possível detectar a ocorrência de EGs em medidas críticas⁶, nem mesmo identificar tais erros em conjuntos de medidas que apresentam resíduos normalizados idênticos, denominados conjuntos críticos de medidas, é fundamental que o nível de redundância das medidas seja tal que garanta a não presença das medidas críticas e dos conjuntos críticos de medidas. Logo, justifica-se o interesse em identificar tais medidas, no sentido de projetar sistemas de medição isentos de medidas críticas e de conjuntos críticos de medidas (SOUZA et al., 2005; COSER et al., 2006; VIGLIASSI et al., 2009).

1.2 Objetivos

Conforme mencionado anteriormente, a análise de observabilidade em SEP constitui um tópico fundamental no contexto de estimação de estado, permitindo verificar se é possível determinar as variáveis de estado, nas barras do sistema supervisionado, por meio do conjunto de medidas disponível. Foi visto também, que para obtenção de uma operação segura dos SEP desbalanceados e/ou desequilibrados, é necessário a utilização de uma modelagem trifásica do SEP, em razão de a mesma considerar os desbalanços nas cargas, os desequilíbrios na rede e a não transposição das linhas.

⁵ Pseudo-medidas são dados de previsão de carga, previsão de geração, dados históricos, etc., que fazem parte do banco de dados dos centros de operação.

⁶ Medida crítica é a medida que, quando perdida, faz um sistema de potência observável tornar-se não observável.

Dentre os estimadores de estado trifásicos já desenvolvidos, destaca-se, a nosso ver, o estimador por mínimos quadrados ponderados proposto em (ZHONG e ABUR, 2002; ALMEIDA et al., 2006b), isto em razão de o mesmo considerar os efeitos dos acoplamentos mútuos das linhas de transmissão, os desbalanços nas cargas e a não transposição das linhas.

Sendo assim, a partir da formulação do estimador trifásico proposto em (ZHONG e ABUR, 2002; ALMEIDA et al., 2006b), propõe-se, neste trabalho de dissertação, o desenvolvimento e implementação de uma metodologia para análise e restauração de observabilidade e identificação de medidas críticas e de conjuntos críticos de medidas, a partir da fatoração triangular da matriz Jacobiana associada a um sistema trifásico de medição, que seja simples, de execução rápida, de fácil implementação e que não exija a solução de equações lineares.

Para desenvolvimento da metodologia proposta utilizar-se-á como base a metodologia desenvolvida por LONDON Jr. et al., (2007). Isto em razão de a mesma possibilitar, de forma bastante eficiente, análise e restauração da observabilidade, bem como identificação de medidas críticas e de conjuntos críticos de medidas. Porém, vale lembrar que tal metodologia foi desenvolvida para modelagem monofásica do processo de EESEP. Conseqüentemente, o que está sendo proposto é a extensão, da metodologia proposta em LONDON Jr. et al., (2007), para modelagem trifásica do processo de EESEP.

Propõe-se ainda a extensão do conceito de observabilidade topológica, desenvolvida para modelagem monofásica, para modelagem trifásica do problema de estimação de estado.

1.3 Organização da dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em 7 capítulos.

No Capítulo 2, apresenta-se uma revisão bibliográfica do processo de EESEP, apresentando a formulação matemática do problema de estimação de estado. Importa ressaltar ainda que, no Capítulo 2, destacar-se-ão metodologias desenvolvidas para o tratamento das diversas etapas do processo de EESEP.

No Capítulo 3, apresenta-se a metodologia para análise de observabilidade e redundância de medidas desenvolvida em (LONDON Jr. et al., 2007). Os modelos trifásicos dos componentes da rede, bem como a extensão da metodologia proposta por LONDON Jr. (2007) para sistemas trifásicos, estão descritas no Capítulo 4.

No Capítulo 5, apresentam-se os resultados da aplicação da metodologia proposta nesta dissertação de mestrado.

No Capítulo 6, o conceito de observabilidade topológica, desenvolvida para modelagem monofásica do problema de estimação de estado, será estendido para modelagem trifásica.

E, por fim, no capítulo 7, apresentam-se as conclusões deste trabalho, bem como as sugestões de trabalhos futuros.

Capítulo 2

2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo, destacam-se alguns dos principais trabalhos tratando do processo de EESEP, apresentando definições e conceitos da área. No que se refere ao processo de estimação de estado trifásico, apresentar-se-ão as ideias principais de alguns trabalhos relevantes, mas a formulação trifásica dos componentes da rede elétrica e o processo de estimação de estado trifásico serão apresentados no capítulo 4.

2.1 Estimação de Estado monofásica em Sistemas Elétricos de Potência

Conforme já visto, no capítulo 1 desta dissertação, a estimação de estado consiste na obtenção, em tempo real, das variáveis de estado de um SEP. O processo de estimação de estado pode ser estático ou dinâmico.

A estimação de estado estática, abordada neste trabalho, pode ser considerada uma generalização do problema clássico de fluxo de carga (HANDSCHIN et al., 1975). Já o estimador dinâmico considera as relações entre as grandezas em instantes de tempo diferentes.

Em (COUTTO FILHO; SOUZA, 2009) apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre estimadores de estado que utilizam informações obtidas previamente, conhecidos, de uma forma geral, como estimadores dinâmicos de estado ou estimadores FASE (do inglês, Forecasting-Aided State Estimators).

O estimador de estado calcula as variáveis de estado desconhecidas por meio de um conjunto de medidas não exatas. Logo, o resultado obtido para as variáveis de estado desconhecidas também não será exato.

Dessa forma, o problema de estimação de estado consiste em encontrar uma maneira de atingir-se a melhor estimativa das variáveis de estado desconhecidas. Um dos primeiros estimadores de estado aplicado em SEP foi o Estimador por Mínimos Quadrados Ponderados (em inglês: WLS - *Weighted Least Squares*), associado ao teste

do maior resíduo normalizado, para detecção e identificação de EGs (HANDSCHIN et al., 1975). Em seguida, outros estimadores de estado, estatisticamente mais robustos que o Estimador WLS associado ao teste do maior resíduo normalizado, foram aplicados em SEP, como, por exemplo, o Estimador de Máximo Valor Absoluto Ponderado (ABUR e CELIK, 1991) e o Estimador de Mínima Mediana do Resíduo ao Quadrado (MILI et al., 1991).

Em razão da simplicidade da sua formulação, bem como da facilidade da sua implantação em computador, o Estimador WLS associado ao teste do maior resíduo normalizado é o mais utilizado na prática (MONTICELLI, 1999; ABUR e EXPÓSITO, 2004).

2.1.1 Estimador monofásico por mínimos quadrados ponderados

Neste estudo admite-se que não existam erros nos parâmetros do modelo, sendo o modelo para Estimação de Estado representado pela Figura 2.1, abaixo:

Figura 2.1: Modelo para Estimação de Estado

As medidas analógicas e as variáveis de estado de um SEP (tensões complexas nas barras do SEP) estão relacionadas através do seguinte modelo de medição:

$$z = h(x_v) + w \quad (2.1)$$

em que:

“ z ” é o vetor de medidas ($m \times 1$), sendo m o número total de medidas efetuadas;

“ $h(.)$ ” o vetor de funções não lineares, que relaciona as medidas com as variáveis de estado, também com dimensão ($m \times 1$) (equações do fluxo de potência);

“ x ” o vetor de variáveis de estado verdadeiros com dimensão $(2n-1)$, isto porque no processo de estimação de estado, deve-se escolher uma das barras do sistema como referência angular, justificando assim a razão do termo “-1” na dimensão do vetor de variáveis de estado;

“w” o vetor dos erros nas medidas ($m \times 1$), que são considerados como variáveis aleatórias independentes, com distribuição Gaussiana de média zero e matriz de covariância do erro da medida W ($m \times n$) dada por (2.2), sendo “m” e “n” o número de medidas e o de barras do sistema, respectivamente.

$$W = \begin{vmatrix} \sigma_1^2 & & & \\ & \sigma_2^2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \sigma_m^2 \end{vmatrix} \quad (2.2)$$

sendo que:

σ_i^2 : Variância do erro da medida z_i .

Os valores de σ_i^2 dependem da precisão dos aparelhos de medição e do sistema de teletransmissão.

Aplicando a teoria do Mínimos Quadrados Ponderados, a melhor estimativa do vetor de variáveis de estado, aqui designado por $\hat{x}$, pode ser obtida, determinando-se o valor de x que minimize o índice $J(x)$ (SIMÕES-COSTA; SALGADO, 2002), dado por:

$$J(x) = \frac{1}{2} w^t W^{-1} w \quad (2.3)$$

ou

$$J(x) = \frac{1}{2} [z - h(x)]^t W^{-1} [z - h(x)] \quad (2.4)$$

sendo W^{-1} o inverso da matriz de covariância das medidas.

Para aplicar a teoria de Minimos Quadrados Ponderados, conforme mencionado, faz-se necessário minimizar a função objetivo $J(x)$, conforme equação (2.5):

$$\frac{\partial J(x)}{\partial x} = 0 \quad (2.5)$$

ou

$$H'(\hat{x})W^{-1}[z - h(\hat{x})] = 0 \quad (2.6)$$

sendo $H(\hat{x})$ a matriz de primeiras derivadas das funções não lineares do vetor $h(x)$, calculada no ponto representado pelo vetor de variáveis de estado estimado $\hat{x}$, conhecida como matriz Jacobiana, representada pela equação a seguir:

$$H(\hat{x}) \triangleq \left. \frac{\partial h(x)}{\partial (x)} \right|_{x=\hat{x}} \quad (2.7)$$

A estimativa WLS do vetor $\hat{x}$ é obtida de forma recursiva, através do cálculo da matriz Jacobiana, e da solução do seguinte conjunto de equações (algoritmo iterativo Gauss-Newton) (SCHWEPPE e WILDES, 1970):

$$G(x^k) \cdot (\Delta x^k) = H'(\hat{x}^k) \cdot W^{-1} \cdot [z - h(\hat{x}^k)] \quad (2.8)$$

denominada **Equação Normal**, e obtêm-se:

$$x^{k+1} = x^k + \Delta x^k \quad (2.9)$$

sendo $k = 0, 1, 2, \dots$ até que o critério de parada seja atingido e x^k o valor de x na iteração k .

A matriz ganho (G) é expressa por:

$$G(x^k) = H'(x^k) \cdot W^{-1} \cdot H(x^k) \quad (2.10)$$

o processo iterativo termina quando $|x^{k+1} - x^k|$ for menor que um valor pré-estabelecido.

2.1.2 Estimador de Estado Linearizado

O Estimador de Estado Linearizado (EEL), apesar de baixo interesse em aplicações práticas, tem importância considerada nos estudos de observabilidade e redundância de medidas.

As hipóteses simplificadoras em que se baseia, transformam o problema de estimação para uma forma não-iterativa, tornando fácil o entendimento das questões relacionadas à observabilidade e redundância de medidas.

O EEL baseia-se nas equações de fluxo de carga linear, onde as perdas são desprezadas e todas as magnitudes de tensão são consideradas iguais a $1p.u.$ Em função dessas aproximações, o fluxo de potência ativa entre as barras k e m , e a injeção de

potência ativa na barra k , são calculados, respectivamente, pelas seguintes expressões (MONTICELLI, 1983):

$$P_{km} = \frac{\theta_k - \theta_m}{x_{km}} \quad (2.11)$$

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_k} \left(\frac{\theta_k - \theta_m}{x_{km}} \right) \quad (2.12)$$

Sendo que:

θ_k e θ_m : os ângulos de tensão nas barras k e m respectivamente;

x_{km} : reatância da linha de transmissão entre as barras k e m ;

Ω_k : conjunto das barras vizinhas à barra k .

Na formulação linear, o modelo de medição, apresentado na seção 2.1.1, torna-se (MONTICELLI, 1999):

$$\tilde{z} = \tilde{H} \theta_v + \tilde{w} \quad (2.13)$$

sendo que:

θ_v : vetor de variáveis de estado verdadeiras ($n_\theta \times I$), correspondendo, na formulação linear, aos ângulos de fase de tensão nas barras do sistema;

$\tilde{z}$: vetor de medidas de potência ativa ($m_p \times I$);

$\tilde{H}$: matriz Jacobiana ($m_p \times n_\theta$);

$\tilde{w}$: vetor de erros das medidas de potência ativa ($m_p \times I$)

m : número de medidas de potência ativa;

n : número de ângulos de tensão a serem estimados.

Vale ressaltar que no caso não linear, a equação (2.8) representa o sistema linear a ser resolvido, a cada iteração, para a determinação do vetor incremento Δx . Pode-se dizer então que, em cada iteração associada à solução do estimador não linear, resolve-se um estimador linear.

A estimação do vetor de estado θ , designada por $\hat{\theta}$, é o valor de θ que minimiza o índice $J(\theta)$, dado por:

$$J(\theta) = \tilde{w} W^{-1} \tilde{w} = [\tilde{z} - \tilde{H}(\theta)]' W^{-1} [\tilde{z} - \tilde{H}(\theta)] \quad (2.14)$$

logo,

$$\hat{\theta} = [\tilde{H}'(\theta)W^{-1}\tilde{H}(\theta)]^{-1}\tilde{H}'(\theta)W^{-1}\tilde{z} \quad (2.15)$$

2.1.3 Processamento de Erros Grosseiros

Conforme observado anteriormente, quando as medidas analógicas apresentam imprecisão muito maior do que o esperado, dizemos que possuem EGs. Os EGs podem levar o processo de estimação à variáveis de estado não "verdadeiros", ou, até mesmo, a não convergência.

Desta forma, o estimador de estado deve ser robusto o suficiente para detectar e identificar a ocorrência de medidas com EGs. Na estimação de estado as medidas portadoras de EGs são aquelas com erros maiores do que o suposto no modelo de medição. Esses erros podem ter várias causas, tais como problemas nos canais de comunicação e instrumentos de medição defeituosos ou sem calibração.

Os EGs podem ser de três tipos (ABUR e EXPÓSITO, 2004):

1. EGs simples (apenas uma medida é portadora de EG);
2. EGs múltiplos (várias medidas são portadoras de EGs);
 - EGs múltiplos não interativos
 - EGs múltiplos interativos
 - ✓ Conformativos e não conformativos

Conceitualmente, uma medida possui EG se ela está em desacordo com as demais medidas disponíveis para estimação de estado. A verificação da existência de erro em uma medida depende do estado estimado para a rede sem a presença da medida avaliada. Porém, tal avaliação exigiria um esforço computacional inviável. Por isso foram desenvolvidos métodos indiretos que possibilitam a detecção e identificação de EGs a partir da análise dos resíduos do estimador de estado WLS.

A detecção de EGs pode realizar-se através da análise do índice $J(\hat{x})$, isto é, da função a tornar-se mínima em (2.5). Admitindo a hipótese de que o vetor dos erros nas medidas possua distribuição normal, caso não haja nenhuma medida com EG, em (HANDASCHIN et al., 1975) demonstrou-se que o índice $J(\hat{x})$ apresenta uma distribuição Qui-quadrada (χ^2), com $m-N$ graus de liberdade, sendo m e N os números de medidas disponíveis e de variáveis de estado a serem estimadas respectivamente.

Escolhendo uma possibilidade “1- α ” de falso alarme, sendo “ α ” o nível de significância do teste, determina-se o parâmetro “C”, que é utilizado para detectar a

existência de EGs, da seguinte forma: se $J(\hat{x}) > C$, rejeita-se a hipótese de que não haja EG; e se $J(\hat{x}) \leq C$, aceita-se a mesma.

Outro caminho para detecção de EGs é por meio da análise dos resíduos normalizados. Admitindo a mesma hipótese de que o vetor de erros nas medidas possua distribuição normal, caso não haja medida com EG, calcula-se o vetor dos resíduos r através da seguinte equação:

$$r = z - h(\hat{x}) \quad (2.16)$$

Em seguida, o mesmo é normalizado e submetido a um teste de validação:

$$r_{(i)}^N = \frac{|r(i)|}{\sqrt{\Omega(i,i)}} \leq \lambda(threshold) \quad (2.17)$$

onde $\sqrt{\Omega(i,i)}$ é o desvio padrão do i -ésimo componente do vetor dos resíduos; e

$$\Omega = W - H(\hat{x}) \cdot [H^T(\hat{x}) \cdot W^{-1} \cdot H(\hat{x})]^{-1} \cdot H^T(\hat{x}) \quad (2.18)$$

é a matriz covariância dos resíduos; α é o limite de identificação e depende de níveis de probabilidade aceitáveis de falso-alarme e de não identificação (usualmente $\alpha = 3$) (ABUR e EXPÓSITO, 2004).

Define-se $r_{(i)Max}^N$ o maior resíduo normalizado. Se $r_{(i)Max}^N > \alpha$, a medida “ i ” correspondente é portadora de EG.

Vale ressaltar que, para possibilitar o processamento de EGs é necessário que o nível de redundância local das medidas seja tal que garanta a ausência de medidas críticas e de conjuntos críticos de medidas. Isto em razão de não ser possível, através da análise dos resíduos, detectar EGs em medidas críticas (apresentam resíduos iguais a zero), nem mesmo identificar EGs em medidas que fazem parte de conjuntos críticos de medidas (quando uma das medidas de um conjunto crítico é portadora de EG todas apresentarão o mesmo resíduo normalizado).

2.1.4 Observabilidade de Sistemas Elétricos de Potência

O problema de observabilidade, no contexto de EESEP, consiste em verificar se é possível estimar todas as variáveis de estado do SEP através das medidas virtuais e analógicas disponíveis.

Os métodos para análise de observabilidade são aplicados tanto na fase de projeto de sistemas de medição, quanto durante a operação do sistema. Na fase de projeto, os mesmos indicam onde devem ser instalados novos medidores para que o

sistema seja observável como um todo. Aplicando durante a operação do sistema, ou seja, aplicação *on-line*, verifica a observabilidade do sistema para cada amostra de medidas que se torna disponível para a realização da estimação de estado. Nesse momento, os métodos de observabilidade são utilizados, normalmente, para analisar e restaurar a observabilidade do sistema via pseudo-medidas (KRUMPHOLZ et. al, 1980).

CLEMENTS e WOLLENBERG (1975), investigaram as condições mínimas para observabilidade de um sistema, utilizando a sua topologia e as Leis de Kirchhoff. Introduziram o conceito de ilhas observáveis e propuseram um algoritmo heurístico. Embora o algoritmo não pudesse ser utilizado em tempo-real, forneceu base para elaboração dos conceitos de observabilidade algébrica, topológica e numérica apresentados em (KRUMPHOLZ et al., 1980) e definidos em função da formulação do estimador de estado WLS, apresentada na seção (2.1.1):

Observabilidade Algébrica – analisando a formulação do estimador de estado WLS apresentada na seção 2.1.1, verifica-se que para resolver a equação normal, equação (2.10), e obter um único vetor $\hat{x}$, a matriz Ganho ($G(x) = H^T(x^k).W^{-1}.H(x^k)$) tem que ser não singular, isto é, tem que ter posto igual ao número de variáveis de estado a serem estimadas. Tendo em vista que a matriz W é uma matriz diagonal não singular, tem-se que para um sistema ser observável a matriz Jacobiana ($H(X)$) tem que ter posto igual ao número de variáveis de estado a serem estimados. Neste caso, o sistema dir-se-á “algebricamente” observável;

Observabilidade Numérica – um SEP é dito “numericamente” observável, com relação a um conjunto de medidas, se for possível fazer uma estimativa para o vetor de variáveis de estado, através da solução iterativa da equação normal (2.10), partindo do flat start (valores iniciais iguais a I_{pu} para os módulos e 0 radianos para os ângulos das tensões nodais);

Observação: Para que a equação normal tenha solução é necessário que a matriz Jacobiana H tenha posto igual ao número de variáveis de estado a serem estimadas, ou seja, é necessário que o sistema seja algebricamente observável. Porém, para ser numericamente observável, a matriz H deve ser numericamente bem condicionada, ou seja, distante o bastante da sua região de singularidade. Esta última característica é que estabelece o conceito de observabilidade numérica. Portanto, embora a

observabilidade numérica assegure a observabilidade algébrica, nem sempre se verifica a recíproca.

Observabilidade Topológica – o conceito de observabilidade topológica baseia-se na relação entre o grafo de “medição” e o grafo da rede, cujas arestas representam as linhas de transmissão e vértices representam as barras do sistema. De acordo com essa relação, um SEP é "topologicamente" observável, com relação a um conjunto de medidas, unicamente se existir, associada a tal sistema, uma árvore geradora de posto completo (árvore geradora é uma árvore abrangendo todas as barras da rede; uma árvore é de posto completo, se for possível atribuir-se-lhe a cada ramo, pelo menos uma medida distinta). No capítulo 6, apresenta-se de forma mais detalhada o conceito de observabilidade topológica.

Fazendo um uso do conceito de observabilidade topológica, (QUINTANA et al., 1982a) propuseram um algoritmo baseado na teoria de "Matroid Intersection", que é uma forma diferenciada de representar grafos.

Tendo em vista que os métodos topológicos, ou seja, baseados na definição de observabilidade topológica, exigem a construção de uma árvore representativa de posto completo, os mesmos requerem rotinas específicas, que não exigem cálculos numéricos, mas que são de natureza combinatória e complexa. Com essa argumentação, desenvolveram-se diversos métodos numéricos.

O método numérico proposto por MONTICELLI e WU (1985ab), baseia-se na fatoração triangular da matriz ganho. No caso em que o sistema não é observável como um todo, para proceder à identificação das ilhas observáveis ou a restauração de observabilidade (via pseudo-medidas), tal método requer a solução de equações algébricas.

Na tentativa de diminuir a quantidade de cálculos necessários em (BRETAS, 1996) foi proposto um método para análise de observabilidade que também se baseia na fatoração triangular da matriz Ganho. Entretanto, fazendo uso do conceito de caminhos de fatoração (TINNEY et al., 1985), o mesmo não requer a solução de sistemas de equações algébricas.

Em razão de a matriz Jacobiana ser melhor condicionada numericamente que a matriz Ganho, em (MONTICELLI e WU, 1986) foi desenvolvido um método para análise de observabilidade através da fatoração triangular da matriz Jacobiana, H . Em razão de ser uma extensão da metodologia proposta em (MONTICELLI e WU, 1985ab), o método proposto em (MONTICELLI e WU, 1986) exige a solução de equações

algébricas. Deve-se destacar, também, que em (FALCÃO, D.M.; ARIAS, M.A., 1994) foi proposto um método que possibilita a análise de observabilidade e identificação de medidas críticas, através da fatoração triangular da matriz H . Porém, tal método não identifica ilhas observáveis.

LONDON JR. et al., (2007) propuseram um método que possibilita, de uma forma simples e rápida, a análise e restauração da observabilidade (através de pseudomedidas críticas), bem como a atualização das características qualitativas de um conjunto de medidas, quando uma ou mais medidas são perdidas. Tal método baseia-se na análise da estrutura da chamada matriz H_{Δ} , obtida por meio da fatoração triangular da matriz Jacobiana do estimador WLS. Esse método é apresentado no capítulo 3.

Em (CASTILLO et al., 2006) apresentou-se uma nova técnica algébrica para identificação de ilhas observáveis e restauração da observabilidade, baseada nos cálculos de espaços nulos da matriz Jacobiana, através de transformações ortogonais.

Através da fatoração triangular da matriz de Gram, obtida a partir do produto da matriz Jacobiana pela sua transposta, em (ALMEIDA et al., 2008) desenvolveu-se um método para análise e restauração de observabilidade (via pseudo-medidas críticas). Desenvolveu-se, também, um método para identificar ilhas observáveis baseado na mínima norma.

Dando continuidade às pesquisas realizadas por BRETAS (1996) e LONDON JR. et al., (2007), em (BENEDITO; LONDON; BRETAS, 2009) desenvolveu-se um método para análise de observabilidade e identificação de ilhas observáveis, baseado na fatoração triangular da matriz H_{Δ}^t e no conceito de caminhos de fatoração. Deve-se destacar que esse método apresenta características apropriadas à operação em tempo real, tais como rapidez e simplicidade para implementação, além de não exigir a solução de equações algébricas.

Vale destacar também, que nos últimos anos, vêm sendo apresentadas diversas propostas para a inclusão de medidas fasoriais, visando à melhoria do processo de EESEP. Trabalhos publicados nessa área (THORP et al., 1985. PHADKE et al., 1986; ZHOU et al., 2006; LONDON JR. et al., 2009) demonstram que quando as medidas fasoriais são adicionadas às medidas convencionais, no processo de EESEP, a precisão do estimador é aumentada.

2.1.5 Medidas Críticas e Conjuntos Críticos de Medidas

A redundância das medidas aferidas é de suma importância para o sucesso do processo de EESEP, independentemente do estimador utilizado. Redundância é importante não apenas para garantir a observabilidade do SEP, mas também para possibilitar a detecção e identificação de EGs. Eis a razão do desenvolvimento de diversas pesquisas relacionadas ao tema.

Em termos de redundância de medidas, os conceitos de medida crítica (MC) e conjunto crítico de medidas (CCM), introduzidos nos trabalhos apresentados em (CLEMENTS; KRUMPHOLZ; DAVIS, 1981; MILLI; VAN CUTSEM; RIBBENS-PAVELLA, 1984), são de suma importância:

Definição 1: Medida Crítica (MC) é à medida que, se retirada do conjunto de medidas de um sistema observável, torna o mesmo não observável.

Definição 2: Conjunto Crítico de Medidas (CCM) é o conjunto de medidas formado por medidas não críticas, em que a eliminação de uma medida qualquer, a ele pertencente, torna as demais medidas críticas.

Os métodos para identificação de MCs e CCMs podem ser divididos, assim como os desenvolvidos para análise de observabilidade, em Topológicos (CLEMENTS; KRUMPHOLZ; DAVIS, 1981; BRETAS et al., 2005; COSTA; PIAZZAM; MANDEL, 1990) e Numéricos (COUTTO FILHO et al., 2001; KORRES; CONTAXIS, 1991ab; LONDON Jr. et al., 2007).

Com base nos conceitos topológicos, a medida crítica é aquela cuja remoção impossibilita a obtenção de uma árvore geradora de posto completo do grafo da rede.

Os algoritmos topológicos utilizam o conceito de observabilidade topológica. Apesar de não exigirem cálculos numéricos, eles apresentam natureza combinatória, exigindo rotinas específicas que geram grandes esforços computacionais.

Em (BRETAS et al., 2005), foi proposto um novo método topológico para identificação de MCs. Neste método explora-se a natureza das medidas (fluxo e injeção), de forma a reduzir as possibilidades de busca, evitando assim a chamada "explosão combinatória". Entretanto, o método não possibilita a identificação de CCMs.

Em (LONDON Jr. et al., 2007) foi proposto um método para tratamento das características qualitativas de conjunto de medidas, para efeito de EESEP. O método permite a identificação de MCs e de CCMs de uma forma direta e simples. Os pontos

positivos do método proposto por LONDON Jr. et al., (2007), em relação aos já desenvolvidos para identificação de MCs e de CCMs, são os seguintes:

- (i) possibilita a identificação de CCMs de uma forma bastante direta, sem exigir busca baseadas na teoria de grafos;
- (ii) em relação aos métodos numéricos já desenvolvidos, a quantidade de cálculo necessária é bem menor, pois, não exige a obtenção da matriz de sensibilidade, nem mesmo de uma estimação de estado inicial. O método requer apenas a fatoração da matriz Jacobiana e, em seguida, a análise dos elementos não nulos que aparecem na matriz fatorada, que recebe o nome de matriz H_{Δ} (LONDON Jr. et al., 2007).

2.2 Processo de Estimação de Estado trifásica em Sistemas Elétricos de Potência

Já foi mencionado, no capítulo 1, que a maioria das pesquisas desenvolvidas, tratando do processo EESEP, faz uso do modelo por - fase, ou monofásico (modelo de sequência positiva), que é mais simples do que o modelo trifásico (MONTICELLI, 1999; ABUR e EXPOSITO, 2004).

No modelo por – fase, considera-se que as cargas são balanceadas e as redes equilibradas, ou seja, admite-se a hipótese de sistema equilibrado, onde as grandezas elétricas nas fases apresentam a mesma magnitude, porém com defasagem angular de 120° , e os parâmetros da rede trifásica, bem como as cargas, sejam equilibrados. Esse modelo é adequado para maioria dos sistemas de transmissão em extra-alta e ultra-alta tensão. Entretanto, em muitas situações os desbalanços nas cargas e os desequilíbrios na rede são bastante acentuados, inviabilizando a utilização do modelo por – fase (HANSEN e DEBS, 1995; ZHONG e ABUR, 2002; MELIOPOULOS et al., 2005); ALMEIDA et al., 2006ab; STEFOPOULOS et al., 2007).

Vale apenas destacar que os desbalanços nas cargas aparecem principalmente nos sistemas de distribuição e ocorrem em virtude da impossibilidade de distribuir uniformemente as cargas entre os alimentadores, bem como em virtude da presença de cargas monofásicas e bifásicas.

Com o intuito de desenvolver um estimador de estado para as redes de distribuição, muitas pesquisas utilizaram diretamente os métodos desenvolvidos para sistemas de transmissão, como por exemplo, em (BARAN e KELLEY, 1994). Entretanto, algumas características das redes de distribuições impossibilitam essa aplicação direta. Conforme apontado em (BARAN et al., 2009), uma das principais

características, que difere as redes de distribuição das redes de transmissão e dificultam a aplicação de um método de estimação de estado tradicional em Sistemas de Distribuição, é a pouca quantidade de medições disponíveis em tempo real. Além disso, vale lembrar que um Sistema de Distribuição é caracterizado por possuir:

- Estrutura radial ou fracamente malhada;
- É desbalanceado, em razão principalmente pela presença de cargas desbalanceadas e diferentes números de fases por circuito;
- Números altos de ramos e nós;
- Uma razão R/X elevada;
- Diferentemente do que ocorre em sistemas de transmissão, normalmente os estados de dispositivos seccionadores e de banco de capacitores, bem como a posição de taps de transformadores não são monitorados de forma direta.

Assim sendo, não é possível a aplicação direta das metodologias de estimação de estado desenvolvidas para os sistemas de transmissão nos sistemas de distribuição. Para isso, devem ser utilizadas diferentes técnicas, que façam uso da modelagem trifásica da rede e considerem diferentes tipos de medições.

Por outro lado, no que diz respeito aos desequilíbrios na rede, eles são mais acentuados nos sistemas de transmissão, causados, por exemplo, pela não-transposição das fases das linhas (HANSEN e DEBS, 1995).

Em virtude dessas características, não seria consistente a utilização de um estimador de estado que faz uso do modelo por fase, voltado para sistemas com essas características. Além disso, a modelagem trifásica possibilita um grau de detalhamento maior que a modelagem por – fase, permitindo assim a obtenção de estimativas mais precisas para as variáveis de estado. Ressalta-se também o fato de a modelagem trifásica possibilitar o tratamento, sem distinção, dos sistemas de distribuição e transmissão. Importa destacar ainda, que tendo em vista o interesse crescente pela monitoração em tempo-real dos sistemas de distribuição, haja vista o desenvolvimento e implantação das redes inteligentes (*Smart Grids*) (MELIOPOULOS, 2011), torna-se necessário o desenvolvimento de pesquisas tratando das diversas etapas do processo de estimação de estado, considerando a modelagem trifásica da rede.

Vale salientar que um estimador de estado considerando a modelagem trifásica dos componentes da rede pode ser aplicado simultaneamente, para ambos os sistemas (distribuição e transmissão), nos diversos níveis de tensão da rede.

Além das vantagens supracitadas do estimador de estado trifásico, em relação ao monofásico, em (HANSEN e DEBS, 1995) destacam-se: melhor entendimento do estado de operação corrente, tendo em vista a melhor precisão das estimativas obtidas; detecção de desbalanceamentos prejudiciais ao sistema; processamento de EGs mais eficiente, devido à diminuição de erros sistemáticos de modelagem; e, determinação de perdas devido ao desbalanceamento das cargas.

Face ao exposto, torna-se necessário o desenvolvimento de pesquisas tratando das diversas etapas do processo de EESEP, considerando a modelagem trifásica da rede. Nesse sentido vale destacar que alguns trabalhos descrevem o problema de estimação de estado trifásica de uma forma geral (HANSEN e DEBS, 1995), outros focam no problema de estimação trifásica em sistemas de distribuição (MELIOPOULOS e ZHANG, 1996; KE LI, 1996).

Deve-se destacar, entanto, que na maioria desses trabalhos desprezam-se os efeitos dos acoplamentos mútuos das linhas de transmissão, os desbalanços nas cargas e a não transposição das linhas de transmissão.

No contexto de estimação de estado trifásica, o desenvolvimento de metodologias para o tratamento de questões relacionadas à observabilidade e redundância de medidas é outro ponto de muita relevância.

Em (ALMEIDA et al., 2006a) apresenta-se uma adaptação, do algoritmo para análise de observabilidade apresentado em (MONTICELLI e WU, 1985ab), para modelagem trifásica. O algoritmo baseia-se na fatoração triangular da matriz Ganho e exige a solução de um sistema de equações algébricas. Em (ALMEIDA et al., 2006ab) foi apresentado também um algoritmo para alocação de pseudo-medidas para restauração da observabilidade trifásica, baseado na fatoração da matriz de Gram do conjunto de medidas. Posteriormente, os mesmos autores desenvolveram, em (ALMEIDA et al., 2009), um método para análise de redundância de medidas para estimação de estado trifásica, também baseado na obtenção e análise da matriz de Gram.

2.3 Conclusão

Conforme apresentado neste capítulo, são diversas as justificativas para o desenvolvimento de pesquisas tratando das diversas etapas do processo de EESEP considerando a modelagem trifásica da rede, dentre os quais se destacam: obtenção de estimativas mais precisas para as variáveis de estado, haja vista a modelagem trifásica possibilitar um grau de detalhamento maior que a modelagem por – fase; e possibilidade

de aplicação de um estimador de estado único para tratamento sem distinção dos sistemas de distribuição e transmissão.

Observou-se, também, que de uma forma geral, a ideia que norteia o desenvolvimento de técnicas numéricas para análise de observabilidade e de redundância de medidas é a obtenção de procedimentos de fácil implantação em computador, que exijam uma pequena quantidade de cálculos numéricos. Neste contexto, justifica-se então o objetivo deste trabalho de dissertação, que é estender, para modelagem trifásica da rede, a metodologia desenvolvida por LONDON Jr. et al., (2007) que possibilita análise de observabilidade e de redundância de medidas de uma forma bastante simples e direta, através da fatoração triangular da matriz Jacobiana do estimador WLS monofásico.

Capítulo 3

3 Análise de Observabilidade e de Redundância de Medidas, no Contexto de Estimação de Estado Monofásica, Através da Obtenção e Análise da Matriz H_{Δ}

Conforme apresentado no capítulo 1, o objetivo desta dissertação de mestrado é estender, para modelagem trifásica do processo de EESEP, a metodologia para análise e restauração da observabilidade e identificação de medidas críticas (MCs) e de conjuntos críticos de medidas (CCMs) proposta em (LONDON Jr. et al., 2007). Tal metodologia foi desenvolvida considerando a modelagem monofásica do processo de EESEP, e se baseia na análise e obtenção da matriz H_{Δ} . Importa destacar, que para a obtenção da matriz H_{Δ} , utiliza-se a formulação do estimador de estado linearizado.

Vale lembrar que a metodologia proposta em (LONDON Jr. et al., 2007) possibilita não apenas a análise das características qualitativas de conjunto de medidas supracitadas (análise e restauração de observabilidade e identificação de MCs e de CCMs), mas também a atualização dessas características em situações de perda de uma ou mais medidas. Porém, no contexto desta dissertação, importa apresentar apenas como essa metodologia possibilita a análise daquelas características qualitativas de conjunto de medidas.

Face ao exposto, este capítulo vai apresentar de forma sucinta a metodologia proposta em (LONDON Jr. et al., 2007), bem como um exemplo da sua aplicação no sistema de 6 barras do IEEE.

3.1 Introdução

Para possibilitar o entendimento da metodologia proposta em H_{Δ} (LONDON Jr. et al., 2007), faz-se necessário apresentar algumas definições.

Definição 3.1: Conjunto p-crítico de medidas é um conjunto de " p " medidas ($p \geq 1$), associadas a um SEP observável, que caso perdidas tornam tal sistema não observável (a remoção de qualquer conjunto de k medidas, pertencentes a um conjunto p-crítico, com $k < p$, não causa a perda da observabilidade do sistema).

Assim, como descrito em (LONDON Jr. et al., 2007), têm-se:

- Para $p = 1$, o conjunto p-crítico é uma medida crítica;
- Para $p = 2$, par crítico de medidas;
- Para $p = 3$, tri crítico; e assim por diante.

Definição 3.2: Uma medida tem Nível de Redundância (NR) igual a $(p-1)$, se o conjunto p-crítico com menor número de medidas a que ela pertencer possuir p medidas.

Considerando essa definição, uma MC possui $NR = 0$. Já uma medida não-crítica, que aparece em pelo menos um par crítico, possui $NR = 1$, e assim por diante.

Vale destacar que conjunto p-crítico não é, por definição, a mesma coisa que CCM, pois, de acordo com a sua definição, CCM é aquele constituído por medidas não-críticas, em que a eliminação de uma medida qualquer, a ele pertencente, torna as demais medidas críticas (KORRES e CONTAXIS, 1991). Assim, observa-se que um conjunto p-crítico será igual a um CCM, somente se ambos possuírem duas medidas, porquanto, a retirada de uma das medidas de um par crítico torna a outra crítica.

Para identificar os conjuntos p-críticos, a metodologia proposta em (LONDON Jr. et al., 2007) baseia-se nas relações de dependência linear das linhas da matriz Jacobiana. Face ao exposto, na próxima seção, apresentam-se algumas características dessa matriz.

3.2 Matriz Jacobiana

A matriz Jacobiana H relaciona as medidas analógicas aferidas com as variáveis de estado do sistema, que são os ângulos de fase (θ) e as magnitudes de tensão (V) nas barras. Usualmente as medidas analógicas utilizadas no processo de EESEP são as seguintes:

P_{km} - Fluxo de Potência ativa nas linhas;

Q_{km} - Fluxo de Potência reativa nas linhas;

P_k - Injeção de Potência ativa nas barras;

Q_k - Injeção de Potência reativa nas barras;

V_k - Magnitude de tensão nas barras;

Assim, pode-se representar a matriz Jacobiana da seguinte forma:

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta} & \frac{\partial P_{km}}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_{km}}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_{km}}{\partial V} \\ \frac{\partial P_k}{\partial \theta} & \frac{\partial P_k}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_k}{\partial V} \\ \frac{\partial V_k}{\partial \theta} & \frac{\partial V_k}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Conforme ilustrado na equação (3.1) as linhas e colunas da matriz H correspondem, respectivamente, às medidas e às variáveis de estado do SEP.

Através da definição de observabilidade algébrica, apresentada por KRUMPHOLZ et al., (1980), um SEP com n barras é observável se:

$$Posto(H) = 2n - 1, \quad (3.2)$$

sendo $(2n - 1)$ a dimensão do vetor de variáveis de estado a ser estimado.

Aplicando o desacoplamento do modelo, conhecido também como desacoplamento $P\theta - QV$, o qual se obtém considerando o fato de as sensibilidades

$\frac{\partial P}{\partial \theta}$ e $\frac{\partial Q}{\partial V}$ serem mais intensas que as sensibilidades $\frac{\partial P}{\partial V}$ e $\frac{\partial Q}{\partial \theta}$, pode-se realizar a análise de observabilidade separadamente. Desta forma, o sistema é $P\theta$ algebricamente observável, se:

$$Posto(H_\theta) = n - 1 \quad (3.3)$$

sendo que,

$$H_\theta = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta} \\ \frac{\partial P_k}{\partial \theta} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

e, $n-1$ o número de ângulos de fase a serem estimados, devido ao ângulo de uma das barras ser considerado como ângulo de referência. Admitindo o mesmo raciocínio, um sistema é dito QV algebricamente observável, se:

$$Posto(H_V) = n \quad (3.5)$$

sendo n o número de magnitudes de tensão a serem estimadas.

Admitindo-se a hipótese de as medidas de potência ativa e reativa sejam aferidas aos pares e que exista pelo menos uma medida de magnitude de tensão, o número de variáveis de estado a serem estimados para o modelo QV , é igual ao do modelo $P\theta$. Dessa forma, nas condições acima, se um SEP for $P\theta$ algebricamente observável será também QV algebricamente observável (KRUMPHOLS et al., 1981, MONTICELLI; WU, 1985a).

Conseqüentemente, para SEP atendendo as condições de medição supracitadas, a análise de observabilidade algébrica pode ser realizada considerando apenas o modelo ativo, ou modelo $P\theta$. Dessa forma, a condição para observabilidade algébrica será:

$$Posto(H) = n - 1 \quad (3.6)$$

3.3 Análise e Restauração da Observabilidade

Para verificar se o sistema em análise é observável como um todo, através da metodologia proposta em (LONDON Jr. et al., 2007), realiza-se a fatoração triangular da correspondente matriz H , que deve ser feita através de combinações lineares das colunas dessa matriz, que correspondem às variáveis de estado do sistema. Dessa forma, a matriz resultante desse processo de fatoração triangular vai relacionar as medidas aferidas com variáveis de estado equivalentes, que são combinações lineares das variáveis de estado do sistema.

Se o sistema em análise for $P\theta$ -observável, a fatoração triangular da correspondente matriz H resultará em apenas um pivô nulo, na diagonal (n,n) . Nessa situação, a última coluna da matriz fatorada será composta somente por zeros. Vale lembrar que, durante o processo de fatoração, permutações de linhas poderão ser necessárias para evitar possíveis pivôs nulos.

Entretanto, se o sistema não for observável como um todo, surgirá um pivô nulo no elemento diagonal (i,i) , durante a fatoração triangular, sendo $i < n$. Em tal situação não existirá elemento não-nulo nas demais linhas da matriz H que está sendo fatorada, na coluna do pivô nulo, indicando a falta de medida fornecendo informação da variável de estado equivalente, correspondente àquela coluna.

Quando o sistema não é observável como um todo, a metodologia proposta em (LONDON Jr. et al., 2007) permite restauração da observabilidade da forma apresentada a seguir.

Restauração da Observabilidade

Com o intuito de restaurar a observabilidade, efetua-se uma busca por pseudo-medida que forneça informação da variável de estado equivalente correspondente à coluna do pivô nulo. Isto é feito através dos fatores triangulares, obtidos durante o processo de fatoração da matriz H .

A busca por pseudo-medidas pode ser resumida nas seguintes diligências:

- i) Cria-se uma nova linha na matriz H , que está sendo fatorada, onde a primeira pseudo-medida disponível será armazenada;
- ii) Aplicam-se os fatores triangulares a essa nova linha;
- iii) Se aparecer um elemento não nulo, na coluna do pivô nulo, na nova linha, e porque a correspondente pseudo-medida fornece a informação necessária à restauração da observabilidade.

Destaca-se que, através do procedimento aludido, garante-se que a restauração da observabilidade se realizará através de pseudo-medidas críticas.

Como a condição para a observabilidade algébrica é que o posto da matriz Jacobiana H seja $n-1$, pode-se afirmar que as MCs correspondem às linhas linearmente independentes dessa matriz. Seguindo o mesmo raciocínio, as p medidas que constituem um conjunto p -crítico correspondem as p linhas da matriz H , que, caso retiradas simultaneamente, fazem com que o posto da matriz H diminua de uma unidade. Contudo, a retirada simultânea de quaisquer $(p - 1)$ medidas um conjunto p -crítico não reduz o posto da matriz H .

Considerando essas propriedades, a idéia que norteia a metodologia proposta em (LONDON Jr. et al., 2007) é identificar os conjuntos p -crítico de medidas através da análise das relações de dependência linear entre as linhas da matriz H , que correspondem às medidas aferidas no SEP. Entretanto, tais relações são de difícil análise através da estrutura da matriz H . Contudo, em (LONDON Jr. et al., 2007) demonstrou-se que essas análise tornam-se bastante simples se executadas através da análise da matriz H_{Δ} , obtida a partir da fatoração triangular da matriz H .

Ao invés de apresentar a estrutura da matriz H_{Δ} , obtida a partir da fatoração triangular da matriz H , apresenta-se, a seguir, a estrutura da matriz H_{Δ}^t , que é obtida a

partir da fatoração triangular da transposta da matriz H . Isto porque trabalhando com as matrizes transpostas, torna-se mais fácil implementar a metodologia proposta em (LONDON Jr. et al., 2007).

$$H_{\Delta}^t = \left[\begin{array}{ccc|ccc} 1 & & & & & \\ & \ddots & & & & \\ & & 1 & & & \\ 0 & \dots & & & \dots & 0 \end{array} \right] \Rightarrow H_{\Delta}^t = \left[\begin{array}{ccc|ccc} & I_{(n-1)} & & & R & \\ 0 & \dots & & \dots & 0 & \end{array} \right]$$

Sendo:

- $H_{\Delta}^t \Rightarrow$ matriz obtida a partir da fatoração triangular da matriz H^t ;
- $I_{(n-1)} \Rightarrow$ submatriz Identidade de dimensão $(n-1) \times (n-1)$;
- $R \Rightarrow$ submatriz de dimensão $(n-1) \times [m - (n-1)]$, composta por colunas linearmente dependentes das colunas da submatriz $I_{(n-1)}$;
- $m \Rightarrow$ número de medidas analógicas aferidas.

Vale ressaltar que a matriz H_{Δ}^t é obtida através de um processo de fatoração triangular da matriz H realizado a partir da combinação das linhas de H^t . Dessa forma, verifica-se então que a matriz H_{Δ}^t relaciona as medidas com variáveis de estado equivalentes, que são combinações lineares das variáveis de estado do sistema.

Analisando a estrutura da submatriz I , da matriz H_{Δ}^t , verifica-se que as suas $(n-1)$ colunas são, isoladamente, linearmente independentes. Em razão disto, as medidas correspondentes a essas colunas são chamadas de Medidas Básicas (MB), pois são suficientes para tornar o sistema em consideração observável (BARAN et al., 1995). As outras medidas são chamadas de Medidas Suplementares (MS).

Considerando a estrutura da matriz H_{Δ}^t , os seguintes lemas são formulados:

Corolário 3.3.1

Toda Medida Suplementar possui nível de redundância maior que 0.

Lema 3.3.1

Toda Medida crítica pertence ao conjunto de Medidas Básicas.

Lema 3.3.2

Todo conjunto p -crítico de medidas possui pelo menos uma Medida Básica.

A busca pelos conjuntos p -críticos de medidas é dividida em duas fases:

- (i) Identificação dos conjuntos p -críticos de medidas que contém apenas uma MB;
- (ii) Identificação dos conjuntos p -críticos de medidas que contém mais de uma MB.

A seguir será mostrado que a segunda fase é uma aplicação recursiva da primeira. Considere-se então, o seguinte Teorema, cuja demonstração é apresentada em (LONDON Jr. et al., 2007):

Teorema 3.3.1 *As p medidas, correspondentes às colunas dos p elementos não nulos, que pertençam a uma mesma linha da matriz H_{Δ}^t , formam um conjunto p -crítico de medidas, contendo apenas uma Medida Básica.*

Através do **Teorema (3.3.1)** verifica-se que, quando uma linha tem apenas um elemento não nulo, significa que a informação do estado equivalente, correspondente àquela linha, é fornecida apenas por uma medida, portanto, essa medida é crítica (tem NR igual a 0).

Para realizar a segunda fase da busca, utilizando as diretrizes do Teorema (3.3.2), elimina-se uma MB não-crítica da matriz H_{Δ}^t , para, em seqüência, proceder-se à obtenção da nova matriz H_{Δ}^t . Como a medida retirada é linearmente dependente de pelo menos uma MS, existe uma outra medida que pode substituí-la. Efetuando a substituição, obtém-se a nova matriz H_{Δ}^t . Analisando as linhas desta matriz, considerando o **Teorema (3.3.1)**, conclui-se que as p medidas, associadas aos novos conjuntos p -críticos identificados, constituem, juntamente com a MB que foi retirada, um conjunto $(p + 1)$ - crítico de medidas.

Aplicando-se esse processo a todas as MB, com NR maior ou igual a 1, identificam-se todos os conjuntos p -críticos, contendo duas MB. Continuando esse processo, eliminando conjuntos de “ b ” MB, com NR maior ou igual a b , todos os conjuntos p -críticos de medidas, com $p \geq (b + 1)$, contendo $(b + 1)$ MB, serão identificados.

3.4 Identificação de MCs e de CCMs

Conforme visto, para identificar as MCs, basta realizar uma busca das linhas de H_{Δ}^t , que possuem apenas um elemento não nulo, uma vez que as medidas correspondentes às colunas desses elementos são críticas.

Para realizar a identificação dos CCMs, as informações mais importantes que se obtêm, através das colunas de H_{Δ}^t , referem-se à identificação das MCs e dos pares críticos de medidas (PCs), constituídos por uma MB e uma MS. Considerando o que foi discutido acima, a identificação dos CCMs, através da matriz H_{Δ}^t , realiza-se em 4 passos:

1º Passo: Mediante as medidas disponíveis, construa a matriz H , obtendo a matriz H_{Δ} . Em seguida identifique, através das colunas de H_{Δ} , as MCs e os PCs de medidas, formados por apenas uma MB;

2º Passo: Dentre os PCs identificados no 1º Passo, selecione aqueles que não possuem MS em comum. As duas medidas, de cada um desses PCs, constituem um CCM, formado por apenas duas medidas;

3º Passo: Dentre os pares críticos identificados no 1º Passo, selecione grupos que possuem pelo menos uma MS em comum. As medidas pertencentes, a cada um desses grupos, constituem um único CCM, formado por mais de duas medidas;

4º Passo: Se existir alguma MB não crítica, não pertencente aos CCMs já identificados, elimina-se, da matriz H_{Δ} , tal medida. Em seguida, obtém-se a nova matriz H_{Δ} , e, analisando as colunas desta matriz, as MB, que agora são identificadas como críticas, constituirão, juntamente com a MB eliminada, um CCM.

O 4º Passo é finalizado quando todas as MB não críticas, não pertencentes a CCMs já identificados, tiverem sido analisadas. Na pior situação em termos de processamento, exigir-se-iam, no 4º Passo, no máximo $(n-1)$ re-fatorações parciais, acompanhadas de contagens de elementos não nulos em $(n-1)$ matrizes. Tal situação ocorreria, quando nenhum conjunto p -crítico, com $p \leq 2$, fosse identificado no primeiro passo.

A Figura 3.1 apresenta um fluxograma da metodologia proposta em (LONDON Jr. et al., 2007). Para melhor entendimento dessa metodologia, apresenta-se, a seguir, um exemplo da sua aplicação no sistema teste de 6 barras do IEEE.

Figura 3.1: Fluxograma - metodologia para análise e restauração de observabilidade e identificação de MCs e de CCMs.

3.5 Exemplo

Nesta seção a metodologia proposta em (LONDON Jr. et al., 2007) é aplicada ao sistema de 6 barras do IEEE, apresentado na Figura 3.2, considerando o sistema de medição apresentado na Tabela 3.1. Na Tabela 3.2 destacam-se duas pseudo-medidas

disponíveis. Utilizar-se-á a seguinte nomenclatura: $P: a$ – medida de injeção de potencia ativa na barra “ a ”; e $F_p: a-b$ – medida de fluxo de potencia ativa da barra “ a ” para barra “ b ”.

Figura 3.2: Sistema teste de 6 barras IEEE

Tabela 3.1: Medidas disponíveis para o sistema IEEE 6 barras (Figura 3.1)

Medidas de Fluxo	Medidas de Injeção
$F_p : 1-2$	$P : 1$
$F_p : 1-3$	$P : 5$
$F_p : 3-1$	$P : 6$
$F_p : 3-2$	
$F_p : 6-4$	
$F_p : 5-4$	

Tabela 3.2: Pseudo-medidas

Medidas de Fluxo	Medidas de Injeção
$F_p : 3-4$	$P : 3$

Conforme ilustrado no Fluxograma apresentado na Figura 3.1, a primeira Etapa da metodologia proposta em (LONDON Jr. et al., 2007) é verificar se o sistema é observável. Se não for, vai identificar as pseudo-medidas necessárias para restaurar a observabilidade.

Considerando então as medidas indicadas na Tabela 3.1, obtém-se a matriz H^t , lembrando que a obtenção da matriz H , se baseia na formulação do EEL.

$$\begin{array}{c}
 F_p:1-2 \quad F_p:1-3 \quad P:1 \quad F_p:3-1 \quad F_p:3-2 \quad F_p:5-4 \quad P:5 \quad F_p:6-4 \quad P:6 \\
 \\
 \begin{array}{c}
 \mathbf{1} \\
 \mathbf{2} \\
 \mathbf{3} \\
 \mathbf{4} \\
 \mathbf{5} \\
 \mathbf{6}
 \end{array}
 \left| \begin{array}{ccccccccc}
 1 & 1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -1 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -1 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & -1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1
 \end{array} \right|
 \end{array}
 \quad H^t =$$

Fatorando essa matriz até $H^t(d, d) = 0$, obtém-se:

$$\begin{array}{c}
 F_p:1-2 \quad F_p:1-3 \quad P:1 \quad F_p:3-1 \quad F_p:3-2 \quad F_p:5-4 \quad P:5 \quad F_p:6-4 \quad P:6 \\
 \\
 \begin{array}{c}
 \mathbf{1} \\
 \mathbf{2} \\
 \mathbf{3} \\
 \mathbf{4} \\
 \mathbf{5} \\
 \mathbf{6}
 \end{array}
 \left| \begin{array}{ccccccccc}
 1 & 1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 (1) & 1 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & (1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & -1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1
 \end{array} \right|
 \end{array}
 \quad H^t =$$

Observação 3.5.1: Os números que aparecem entre parênteses são os fatores triangulares.

Como $H^t(3,3) = 0, n \neq 3 (n=6)$, efetua-se uma busca na linha 3 da matriz para verificar se existe alguma medida disponível que dê a informação da variável de estado equivalente correspondente à linha 3. Como a linha 3 da matriz H_{Δ}^t tem apenas elementos nulos, o sistema é dito não observável como um todo, faz-se necessário então adicionar pseudo-medidas para restaurar a observabilidade do sistema.

Efetua-se uma busca por pseudo-medidas que forneça a informação da variável de estado equivalente correspondente à linha do pivô nulo, linha 3, conforme algoritmo apresentado na seção 3.3.

Para testar a pseudo-medida $P:3$, cria-se então a coluna 10, na matriz H^t , onde será armazenada esta pseudo-medida. Em seguida, aplica-se a essa coluna os fatores triangulares obtidos até o momento. A matriz H^t torna-se:

$$H^t = \begin{array}{c|cccccccccc} & F_p:1-2 & F_p:1-3 & P:1 & F_p:3-1 & F_p:3-2 & F_p:5-4 & P:5 & F_p:6-4 & P:6 & P:3 \\ \hline \mathbf{1} & 1 & 1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ \mathbf{2} & (1) & 1 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ \mathbf{3} & 0 & (1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \mathbf{4} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ \mathbf{5} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{array}$$

Como $H^t(3,10) \neq 0$, a pseudo-medida $P:3$ dá informação da variável de estado correspondente a linha 3, sendo então necessária para restauração da observabilidade. Dando então prosseguimento ao processo de fatoração da matriz H^t , até $H^t(d,d)=0$, obtém-se, após a permutação de algumas colunas, a seguinte matriz:

$$H^t = \begin{array}{c|cccccccccc} & F_p:1-2 & F_p:1-3 & P:3 & F_p:5-4 & F_p:6-4 & F_p:3-1 & P:5 & F_p:3-2 & P:6 & P:1 \\ \hline \mathbf{1} & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{2} & (1) & 1 & 2 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ \mathbf{3} & 0 & (1) & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{4} & 0 & 0 & (1) & -1 & -1 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 \\ \mathbf{5} & 0 & 0 & 0 & (1) & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ \mathbf{6} & 0 & 0 & 0 & 0 & (1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array}$$

Como $H^t(6,6)=0$ e $n=6$, o sistema tornou-se observável como um todo com a utilização de apenas uma pseudo-medida ($P:3$).

De acordo com o Fluxograma apresentado na Figura 3.1, passaremos agora para fase de identificação de medidas críticas e de conjuntos críticos de medidas, conforme os quatro passos apresentados na seção 3.4.

1º Passo: Para executar este passo, inicialmente obtém-se a matriz H_{Δ}^t , a partir da matriz H^t parcialmente fatorada no Passo 1. A matriz H_{Δ}^t é:

$$H_{\Delta}^t = \begin{matrix} & F_p:1-2 & F_p:1-3 & P:3 & F_p:5-4 & F_p:6-4 & F_p:3-1 & P:5 & F_p:3-2 & P:6 & P:1 \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix} & \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \end{vmatrix}$$

Sendo que as medidas $F:1-2, F:1-3, P:3, F:5-4, F:6-4$ são chamadas de MB, suficientes para tornar o sistema observável, e as medidas $F:3-1, P:5, F:3-2, P:6, P:1$ são chamadas de MS.

Analisando a matriz H_{Δ}^t , verifica-se que a pseudo-medida $P:3$ é considerada uma medida crítica, por ser a única medida que dá a informação do estado equivalente correspondente a linha 3.

Verifica-se também que as medidas $F:5-4, P:5$, assim como as medidas $F:6-4, P:6$ formam dois Pares Críticos de medidas formados por apenas uma MB.

2º Passo: Os dois pares críticos identificados no 1º Passo não possuem MS em comum. Dessa forma, as duas medidas, de cada um desses pares críticos, constituem um CCM, formado por apenas duas medidas.

4º Passo: As MB $F:1-2$ e $F:1-3$ não são críticas e não apareceram nos conjuntos críticos identificados anteriormente. Dessa forma as colunas correspondentes a essas

medidas serão eliminadas, uma de cada vez, para verificar se alguma MB vai se tornar crítica. Eliminando primeiramente $F:1-2$, obtém-se:

$$H_{\Delta}^{t'} = \begin{array}{c|cccccccccc} & F:1-3 & P:3 & F:5-4 & F:6-4 & F:3-1 & P:5 & F:3-2 & P:6 & P:1 \\ \hline \mathbf{1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ \mathbf{2} & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ \mathbf{3} & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{4} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{5} & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \mathbf{6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array}$$

Trocando as posições das colunas dessa matriz, como se mostra a seguir, podemos obter a nova matriz $H_{\Delta}^{t'}$:

$$H_{\Delta}^{t'} = \begin{array}{c|cccccccccc} & F:1-3 & F:2-3 & P:3 & F:5-4 & F:6-4 & P:1 & F:3-1 & P:5 & P:6 \\ \hline \mathbf{1} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 1 & 0 & 0 \\ \mathbf{2} & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{3} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{4} & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \mathbf{5} & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \mathbf{6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array}$$

Verificou-se que nenhuma MB se tornou crítica, sendo assim, a medida $F:1-2$ não faz parte de nenhum conjunto crítico de medidas. Procedendo-se da mesma forma com a medida $F:1-3$, obtém-se:

	$F:1-2$	$F:2-3$	$P:3$	$F:5-4$	$F:6-4$	$P:1$	$F:3-1$	$P:5$	$P:6$
$H_{\Delta}' =$	1	0	0	0	0	2	1	0	0
2	0	1	0	0	0	1	1	0	0
3	0	0	1	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	0	0	0	1	0
5	0	0	0	0	1	0	0	0	1
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Assim como na análise anterior, verificou-se que nenhuma MB se tornou crítica, sendo assim a medida $F:1-3$ não faz parte de nenhum conjunto crítico de medidas e a análise está encerrada.

Obtém-se assim o seguinte resultado:

➤ *Medida Crítica: $P:3$*

➤ *Conjuntos Críticos: $[F:5-4, P:5]$; $[F6-4, P:6]$*

3.6 Conclusões

Este capítulo apresentou a metodologia desenvolvida em (LONDON JR. et al., 2007) que possibilita análise e restauração de observabilidade, bem como identificação de MCs e de CCMs no contexto de estimação de estado monofásica.

Analisando a formulação e o exemplo de aplicação da metodologia proposta em (LONDON Jr. et al., 2007), apresentados neste capítulo, verificam-se algumas vantagens da mesma em relação às metodologias já desenvolvidas para identificação de MCs e de CCMs. A saber:

- Em relação às metodologias topológicas, possibilita a identificação de CCMs de uma forma bastante direta, sem exigir busca baseadas na teoria de grafos;
- Em relação às metodologias numéricas já desenvolvidas, a quantidade de cálculo necessário é bem menor, pois, não exige a obtenção da matriz de sensibilidade, nem mesmo de uma estimação de estado inicial. O método requer apenas a fatoração da matriz Jacobiana e, em seguida, a análise dos elementos não nulos que aparecem na matriz fatorada, que recebe o nome de matriz H_{Δ} (LONDON Jr. et al., 2007).

Face ao exposto, a metodologia proposta em (LONDON Jr. et al., 2007) foi escolhida para desenvolvimento desta dissertação de mestrado, cujo objetivo é a obtenção de uma metodologia para análise das características qualitativas de conjunto de medidas, para efeito de EESEP, considerando a modelagem trifásica.

Tomando por base a metodologia proposta em (LONDON Jr. et al., 2007) apresentada neste capítulo, no capítulo 4 será apresentada a metodologia proposta nesta dissertação de mestrado.

Capítulo 4

4 Metodologia Proposta Para Análise de Observabilidade e Identificação de Medidas Críticas e de Conjuntos Críticos de Medidas no contexto de Estimação de Estado Trifásica

Apresenta-se, neste capítulo, a metodologia para análise e restauração de observabilidade e identificação de MCs e de CCMs, no contexto de estimação de estado trifásica, proposta nesta dissertação de mestrado.

Vale lembrar que a metodologia proposta é uma extensão da metodologia desenvolvida em (LONDON Jr. et al., 2007), apresentada no capítulo 3, que possibilita análise de observabilidade e de redundância de medidas no contexto de estimação de estado monofásica.

A metodologia proposta nesta dissertação possibilita análise e restauração da observabilidade a partir da fatoração triangular da matriz Jacobiana, do estimador de estado por mínimos quadrados ponderados trifásico proposto por ZHONG e ABUR (2002), matriz $H_{3\phi}$. Para identificar as MCs e os CCMs a metodologia proposta analisa a estrutura da matriz resultante do processo de fatoração triangular da matriz $H_{3\phi}$, que será chamada de matriz $H_{\Delta 3\phi}$.

Este capítulo está organizado da seguinte forma:

- Na seção 4.1 recordam-se aspectos básicos da modelagem trifásica clássica dos componentes da rede elétrica;
- Na seção 4.2 apresenta-se a formulação e a matriz Jacobiana do estimador de estado trifásico por mínimos quadrados ponderados proposto por ZHONG e ABUR (2002);
- Na seção 4.3 são discutidas algumas particularidades da observabilidade e da redundância de medidas no contexto de estimação de estado trifásica;

- Na seção 4.4 encontra-se o algoritmo proposto e, na seção 4.5, apresenta-se um exemplo da sua aplicação;
- As conclusões deste capítulo estão na seção 4.6.

4.1 Modelagem Trifásica dos Componentes da Rede Elétrica

As referências (ALMEIDA, 2007; ARRILLAGA et al., 1978; ZHONG e ABUR, 2002) foram utilizadas como base para escrita desta seção.

Cargas

As cargas são modeladas como injeções de potência ativa e reativa. Para sistemas desequilibrados, faz-se necessário especificar o desequilíbrio das cargas do sistema, inserindo os valores das cargas em cada uma das fases.

Elementos Shunts

Elementos Shunts, como reatores e capacitores, são utilizados num SEP para o controle da potência reativa do sistema. A matriz admitância dos elementos shunts é uma matriz diagonal, devido ao não acoplamento entre os componentes de cada fase. Sendo assim, essa matriz pode ser incluída facilmente na matriz admitância do sistema, contribuindo apenas para a admitância própria das barras do sistema onde o elemento shunt está conectado.

Considerando, como exemplo, um banco trifásico de capacitores, temos que:

$$Y_{sh}^{ab} = Y_{sh}^{ac} = Y_{sh}^{ba} = Y_{sh}^{bc} = Y_{sh}^{ca} = Y_{sh}^{cb} = 0 \quad (4.1)$$

logo, a correspondente matriz admitância apresenta a seguinte estrutura:

$$[Y_{sh}] = \begin{bmatrix} 1/jx_c & 0 & 0 \\ 0 & 1/jx_c & 0 \\ 0 & 0 & 1/jx_c \end{bmatrix}_{3 \times 3} \quad (4.2)$$

Elementos em Série

Qualquer elemento conectado diretamente entre duas barras (iek) pode ser considerado um elemento em série. Um exemplo típico de um elemento em série é um banco de capacitores. Tendo em vista que o mesmo não possui acoplamento entre as fases, sua matriz de admitâncias primitivas é considerada diagonal, contribuindo apenas para as matrizes de admitâncias nodais próprias e mútuas das barras iek , podendo ser escrita conforme a equação (4.3) (ARRILLAGA et al., 1978) :

$$[Y] = \begin{bmatrix} [Y_{SE}] & -[Y_{SE}] \\ -[Y_{SE}] & [Y_{SE}] \end{bmatrix}_{6 \times 6} \quad (4.3)$$

sendo que:

$$Y_{ii} = Y_{kk} = Y_{SE} \quad (4.4)$$

$$Y_{ik} = Y_{ki} = -Y_{SE} \quad (4.5)$$

Linhas de Transmissão

Conforme ARRILLAGA (1978), para representar os efeitos magnéticos e eletrostáticos de uma linha de transmissão trifásica a mesma pode ser modelada por três (3) circuitos π agrupados, com acoplamento mútuo entre os ramos séries e *shunts*. A matriz equivalente deste circuito pode ser vista na Figura 4.1 (ARRILLAGA, 1978).

Figura 4.1: Representação da linha de transmissão trifásica

A Figura 4.1 pode ser representada pela equação matricial (4.6):

$$\begin{bmatrix} I_i \\ I_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Z_{ik}]^{-1} + [Y_{ik}] / 2 & -[Z_{ik}]^{-1} \\ -[Z_{ik}]^{-1} & [Z_{ik}]^{-1} + [Y_{ik}] / 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ V_k \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

sendo que, para cada fase do sistema, temos:

$$Z_{ik}^{-1} = Y_{ik} = G_{ik} + jB_{ik} \quad (4.7)$$

$$G_{ik} = -\frac{R_{ik}}{R_{ik}^2 + X_{ik}^2} \quad (4.8)$$

$$B_{ik} = -\frac{-X_{ik}}{R_{ik}^2 + X_{ik}^2} \quad (4.9)$$

$$G_{ii} = \sum_{k \in \Omega_i} \frac{R_{ik}}{R_{ik}^2 + X_{ik}^2} \quad (4.10)$$

$$B_{ii} = \sum_{k \in \Omega_i} \frac{-X_{ik}}{R_{ik}^2 + X_{ik}^2} \quad (4.11)$$

$i e k$ - representa as barras do sistema;

Ω_i - conjunto de barras vizinhas da barra i , incluindo a própria barra i .

Para o caso de linhas curtas, comum para sistemas de distribuição, consideram-se apenas os efeitos eletromagnéticos. Dessa forma, tais linhas são modeladas apenas por elementos série, conforme Figura 4.2 (ALMEIDA, 2007):

Figura 4.2: Linha trifásica curta

Circuitos Mutuamente Acoplados

Quando duas ou mais linhas de transmissão ocupam o mesmo caminho por um longo trecho, faz-se necessário levar em conta os efeitos eletrostáticos e eletromagnéticos do acoplamento entre elas (ARRILLAGA, 1978).

Como exemplo, consideremos o caso onde há duas linhas trifásicas mutuamente acopladas formando um subsistema com quatro barras. O acoplamento das linhas está ilustrado na Figura 4.3 (ALMEIDA, 2007). O acoplamento entre os elementos em série representa o efeito eletromagnético e o acoplamento entre os elementos *shunt* representa o efeito eletrostático.

Figura 4.3: Linhas trifásicas mutuamente acopladas

Tendo em vista que o acoplamento mútuo é bilateral, tem-se $Y_{21} = Y_{12}^T$, similar para os elementos *shunts*, e a matriz de admitâncias nodais para essa rede é dada por:

$$\begin{bmatrix} I_A^{abc} \\ I_B^{abc} \\ I_C^{abc} \\ I_D^{abc} \end{bmatrix}_{12 \times 1} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_{11} + Y_{sh1} & Y_{12} + Y_{sh12} \\ Y_{12}^T + Y_{sh12}^T & Y_{22} + Y_{sh2} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} -Y_{11} & -Y_{12} \\ -Y_{12}^T & -Y_{22} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} -Y_{11} & -Y_{12} \\ -Y_{12}^T & -Y_{22} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} Y_{11} + Y_{sh1} & Y_{12} + Y_{sh12} \\ Y_{12}^T + Y_{sh12}^T & Y_{22} + Y_{sh2} \end{bmatrix} \end{bmatrix}_{12 \times 12} \begin{bmatrix} E_A^{abc} \\ E_B^{abc} \\ E_C^{abc} \\ E_D^{abc} \end{bmatrix}_{12 \times 1} \quad (4.12)$$

Comparando a equação (4.12) com a equação (4.6), observa-se que são similares os tratamentos dados às linhas não acopladas e mutuamente acopladas, onde as matrizes de ordem 3x3 passam agora para ordem 6x6. A diferença é que para linhas mutuamente acopladas as matrizes de parâmetros série e shunt terão suas dimensões multiplicadas pelo número de linhas acopladas. Assim, para duas linhas trifásicas mutuamente acopladas tem-se:

$$\begin{bmatrix} I_A^{abc} \\ I_B^{abc} \\ I_C^{abc} \\ I_D^{abc} \end{bmatrix}_{12 \times 1} = \begin{bmatrix} [Z_s]^{-1} + [Y_{sh}]/2 & -[Z_s]^{-1} \\ -[Z_s]^{-1} & [Z_s]^{-1} + [Y_{sh}]/2 \end{bmatrix}_{12 \times 12} \begin{bmatrix} E_A^{abc} \\ E_B^{abc} \\ E_C^{abc} \\ E_D^{abc} \end{bmatrix}_{12 \times 1} \quad (4.13)$$

Transformadores

Os transformadores trifásicos podem ser formados pela associação de três transformadores monofásicos ou por três enrolamentos (no mínimo) enrolados em um mesmo núcleo. Esta última versão seria então um transformador trifásico propriamente dito. A primeira versão é muito utilizada em subestação do sistema de transmissão, quando se instala, como “reserva fria”, um quarto transformador monofásico. Assim, se existir algum defeito em um dos três transformadores, o mesmo é substituído pela unidade reserva, custando menos que dois transformadores trifásicos propriamente ditos.

Considerar-se-á, neste trabalho, que os transformadores trifásicos são formados pela associação de transformadores monofásicos e que os parâmetros de suas fases são perfeitamente balanceados, conforme Figura 4.4 (ALMEIDA, 2007):

Figura 4.4: Transformador trifásico

Sendo que:

I_p^{abc} e I_s^{abc} : correntes de linha do lado primário e do lado secundário do transformador, respectivamente;

E_p^{abc} e E_s^{abc} : tensões de fase do lado primário e do lado secundário do transformador, respectivamente;

Y_{pp} , Y_{ss} , Y_{ps} , Y_{sp} : admitâncias próprias e mútuas no primário e no secundário do transformador;

Sendo assim, a matriz de admitâncias nodais do transformador é dada por:

$$\begin{bmatrix} I_p^{abc} \\ I_s^{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{pp} & Y_{ps} \\ Y_{sp} & Y_{ss} \end{bmatrix}_{6 \times 6} \begin{bmatrix} E_p^{abc} \\ E_s^{abc} \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

As sub-matrizes Y_{pp} , Y_{ss} , Y_{sp} e Y_{ps} são definidas de acordo com o tipo de conexão do transformador, conforme ilustrado na Tabela 4.1. As matrizes Y_I , Y_{II} e Y_{III} também são representadas abaixo, sendo y^l a admitância de ligação do transformador.

Tabela 4.1: Matriz admitância de um transformador conforme o tipo de ligação

Primário	Secundário	Y_{pp}	Y_{ss}	Y_{ps}
Y-g	Y-g	Y_I	Y_I	$-Y_I$
Y-g	Y	Y_{II}	Y_{II}	$-Y_{II}$
Y-g	Δ	Y_I	Y_{II}	Y_{III}
Y	Y	Y_{II}	Y_{II}	$-Y_{II}$
Y	Δ	Y_{II}	Y_{II}	Y_{III}
Δ	Δ	Y_{II}	Y_{II}	Y_{II}

Sendo que, Y-g, Y e Δ representa o tipo de ligação do transformador:

Y-g: Estrela aterrado;

Y: Estrela;

Δ : Triângulo.

$$Y_I = \begin{bmatrix} y^t & 0 & 0 \\ 0 & y^t & 0 \\ 0 & 0 & y^t \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

$$Y_{II} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2y^t & -y^t & -y^t \\ -y^t & 2y^t & -y^t \\ -y^t & -y^t & 2y^t \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

$$Y_{III} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} -y^t & y^t & 0 \\ 0 & -y^t & y^t \\ y^t & 0 & -y^t \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

Finalmente, para considerar os taps do primário (t_i) e do secundário (t_k) realiza-se as seguintes operações:

$$Y_{pp} = \frac{Y_{pp}}{t_i^2} \quad (4.18)$$

$$Y_{ss} = \frac{Y_{ss}}{t_k^2} \quad (4.19)$$

$$Y_{ps} = \frac{Y_{ps}}{t_i t_k} \quad (4.20)$$

$$Y_{sp} = \frac{Y_{sp}}{t_i t_k} \quad (4.21)$$

Gerador Síncrono Trifásico

Para avaliar os desbalanços das correntes e tensões nos terminais das máquinas síncronas, nos estudos de fluxo de carga e estimação de estado estática os mesmos são representados através de suas reatâncias e tensões internas. Neste trabalho serão tratadas máquinas síncronas sem regulação de tensão.

Para representar um gerador síncrono trifásico utilizaremos duas barras trifásicas, uma barra interna i e uma terminal t , conforme ilustrado na Figura 4.5 (ALMEIDA, 2007).

Figura 4.5: Modelo equivalente π do gerador síncrono trifásico

Sendo:

i : barra interna;

t : barra terminal;

Y_G : Matriz Admitância do Gerador;

$E_i^a = V_i \angle \theta^a, E_i^b = V_i \angle \theta^a - 120^\circ$ e $E_i^c = V_i \angle \theta^a + 120^\circ$ (tensões nas barras internas com mesmo módulo e defasadas de 120° entre si).

Para a obtenção da matriz de admitâncias do gerador, considera-se que as máquinas estejam em perfeita simetria. Dessa forma, sua representação em componentes simétricas leva a uma matriz de impedâncias diagonal Z_g , como mostra a equação (4.22):

$$Z_g = \begin{bmatrix} Z^0 & 0 & 0 \\ 0 & Z^+ & 0 \\ 0 & 0 & Z^- \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

sendo Z^0, Z^+ e Z^- , respectivamente, as impedâncias de sequência zero, positiva e negativa. Dessa forma, as tensões complexas de sequência zero, positiva e negativa do gerador, para as 3 fases do sistema, são dadas por:

$$\begin{bmatrix} E_i^0 - E_t^0 \\ E_i^+ - E_t^+ \\ E_i^- - E_t^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z^0 & 0 & 0 \\ 0 & Z^+ & 0 \\ 0 & 0 & Z^- \end{bmatrix}_{3 \times 3} \begin{bmatrix} I_i^0 \\ I_i^+ \\ I_i^- \end{bmatrix} \Rightarrow [E_{ii}^{0+-}] = [Z^{0+-}] [I_i^{0+-}] \quad (4.23)$$

sendo:

I_i^0, I_i^+ e I_i^- : correntes complexas de sequência zero, positiva e negativa, respectivamente, injetadas na barra i ;

E_i^0, E_i^+ e E_i^- : tensões complexas de sequência zero, positiva e negativa, respectivamente, na barra i ;

Essa nomenclatura é também válida para barra terminal.

Realizando a transformação das componentes simétricas em componentes de fase, tem-se que: $[Y_g] = [T][Z^{0+-}]^{-1}[T]^{-1}$, sendo T a matriz de transformação de componentes simétricas em componentes de fase, é possível escrever a matriz de admitâncias nodais para o gerador:

$$|Y_G| = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} Y^0 + Y^+ + Y^- & Y^0 + aY^+ + a^2Y^- & Y^0 + a^2Y^+ + aY^- \\ Y^0 + a^2Y^+ + aY^- & Y^0 + Y^+ + Y^- & Y^0 + aY^+ + a^2Y^- \\ Y^0 + aY^+ + a^2Y^- & Y^0 + a^2Y^+ + aY^- & Y^0 + Y^+ + Y^- \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

sendo $Y^0 = 1/Z^0$, $Y^+ = 1/Z^+$, $Y^- = 1/Z^-$, $a = \cos(120^\circ) + j \sin(120^\circ)$;

Sendo assim, a matriz de Admitância do gerador pode ser escrito através da equação (4.25).

$$\begin{bmatrix} I_i^{abc} \\ I_t^{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_G & -Y_G \\ -Y_G & Y_G \end{bmatrix}_{6 \times 6} \begin{bmatrix} E_i^{abc} \\ E_t^{abc} \end{bmatrix}. \quad (4.25)$$

Se houver a necessidade da utilização de um regulador de tensão para controle da tensão terminal da máquina, torna-se necessário incluir uma equação relativa à regulação de tensão. A matriz de admitâncias nodais será a mesma para o caso do gerador sem regulação considerando que as tensões na barra interna são equilibradas, o compensador síncrono é modelado como um gerador síncrono cuja potência ativa trifásica total especificada é nula (ALMEIDA, 2007).

Formação da Matriz de Admitância

Para formação da matriz de admitância do sistema, duas regras básicas devem ser levadas em consideração (ARRILLAGA, 1978):

1. A matriz de admitâncias próprias de qualquer barra é formada pela soma das matrizes de admitâncias próprias dos elementos conectados à barra;
2. A matriz de admitâncias mútuas entre duas barras é o negativo da soma das matrizes de admitâncias mútuas individuais de todos os elementos conectados entre as barras.

4.2 Estimador de Estado Trifásico por Mínimos Quadrados Ponderados

Conforme descrito no capítulo 2, as medidas analógicas e as variáveis de estado de um SEP (tensões complexas nas barras do SEP) estão relacionadas através do seguinte modelo de medição:

$$z = h(x) + w \quad (4.26)$$

em que:

“ z ” é o vetor de medidas ($m \times 1$), sendo m o número total de medidas efetuadas;

“ $h(x)$ ” o vetor de funções não lineares, que relaciona as medidas com as variáveis de estado, também com dimensão ($m \times 1$) (equações do fluxo de potência);

“ x ” o vetor de variáveis de estado ($nv \times 1$);

“ w ” o vetor dos erros nas medidas ($mx1$), que são considerados como variáveis aleatórias independentes, com distribuição Gaussiana de média zero e matriz de covariância do erro da medida W (mxn), dada por (4.27), sendo “ m ” e “ n ” o número de medidas e o de barras do sistema, respectivamente.

$$W = \begin{vmatrix} \sigma_1^2 & & & \\ & \sigma_2^2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \sigma_m^2 \end{vmatrix} \quad (4.27)$$

Conforme apresentado no capítulo 2, a solução por mínimos quadrados ponderados é obtida através do seguinte processo iterativo:

$$\begin{aligned} G(x^k) \cdot (\Delta x^k) &= H'(\hat{x}^k) \cdot W^{-1} \cdot [z - h(\hat{x}^k)] \\ x^{k+1} &= x^k + \Delta x^k \end{aligned} \quad (4.28)$$

onde: $H(x^k)$ é a matriz Jacobiana na iteração k , $G(x^k)$ é a matriz Ganho na iteração k e x é a estimativa WLS do vetor das variáveis de estado.

O processo iterativo começa a partir de uma estimativa inicial x^0 e a cada iteração as correções nas variáveis de estado Δx^k são obtidas da equação (4.28), até que o seguinte critério de parada seja satisfeito:

$$\max |\Delta x_i| \leq \varepsilon, \quad (4.29)$$

ou seja, o processo iterativo é encerrado quando a magnitude dos ajustes nas variáveis de estado for menor que um valor pré-estabelecido.

Usualmente as medidas utilizadas no processo de EESEP são medidas de magnitude de tensão e de potência ativa e reativa (fluxo e injeção).

As injeções de potência trifásica ativa e reativa são dadas, respectivamente, pelas equações (4.30) e (4.31) (HANSEN e DEBS, 1995).

$$P_i^p = V_i^p \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^3 V_k^m \left(G_{ik}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm} + B_{ik}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm} \right) \quad (4.30)$$

$$Q_i^p = V_i^p \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^3 V_k^m \left(G_{ik}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm} - B_{ik}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm} \right) \quad (4.31)$$

sendo: n o número de barras do SEP; V_i^p o módulo da tensão na fase p da barra i ; G_{ik}^{pm} a condutância entre as fases p e m do ramo entre as barras i e k ; θ_{ik}^{pm} a diferença entre o ângulo da fase p da barra i e o ângulo da fase m da barra k , ou seja, $\theta_{ik}^{pm} = \theta_i^p - \theta_k^m$ e B_{ik}^{pm} a susceptância entre as fases p e m do ramo entre as barras i e k . O conjunto k

contém todas as barras do sistema e os parâmetros G_{ik}^{pm} e B_{ik}^{pm} são não nulos sempre que houver conexão física entre a barra i e as barras do conjunto k . As equações acima são válidas também para linhas que sofrem os efeitos dos acoplamentos mútuos com outras linhas.

Para obtenção das equações de fluxos de potência ativa e reativa utiliza-se o modelo equivalente π ilustrado na Figura 4.6. Dessa forma, os fluxos de potência ativa e reativa fase p de uma linha trifásica, entre as barras i e k , são dados, respectivamente, pelas seguintes equações:

Figura 4.6: Modelo π equivalente para um componente da rede.

$$P_{ik}^p = \sum_{m=1}^3 \left\{ V_i^m V_i^p \left[G_{ik}^{pm} \cos \theta_{ii}^{pm} + (B_{ik}^{pm} + B_{sh}^{pm}) \sin \theta_{ii}^{pm} \right] - V_k^m V_i^p \left[G_{ik}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm} + B_{ik}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm} \right] \right\} \quad (4.32)$$

$$Q_{ik}^p = \sum_{m=1}^3 \left\{ V_i^m V_i^p \left[G_{ik}^{pm} \sin \theta_{ii}^{pm} - (B_{ik}^{pm} + B_{sh}^{pm}) \cos \theta_{ii}^{pm} \right] - V_k^m V_i^p \left[G_{ik}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm} - B_{ik}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm} \right] \right\} \quad (4.33)$$

onde o índice s representa admitância série enquanto o índice sh representa admitância shunt.

Matriz Jacobiana do Estimador de Estado WLS Trifásico

A partir das derivadas parciais das equações acima se obtém então a matriz Jacobiana do Estimador de Estado WLS trifásico, que será $(H_{3\theta})$:

$$H_{3\phi} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{ik}^p}{\partial \theta_j} & \frac{\partial P_{ik}^p}{\partial V_j} \\ \frac{\partial Q_{ik}^p}{\partial \theta_j} & \frac{\partial Q_{ik}^p}{\partial V_j} \\ \frac{\partial V_i^p}{\partial \theta_j} & \frac{\partial V_i^p}{\partial V_j} \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

com i e k variando de 1 até n .

Assim como na versão monofásica, a dimensão da matriz jacobiana é determinada de acordo com o número de medidas e de variáveis de estado a serem estimadas. Para o modelo trifásico o número de variáveis de estado ($N_{3\phi}$) é dado pela equação (4.35):

$$N_{3\phi} = 6nb + 2ng - 1, \quad (4.35)$$

sendo: nb e ng o número de barras de carga e o número de geradores do sistema, respectivamente. Em cada barra de carga da rede (incluindo as barras terminais dos geradores) há seis variáveis de estado, ou seja, módulos e ângulos de fase das tensões nas três fases do sistema. As tensões nas barras internas dos geradores são equilibradas, sendo assim, tais barras são responsáveis por mais duas variáveis de estado, sendo o módulo e o ângulo da tensão de apenas uma das fases da barra interna. Da mesma forma que no processo de estimação de estado monofásica, deve-se escolher uma das barras do sistema como referência angular. Eis a razão do termo “-1” que aparece na equação (4.35), pois o ângulo de uma das fases de uma das barras é escolhido como referência angular. (ALMEIDA, 2007)

A seguir serão apresentadas as equações que definem cada um dos elementos da matriz $H_{3\phi}$.

- Derivadas parciais de medidas de potência ativa em relação ao ângulo:

$$\frac{\partial P_{ik}^p}{\partial \theta_j^m} = \begin{cases} \text{injeção}, i = k \\ \text{fluxo}, i \neq k \end{cases} \quad (4.36)$$

Injeção:

$$\frac{\partial P_{ii}^p}{\partial \theta_j^m} = \begin{cases} V_i^p V_j^m [G_{ij}^{pm} \sin \theta_{ij}^{pm} - B_{ij}^{pm} \cos \theta_{ij}^{pm}], m \neq p \text{ e } i \neq j \\ -B_{ii}^{pp} (V_i^p)^2 - V_i^p \sum_{j=1}^n \sum_{m=1}^3 V_j^m [G_{ij}^{pm} \sin \theta_{ij}^{pm} - B_{ij}^{pm} \cos \theta_{ij}^{pm}], m = p \text{ e } i = j \end{cases} \quad (4.37)$$

Fluxo:

Se ($i \neq j$) e ($k = j$):

$$\frac{\partial P_{ik}^p}{\partial \theta_j^m} = V_i^p V_j^m [G_{ij}^{pm} \sin \theta_{ij}^{pm} - B_{ij}^{pm} \cos \theta_{ij}^{pm}] \quad (4.38)$$

Se ($i = j$) e ($p \neq m$):

$$\frac{\partial P_{ik}^p}{\partial \theta_j^m} = V_i^p V_j^m [G_{ij}^{pm} \sin \theta_{ij}^{pm} - (B_{ij}^{pm} + B_{ij}^{pm}) \cos \theta_{ij}^{pm}] \quad (4.39)$$

Se ($i = j$) e ($p = m$):

$$\frac{\partial P_{ik}^p}{\partial \theta_j^m} = -(V_i^p)^2 (B_{ik}^{pp} + B_{ik}^{pp}) - \sum_{n=1}^3 [V_i^m V_i^p [G_{ik}^{nm} \sin \theta_{ik}^{nm} - (B_{ik}^{nm} + B_{ik}^{nm}) \cos \theta_{ik}^{nm}]] + \sum_{n=1}^3 [V_k^m V_i^p [G_{ik}^{nm} \sin \theta_{ik}^{nm} - B_{ik}^{nm} \cos \theta_{ik}^{nm}]] \quad (4.40)$$

- Derivadas parciais de medidas de potência ativa em relação à tensão:

$$\frac{\partial P_{ik}^p}{\partial V_j^m} = \begin{cases} \text{injeção}, i = k \\ \text{fluxo}, i \neq k \end{cases} \quad (4.41)$$

Injeção:

$$\frac{\partial P_{ii}^p}{\partial V_j^m} = \begin{cases} V_i^p [G_{ij}^{pm} \cos \theta_{ij}^{pm} + B_{ij}^{pm} \sin \theta_{ij}^{pm}], m \neq p \text{ e } i \neq j \\ \frac{[(V_i^p)^2 G_{ii}^{pp} + P_i^p]}{V_i^p}, m = p \text{ e } i = j \end{cases} \quad (4.42)$$

Fluxo:

Se $(i \neq j)$ e $(k = j)$:

$$\frac{\partial P_{ik}^p}{\partial V_j^m} = -V_i^p [G_{ij}^{pm} \cos \theta_{ij}^{pm} + B_{ij}^{pm} \sin \theta_{ij}^{pm}] \quad (4.43)$$

Se $(i = j)$ e $(p \neq m)$:

$$\frac{\partial P_{ik}^p}{\partial V_j^m} = V_i^p [G_{ij}^{pm} \cos \theta_{ij}^{pm} + (B_{ij}^{pm} + B_{sh_{ij}}^{pm}) \sin \theta_{ij}^{pm}] \quad (4.44)$$

Se $(i = j)$ e $(p = m)$:

$$\frac{\partial P_{ik}^p}{\partial V_j^m} = V_i^p G_{ik}^{pm} + \sum_{m=1}^3 \{ V_i^m V_i^p [G_{ik}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm} + (B_{ik}^{pm} + B_{sh_{ik}}^{pm}) \sin \theta_{ik}^{pm}] \} - \sum_{m=1}^3 \{ V_k^m [G_{ik}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm} + B_{ik}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm}] \} \quad (4.45)$$

- Derivadas parciais de medidas de potência reativa em relação ao ângulo:

$$\frac{\partial Q_{ik}^p}{\partial \theta_j^m} = \begin{cases} \text{injeção}, i = k \\ \text{fluxo}, i \neq k \end{cases} \quad (4.46)$$

Injeção:

$$\frac{\partial Q_{ii}^p}{\partial \theta_j^m} = \begin{cases} -V_i^p V_j^m [G_{ij}^{pm} \cos \theta_{ij}^{pm} + B_{ij}^{pm} \sin \theta_{ij}^{pm}], m \neq p \text{ e } i \neq j \\ -G_{ii}^{pp} (V_i^p)^2 + P_i^p, m = p \text{ e } i = j \end{cases} \quad (4.47)$$

Fluxo:

Se $(i \neq j)$ e $(k = j)$:

$$\frac{\partial Q_{ik}^p}{\partial \theta_j^m} = V_i^p V_j^m [G_{ij}^{pm} \cos \theta_{ij}^{pm} + B_{ij}^{pm} \sin \theta_{ij}^{pm}] \quad (4.48)$$

Se $(i = j)$ e $(p \neq m)$:

$$\frac{\partial Q_{ik}^p}{\partial \theta_j^m} = -V_i^p V_j^m [G_{ij}^{pm} \cos \theta_{ij}^{pm} + (B_{ij}^{pm} + B_{sh_{ij}}^{pm}) \sin \theta_{ij}^{pm}] \quad (4.49)$$

Se $(i = j)$ e $(p = m)$:

$$\frac{\partial Q_{ik}^p}{\partial \theta_j^m} = -(V_i^p)^2 G_{ik}^{pm} + \sum_{m=1}^3 \left\{ V_i^m V_i^p \left[G_{ik}^{pm} \cos \theta_{ii}^{pm} + (B_{ik}^{pm} + Bsh_{ik}^{pm}) \sin \theta_{ii}^{pm} \right] \right\} - \sum_{m=1}^3 \left\{ V_k^m V_i^p \left[G_{ik}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm} + B_{ik}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm} \right] \right\} \quad (4.50)$$

- Derivadas parciais de medidas de potência reativa em relação à tensão:

$$\frac{\partial Q_{ik}^p}{\partial V_j^m} = \begin{cases} \text{injeção, } i = k \\ \text{fluxo, } i \neq k \end{cases} \quad (4.51)$$

Injeção:

$$\frac{\partial Q_{ii}^p}{\partial V_j^m} = \begin{cases} V_i^p \left[G_{ij}^{pm} \sin \theta_{ij}^{pm} - B_{ij}^{pm} \cos \theta_{ij}^{pm} \right], m \neq p \text{ ou } i \neq j \\ \frac{[-(V_i^p)^2 B_{ii}^{pp} + Q_i^p]}{V_i^p}, m = p \text{ e } i = j \end{cases} \quad (4.52)$$

Fluxo:

Se $(i \neq j)$ e $(k = j)$:

$$\frac{\partial Q_{ik}^p}{\partial V_j^m} = -V_i^p \left[G_{ij}^{pm} \sin \theta_{ij}^{pm} - B_{ij}^{pm} \cos \theta_{ij}^{pm} \right] \quad (4.53)$$

Se $(i = j)$ e $(p \neq m)$:

$$\frac{\partial P_{ik}^p}{\partial V_j^m} = V_i^p \left[G_{ij}^{pm} \sin \theta_{ij}^{pm} - (B_{ij}^{pm} + Bsh_{ij}^{pm}) \cos \theta_{ij}^{pm} \right] \quad (4.54)$$

Se $(i = j)$ e $(p = m)$:

$$\frac{\partial P_{ik}^p}{\partial V_j^m} = -V_i^p (B_{ik}^{pp} + Bsh_{ik}^{pp}) + \sum_{m=1}^3 \left\{ V_i^m V_i^p \left[G_{ik}^{pm} \sin \theta_{ii}^{pm} - (B_{ik}^{pm} + Bsh_{ik}^{pm}) \cos \theta_{ii}^{pm} \right] \right\} - \sum_{m=1}^3 \left\{ V_k^m \left[G_{ik}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm} - B_{ik}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm} \right] \right\} \quad (4.55)$$

- Derivadas parciais de medidas de amplitude de tensão em relação ao ângulo:

$$\frac{\partial V_i^p}{\partial \theta_j^m} = 0 \quad (4.56)$$

- Derivadas parciais de medidas de amplitude de tensão em relação à tensão:

$$\frac{\partial V_i^p}{\partial V_j^m} = \begin{cases} 0, i \neq j \\ 1, i = j \text{ e } p = m \end{cases} \quad (4.57)$$

Todas as derivadas parciais em relação ao ângulo serão nulas se o índice j corresponder à barra de referência do sistema.

4.3 Observabilidade e Redundância de Medidas no contexto de Estimação de Estado Trifásica

Analisando o estimador de estado WLS trifásico apresentado na seção 4.2, verifica-se que as análises de observabilidade e de redundância de medidas, para modelagem trifásica, apresenta algumas particularidades.

Vale destacar que essas particularidades existem principalmente em função do acoplamento entre as fases e linhas paralelas (HANSEN e DEBS, 1995).

As Figuras a seguir deixam claro que não existe uma correspondência direta entre as análises de observabilidade monofásica e trifásica. A Figura 4.7.a ilustra uma linha trifásica com medidores de fluxo de potência ativa e reativa. Em termos de observabilidade, a linha monofásica associada aos medidores de fluxo de potência apresentada na Figura 4.7.a é equivalente à linha trifásica apresentada na Figura 4.7.b. Observe que, devido ao número maior de variáveis de estado, a existência de um medidor na rede monofásica equivale à existência de três medidores na rede trifásica (ALMEIDA, 2007).

As Figuras 4.7.c e 4.7.d apresentam, por outro lado, dois casos nas quais a configuração de medidores nas linhas trifásicas não tem equivalente monofásico. Nesses dois casos, a linha trifásica é não observável, uma vez que há 12 variáveis de estado (seis em cada barra - $\theta_a, \theta_b, \theta_c$ e V_a, V_b, V_c) e apenas oito medidas disponíveis. Portanto, nos casos representados nas figuras 4.7.c e 4.7.d as medidas de fluxo disponíveis são irrelevantes para a observabilidade da rede, já que elas são insuficientes para tornar a linha observável. Observe que no caso monofásico não é possível caracterizar uma medida de fluxo como irrelevante (ALMEIDA, 2007).

Figura 4.7 - Representação dos medidores.

Outra particularidade da análise de observabilidade e de redundância de medidas, para modelagem trifásica da rede, ocorre devido ao acoplamento mútuo entre as fases, que pode causar relações de redundância entre medidas de fases distintas (ALMEIDA et al., 2009).

4.4 Algoritmo Proposto

Da mesma forma que a metodologia proposta em (LONDON Jr. et al., 2007), para implementar a metodologia proposta neste capítulo é mais fácil trabalhar com a matriz Jacobiana transposta. Dessa forma, o algoritmo proposto será apresentado considerando as matrizes $H_{3\phi}^t$ e $H_{\Delta 3\phi}^t$ ao invés das matrizes $H_{3\phi}$ e $H_{\Delta 3\phi}$.

Passo 1: A partir das medidas disponíveis monte a matriz $H_{3\phi}^t$, considerando o *flat start* definido em (4.58). Em seguida, fatore essa matriz, armazenando os fatores triangulares, até que $H_{3\phi}^t(d, d) = 0$. Se $d = N_{3\phi} + 1$, o sistema é observável como um todo; vá para o Passo 4. Caso contrário, o sistema não é observável como um todo, sendo necessário restaurar a observabilidade do mesmo; vá para o próximo passo;

$$\begin{aligned} E_i^a &= 1 \angle 0^\circ pu \\ E_i^b &= 1 \angle -120^\circ pu \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, n \\ E_i^c &= 1 \angle 120^\circ pu \end{aligned} \quad (4.58)$$

Passo 2: Determine, através do procedimento descrito na seção 3.3 do Capítulo 3 (Restauração da Observabilidade), a pseudo-medida que fornece informação da variável de estado equivalente associada à coluna “ d ”. Em seguida, vá para o Passo 3;

Passo 3: Continue a fatoração da matriz $H_{3\phi}^t$ até que $H_{3\phi}^t(d, d) = 0$. Se $d = N_{3\phi} + 1$, o sistema tornou-se observável; vá para o próximo passo. Caso contrário, volte ao Passo 2;

Passo 4: Obtenha a matriz $H_{\Delta 3\phi}^t$ e identifique as MCs e os CCMs através dos 4 passos apresentados na seção 3.4 do capítulo 3. Fim de processamento.

4.5 Exemplos de Aplicação

Nesta seção apresentar-se-ão dois exemplos da aplicação do algoritmo proposto em um sistema teste de três barras. Para isso, o algoritmo apresentado na seção anterior foi

implantado em computador, em linguagem C++.

Exemplo 1: Na figura 4.8 ilustra-se o sistema de três barras trifásico e o sistema de medição considerado neste exemplo. As barras 3 e 1 representam, respectivamente, as barras interna e terminal de um gerador. As medidas de injeção de potência ativa e reativa na barra 1 são medidas virtuais (medidas nulas). Os ramos de 1 para 2 representam as fases de uma linha trifásica equilibrada. A barra 2 é uma barra de carga. Os dados da rede e os de barra do sistema utilizados estão dispostos nas Tabelas 4.2. e 4.3, respectivamente.

Observe que para esse sistema existem 13 variáveis de estado para serem estimadas ($\theta_{1a}, \theta_{1b}, \theta_{1c}, \theta_{2a}, \theta_{2b}, \theta_{2c}, V_{3a}, V_{1a}, V_{1b}, V_{1c}, V_{2a}, V_{2b}$ e V_{2c}).

Figura 4.8: Sistema trifásico 2 barras.

Tabela 4.2 - Dados da rede trifásica do Sistema ilustrado na Figura 4.8.

Parâmetros da rede		Resistência série das linhas (parâmetros em pu)							
		Raa	Rbb	Rcc	Rba	Rca	Rcb	Rab	Rac
		0.006	0.006	0.006	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
		Reatância série das linhas (parâmetros em pu)							
		Xaa	Xbb	Xcc	Xba	Xca	Xcb	Xab	Xac
Linha 1-2		0.050	0.050	0.050	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017
		Shunt das linhas (parâmetros em pu)							
		Yaa	Ybb	Ycc	Yba	Yca	Ycb	Yab	Yac
		0.0350	0.0350	0.0350	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006

Tabela 4.3 - Dados de barra do Sistema ilustrado na Figura 4.8.

Parâmetros das cargas		Pa	Qa	Pb	Qb	Pc	Qc
Barras	1	-48.77	-20.10	-48.77	-20.10	-48.77	-20.10
	2	-47.77	-15.20	-47.77	-15.20	-47.77	-15.20

Passo 1: Considerando as medidas indicadas na Figura 4.8, obtêm-se a seguinte matriz

$H'_{3\phi}$:

	$V:3_a$	$F_p:12_a$	$F_p:12_b$	$F_p:12_c$	$F_q:12_a$	$F_q:12_b$	$F_q:12_c$	$P:1_a$	$P:1_b$	$P:1_c$	$Q:1_a$	$Q:1_b$	$Q:1_c$
θ_{1a}	0.00	23.83	3.66	2.38	-2.88	4.86	-5.60	63.04	34.05	32.77	-2.88	6.11	-6.85
θ_{1b}	0.00	2.38	23.83	3.66	-5.60	-2.88	4.86	32.77	63.04	34.05	-6.85	-2.88	6.11
θ_{1c}	0.00	3.66	2.38	23.83	4.86	-5.60	-2.88	34.05	32.77	63.04	6.11	-6.85	-2.88
θ_{2a}	0.00	-23.82	-3.66	-2.38	2.88	-4.86	5.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
θ_{2b}	0.00	-2.38	-23.82	-3.66	5.60	2.88	-4.86	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
θ_{2c}	0.00	-3.66	-2.38	-23.82	-4.86	5.60	2.88	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
θ_{3a}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-39.22	-30.39	-30.39	0.00	-1.25	1.25
V_{1a}	0.00	2.88	-4.86	5.60	23.78	3.66	2.38	2.88	-6.11	6.85	63.00	34.05	32.77
V_{1b}	0.00	5.60	2.88	-4.86	2.38	23.78	3.66	6.85	2.88	-6.11	32.77	63.00	34.05
V_{1c}	0.00	-4.86	5.60	2.88	3.66	2.38	23.78	-6.11	6.85	2.88	34.05	32.77	63.00
V_{2a}	0.00	-2.88	4.86	-5.60	-23.82	-3.66	-2.38	0.00	-0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
V_{2b}	0.00	-5.60	-2.88	4.86	-2.38	-23.82	-3.66	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
V_{2c}	0.00	4.86	-5.60	-2.88	-3.66	-2.38	-23.82	-0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
V_{3a}	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.25	-1.25	-39.22	-30.39	-30.39

Fatorando a matriz acima, encontra-se um pivo nulo apenas na diagonal 14.

Como $N_{3\phi}+1=14$, o sistema é observável como um todo.

Passo 4: Continuando a fatoração triangular obtém-se a seguinte matriz $H\Delta'_{3\phi}$:

	$F_p:12_a$	$F_p:12_b$	$F_p:12_c$	$F_q:12_a$	$F_q:12_b$	$F_q:12_c$	$V:3_a$	$P:1_a$	$P:1_b$	$P:1_c$	$Q:1_a$	$Q:1_b$	$Q:1_c$
θ_{1a}	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
θ_{1b}	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
θ_{1c}	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
θ_{2a}	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
θ_{2b}	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
θ_{2c}	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
θ_{3a}	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
V_{1a}	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
V_{1b}	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
V_{1c}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
V_{2a}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
V_{2b}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
V_{2c}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
V_{3a}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Sendo que os prefixos que aparecem nas matrizes representam o que segue:

F_p : Fluxo de Potência Ativa;

F_q : Fluxo de Potência Reativa;

V : Tensão;

P : Injeção de Potência Ativa;

Q : Injeção de Potência Reativa.

Analisando as linhas dessa matriz, da forma apresentada no Capítulo 3, verifica-se que todas as medidas disponíveis são críticas.

Exemplo 2: Neste exemplo será usado o mesmo sistema, ilustrado na Figura 4.8, porém com o cenário de medição modificado, considerando agora as medidas apresentadas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Cenário de medidas para o sistema ilustrado na Figura 4.8.

Medidas Disponíveis	
$F_p : 1-2_a$	$F_p : 2-1_a$
$F_p : 1-2_b$	$P : 1_a$
$F_p : 1-2_c$	$P : 1_b$
$F_q : 1-2_a$	$P : 1_c$
$F_q : 1-2_b$	$V : 3_a$
$F_q : 1-2_c$	

Passo 1: Considerando as medidas indicadas na Tabela 4.4, obtêm-se a seguinte matriz

$H'_{3\phi}$:

	$V:3_a$	$F_p:12_a$	$F_p:12_b$	$F_p:12_c$	$F_p:21_a$	$F_q:12_a$	$F_q:12_b$	$F_q:12_c$	$P:1_a$	$P:1_b$	$P:1_c$
θ_{1a}	0.00	23.83	3.66	2.38	-23.82	-2.88	4.86	-5.60	63.04	34.05	32.77
θ_{1b}	0.00	2.38	23.83	3.66	-2.38	-5.60	-2.88	4.86	32.77	63.04	34.05
θ_{1c}	0.00	3.66	2.38	23.83	-3.66	4.86	-5.60	-2.88	34.05	32.77	63.04
θ_{2a}	0.00	-23.82	-3.66	-2.38	23.83	2.88	-4.86	5.60	0.00	0.00	0.00
θ_{2b}	0.00	-2.38	-23.82	-3.66	2.38	5.60	2.88	-4.86	0.00	0.00	0.00
θ_{2c}	0.00	-3.66	-2.38	-23.82	3.66	-4.86	5.60	2.88	0.00	0.00	0.00
θ_{3a}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-39.22	-30.39	-30.39
V_{1a}	0.00	2.88	-4.86	5.60	-2.88	23.78	3.66	2.38	2.88	-6.11	6.85
V_{1b}	0.00	5.60	2.88	-4.86	-5.60	2.38	23.78	3.66	6.85	2.88	-6.11
V_{1c}	0.00	-4.86	5.60	2.88	4.86	3.66	2.38	23.78	-6.11	6.85	2.88
V_{2a}	0.00	-2.88	4.86	-5.60	2.88	-23.82	-3.66	-2.38	0.00	-0.00	0.00
V_{2b}	0.00	-5.60	-2.88	4.86	5.60	-2.38	-23.82	-3.66	0.00	0.00	-0.00
V_{2c}	0.00	4.86	-5.60	-2.88	4.86	-3.66	-2.38	-23.82	-0.00	0.00	0.00
V_{3a}	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.25	-1.25

Fatorando a matriz acima, verifica-se que o sistema não é observável como um todo. Conforme Matriz $H'_{3\phi}$.

	$F_{p:12a}$	$F_{p:12b}$	$F_{p:12c}$	$F_{q:12a}$	$F_{p:21a}$	$F_{q:12b}$	$F_{q:12c}$	$V:3a$	$P:1a$	$P:1b$	$P:1c$
θ_{1a}	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
θ_{1b}	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
θ_{1c}	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
θ_{2a}	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
θ_{2b}	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
θ_{2c}	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
θ_{3a}	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
V_{1a}	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
V_{1b}	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
V_{1c}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
V_{2a}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
V_{2b}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V_{2c}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V_{3a}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Passo 2: Verificar quais pseudo-medidas são necessárias para restauração da observabilidade. Neste caso, foram adicionadas as medidas de tensão na barra **2**, fase **b** e **c**, aplicando os fatores, obtém-se então a Matriz $H'_{3\phi}$ abaixo.

	$V:3a$	$F_{p:12a}$	$F_{p:12b}$	$F_{p:12c}$	$F_{p:21a}$	$F_{q:12a}$	$F_{q:12b}$	$F_{q:12c}$	$P:1a$	$P:1b$	$P:1c$	$V:2b$	$V:2c$
θ_{1a}	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
θ_{1b}	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
θ_{1c}	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
θ_{2a}	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
θ_{2b}	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
θ_{2c}	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
θ_{3a}	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
V_{1a}	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
V_{1b}	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
V_{1c}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
V_{2a}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
V_{2b}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
V_{2c}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
V_{3a}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Passo 3: Analisando a matriz $H'_{\Delta 3\phi}$, verificou que as pseudo-medidas foram suficientes

para restaurar a observabilidade. Isto porque $d = N_{3\phi} + 1 = 14$.

Passo 4: Todas as medidas são consideradas críticas.

4.6 Conclusões

Apresentou-se, neste capítulo, uma metodologia simples, de fácil implantação em computador, que possibilita análise e restauração da observabilidade e identificação de MCs e de CCMs, no contexto de estimação de estado trifásica. Para isso, foi estendida, para modelagem trifásica, a metodologia proposta para modelagem monofásica apresentada em (LONDON Jr. et al., 2007).

A metodologia desenvolvida neste capítulo trabalha a partir da fatoração triangular da matriz Jacobina do estimador WLS trifásico proposto em (ZHONG e ABUR, 2002).

Para exemplificar a aplicação da metodologia proposta, apresentaram-se dois exemplos da sua aplicação, ilustrando todos os passos do algoritmo desenvolvido.

Para comprovar a eficiência da metodologia proposta, no próximo capítulo serão realizados diversos testes da sua aplicação em sistemas trifásicos já empregados em outros trabalhos da área, contendo 4, 7 e 38 barras.

Capítulo 5

5 Testes e análises dos resultados

Os testes realizados, descritos neste capítulo, visam a comprovar a eficiência da metodologia proposta para análise e restauração de observabilidade e identificação de MCs e de CCMs, no contexto de estimação de estado trifásica.

Para realizar os testes, a metodologia foi implementada em computador, através da linguagem C++ (sistema operacional Windows 7 Professional), e aplicada em 3 sistemas trifásicos já empregados em outros trabalhos da área, contendo 4, 7 e 38 barras. O computador utilizado para realização dos testes possui processador Intel(R) Core (TM)2 Quad CPU Q8200 com Memória (RAM) de 4.00GB.

Conforme apresentado anteriormente, o primeiro passo do algoritmo proposto, apresentado no capítulo 4, é a construção da matriz Jacobiana do estimador de estado WLS trifásico. Para isso, considerar-se-á o “flat start” definido pela Equação (5.1) e os valores reais dos parâmetros dos sistemas em análise, sem aproximação alguma.

$$\begin{aligned} E_i^a &= 1 \angle 0^\circ pu \\ E_i^b &= 1 \angle -120^\circ pu \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, n \\ E_i^c &= 1 \angle 120^\circ pu \end{aligned} \quad (5.1)$$

5.1. Testes com o sistema de 4 Barras

Nesta seção serão apresentados os testes realizados com o sistema trifásico de 4 barras utilizado em (ALMEIDA, 2007). A topologia desse sistema é apresentada na Figura 5.2. Nessa figura, o ramo 1-2 representa um transformador trifásico conectado em delta-estrela aterrado, o ramo 2-3 representa uma linha trifásica desequilibrada, as barras 2 e 3 são barras de carga (considera-se que as cargas são desbalanceadas) e as barras 4 e 1 representam as barras interna e terminal de um gerador. Os dados do sistema estão dispostos no apêndice A. Observe que para esse sistema existem 19 variáveis de estado para serem estimadas.

$(\theta_{1a}, \theta_{1b}, \theta_{1c}, \theta_{2a}, \theta_{2b}, \theta_{2c}, \theta_{3a}, \theta_{3b}, \theta_{3c}, V_{4a}, V_{1a}, V_{1b}, V_{1c}, V_{2a}, V_{2b}, V_{2c}, V_{3a}, V_{3b} \text{ e } V_{3c})$.

Para esse sistema foram testados 4 sistemas de medição, que serão a seguir discriminados.

Figura 5.1: Sistema de 4 barras.

Caso 1

O sistema de medição considerado no Caso 1 é apresentado na Tabela 5.1 e possui um total de 19 medidas. Destaca-se que as medidas de injeção de potência ativa indicadas na barra 1 são na verdade medidas virtuais (nulas), pois para este caso não está sendo considerada a existência de carga alguma na barra 1. Observe que para analisar o funcionamento da metodologia não estão sendo consideradas as medidas de injeção de potência reativa virtuais na barra 1.

Tabela 5.1: Sistema de Medição – Caso 1 – Sistema de 4 barras

Injeção de Potência Ativa	$P_1^{abc}, P_2^{abc}, P_3^b,$
Fluxo de Potência Ativa	$Fp_{3-2}^b;$
Injeção de Potência Reativa	Nenhuma.
Fluxo de Potência Reativa	Nenhuma.
Magnitude de Tensão	$V_1^{abc}, V_2^{abc}, V_3^{abc}, V_4^a$

Neste caso, as medidas disponíveis não foram suficientes para tornar o sistema observável como um todo. A Tabela 5.2 apresenta os resultados da aplicação da metodologia, apresentando as pseudo-medidas necessárias para restauração da observabilidade, bem como as MCs e os CCMs.

Tabela 5.2: Resultado - Caso 1 - Sistema de 4 barras.

O sistema é observável?	Não
Pseudo-medidas adicionadas para restaurar a observabilidade	Fp_{2-3}^a
CCMs	$P_3^b; Fp_{3-2}^b$
MCs	As demais medidas e a pseudo-medida são críticas

Caso 2

Analizou-se, para este caso, o sistema de medição apresentado na Tabela 5.3. O resultado, seguem dispostos na Tabela 5.4.

Tabela 5.3: Sistema de Medição – Caso 2 – Sistema de 4 barras

Injeção de Potência Ativa	$P_1^{abc}; P_2^{abc};$
Fluxo de Potência Ativa	$Fp_{2-3}^b; Fp_{3-2}^{bc}$
Injeção de Potência Reativa	Nenhuma.
Fluxo de Potência Reativa	Nenhuma.
Magnitude de Tensão	$V_1^{abc}; V_2^{abc}; V_3^{abc}; V_4^a$

Tabela 5.4: Resultado-Caso2 - Sistema de 4 barras.

O sistema é observável?	Sim
Pseudo-medidas adicionadas para restaurar a observabilidade	-----
CCMs	-----
MCs	Todas as medidas são críticas.

Caso 3

Neste caso, o cenário de medidas utilizado está disposto na Tabela 5.5. O resultado da análise está na Tabela 5.6.

Tabela 5.5: Sistema de Medição - Caso 3- Sistema de 4 barras

Injeção de Potência Ativa	$P_1^{abc}; P_2^{abc}; P_3^a;$
Fluxo de Potência Ativa	$Fp_{2-3}^b; Fp_{3-2}^{bc}$
Injeção de Potência Reativa	Nenhuma
Fluxo de Potência Reativa	Nenhuma

Magnitude de Tensão	$V_1^{abc}, V_2^{abc}, V_3^{abc}, V_4^a$
---------------------	--

Tabela 5.6: Resultado Caso 3 - sistema de 4 barras

O sistema é observável?	Sim
Pseudo-medidas adicionadas para restaurar a observabilidade	-----
CCMs	Todas as medidas formam um CCM
MCs	-----

Caso 4

O sistema de medição considerado neste teste encontra-se na Tabela 5.7. A principal diferença desse sistema de medição, em relação aos anteriores, é que neste sistema está sendo considerada medidas de reativo.

Tabela 5.7: Sistema de Medição – Caso 4 – Sistema de 4 barras

Injeção de Potência Ativa	$P_1^{abc}, P_2^{abc}, P_3^b,$
Fluxo de Potência Ativa	Fp_{3-2}^{bc}
Injeção de Potência Reativa	Nenhuma
Fluxo de Potência Reativa	Fq_{3-2}^{bc}
Magnitude de Tensão	$V_1^{abc}, V_2^{abc}, V_3^{abc}, V_4^a$

O sistema é observável como um todo, e os resultados seguem, conforme ilustrado, na Tabela 5.8.

Tabela 5.8: Resultado Caso 4 - sistema de 4 barras

O sistema é observável?	Não
Pseudo-medidas adicionadas para restaurar a observabilidade	-----
CCMs	$P_3^b; Fp_{3-2}^b;$
MCs	As demais medidas são críticas

5.2. Testes com o sistema de 7 Barras

Nesta seção serão apresentados os testes realizados com o sistema trifásico de 7 barras utilizado em (ALMEIDA, 2007). A topologia desse sistema é apresentada na Figura 5.2. Nessa figura, o ramo 6-4 representa um transformador trifásico conectado

em delta-estrela aterrado, o ramo 1-2, 2-3, 3-4 e 4-5 representam linhas trifásicas desequilibradas, as barras 7 e 6 representam as barras interna e terminal de um gerador. A barra 4 é uma barra de transferência e as demais barras são barras de carga (as cargas são desbalanceadas). Vale lembrar, que os dados do sistema seguem dispostos no apêndice A. Observe que para esse sistema existem 37 variáveis de estado para serem estimadas.

Figura 5.2: Sistema de 7 barras.

Caso 1

A Tabela 5.9 apresenta o sistema de medição considerado neste teste.

Tabela 5.9: Sistema de Medição – Caso 1 – Sistema de 7 barras.

Injeção de Potência Ativa	$P_2^{abc}; P_3^{abc}; P_5^{abc}; P_6^{abc}$
Fluxo de Potência Ativa	$Fp_{1-2}^{abc}; Fp_{4-3}^{abc}$
Injeção de Potência Reativa	Nenhuma
Fluxo de Potência Reativa	Nenhuma
Magnitude de Tensão	$V_1^{abc}; V_2^{abc}; V_4^{abc}; V_5^{abc}; V_6^{abc}; V_7^a$

Aplicando a metodologia proposta verifica-se que com as medidas apresentadas na Tabela 5.9 o sistema é observável como um todo. Os resultados seguem apresentados na Tabela 5.10.

Tabela 5.10: Resultado Caso 1 - sistema de 7 barras.

O sistema é observável?	Sim
Pseudo-medidas adicionadas para restaurar a observabilidade	-----
CCMs	-----
MCs	$V_5^{abc}; P_5^{abc}$.

Caso 2

Considere, para o mesmo sistema ilustrado na Figura 5.2, o sistema de medição apresentado na Tabela 5.11. Os resultados estão apresentados na Tabela 5.12.

Tabela 5.12: Sistema de Medição – Caso 2 – Sistema de 7 barras

Injeção de Potência Ativa	$P_1^{abc}, P_2^{abc}, P_3^{abc}, P_4^{abc}, P_5^{abc}, P_6^{abc}$
Fluxo de Potência Ativa	$P_{31}^a, P_{32}^a, P_{34}^a$
Injeção de Potência Reativa	Nenhuma
Fluxo de Potência Reativa	Nenhuma
Magnitude de Tensão	$V_2^{bc}, V_3^{bc}, V_4^{abc}, V_5^{abc}, V_6^{abc}, V_7^a$

Tabela 5.13: Resultado caso 2 – sistema 7 barras

O sistema é observável?	Não
Pseudo-medidas adicionadas para restaurar a observabilidade	V_1^{abc}
CCMs	(1) $[P_{31}^a, P_{32}^a, P_3^a, P_{34}^a]$
MCs	As outras medidas são consideradas críticas.

Caso 3

O sistema de medição considerado neste teste e os resultados encontram-se, respectivamente, nas Tabelas 5.14 e 5.15.

Tabela 5.14: Sistema de Medição – Caso 3 – Sistema de 7 barras

Injeção de Potência Ativa	$P_1^{abc}, P_2^{abc}, P_3^{abc}, P_4^{abc}, P_5^{abc}, P_6^{abc}$
Fluxo de Potência Ativa	P_{54}^{abc}
Injeção de Potência Reativa	Nenhuma
Fluxo de Potência Reativa	Nenhuma
Magnitude de Tensão	$V_1^{abc}, V_2^{abc}, V_3^{abc}, V_4^{abc}, V_5^{abc}, V_6^{abc}, V_7^a$

Tabela 5.15: Resultado Caso 3 - sistema de 7 barras

O sistema é observável?	Sim
Pseudo-medidas adicionadas para restaurar a observabilidade	-----

CCMs	1) $[P_5^a, P_{54}^a];$ 3) $[P_5^e, P_{54}^e];$	2) $[P_5^b, P_{54}^b];$
MCs	As outras medidas são consideradas críticas.	

Caso 4

Analisando, para o sistema de 7 barras, ilustrado na Figura 5.2, o conjunto de medidas apresentado na Tabela 5.16. Os resultados seguem apresentados na Tabela 5.17.

Tabela 5.16: Sistema de Medição – Caso 4 – Sistema de 7 barras

Injeção de Potência Ativa	$P_2^{abc}; P_3^{abc}; P_4^{abc}; P_5^{abc}; P_6^{abc}$
Fluxo de Potência Ativa	Nenhuma
Injeção de Potência Reativa	$Q_5^{abc};$
Fluxo de Potência Reativa	Nenhuma
Magnitude de Tensão	$V_1^{abc}; V_2^{abc}; V_3^{abc}; V_4^{abc}; V_6^{abc}; V_7^a$

Tabela 5.17: Resultado caso 4 – sistema 7 barras

O sistema é observável?	Não
Pseudo-medidas adicionadas para restaurar a observabilidade	P_{12}^{abc}
CCMs	-----
MCs	Todas as medidas e a pseudo-medida são consideradas críticas.

5.3. Testes com o sistema de 38 Barras

O sistema de 38 barras, é um sistema de distribuição, localizado na cidade de Belo Horizonte apresentado na Figura 5.3, é um sistema trifásico equilibrado e maior que os sistemas analisados anteriormente. De acordo com a Figura 5.3, a barra 38 e 37 são consideradas, respectivamente, a barra interna e a barra terminal de um gerador. Para este sistemas as medidas de potência existentes estarão sempre aos pares (ativa e reativa).

Figura 5.3: Topologia do sistema 38 barras.

Caso 1

Considere o sistema de medição apresentado na Tabela 5.18. Os resultados seguem apresentados na Tabela 5.19.

Tabela 5.18: Sistema de Medição – Caso 1 – Sistema de 38 barras

Injeção de Potência Ativa	$P_1^{abc}; P_4^{abc}; P_7^{abc}; P_{10}^{abc}; P_{13}^{abc}; P_{16}^{abc};$ $P_{19}^{abc}; P_{22}^{abc}; P_{25}^{abc}; P_{28}^{abc}; P_{31}^{abc}; P_{34}^{abc}; P_{37}^{abc}$
Fluxo de Potência Ativa	$Fp_{37-1}^{abc}; Fp_{1-37}^{abc}; Fp_{1-3}^{abc}; Fp_{1-4}^{abc}; Fp_{4-6}^{abc}; Fp_{4-7}^{abc};$ $Fp_{7-9}^{abc}; Fp_{10-12}^{abc}; Fp_{10-13}^{abc}; Fp_{13-15}^{abc}; Fp_{13-16}^{abc};$ $Fp_{16-18}^{abc}; Fp_{16-19}^{abc}; Fp_{19-21}^{abc}; Fp_{19-22}^{abc};$ $Fp_{22-24}^{abc}; Fp_{22-25}^{abc}; Fp_{25-27}^{abc}; Fp_{25-28}^{abc};$ $Fp_{28-30}^{abc}; Fp_{28-31}^{abc}; Fp_{31-33}^{abc}; Fp_{31-34}^{abc};$ $Fp_{34-35}^{abc};$
Injeção de Potência Reativa	$Q_1^{abc}; Q_4^{abc}; Q_7^{abc}; Q_{10}^{abc}; Q_{13}^{abc}; Q_{16}^{abc};$ $Q_{19}^{abc}; Q_{22}^{abc}; Q_{25}^{abc}; Q_{28}^{abc}; Q_{31}^{abc}; Q_{34}^{abc}; Q_{37}^{abc}$
Fluxo de Potência Reativa	$Fq_{37-1}^{abc}; Fq_{1-37}^{abc}; Fq_{1-3}^{abc}; Fq_{1-4}^{abc}; Fq_{4-6}^{abc}; Fq_{4-7}^{abc};$ $Fq_{7-9}^{abc}; Fq_{10-12}^{abc}; Fq_{10-13}^{abc}; Fq_{13-15}^{abc}; Fq_{13-16}^{abc};$ $Fq_{16-18}^{abc}; Fq_{16-19}^{abc}; Fq_{19-21}^{abc}; Fq_{19-22}^{abc};$ $Fq_{22-24}^{abc}; Fq_{22-25}^{abc}; Fq_{25-27}^{abc}; Fq_{25-28}^{abc};$

	$Fq_{28-30}^{abc}; Fq_{28-31}^{abc}; Fq_{31-33}^{abc}; Fq_{31-34}^{abc};$ $Fq_{34-35}^{abc};$
Magnitude de Tensão	$V_{38}^a; V_{37}^{abc}; V_2^{abc}; V_4^{abc}; V_5^{abc}; V_8^{abc}; V_{11}^{abc};$ $V_{14}^{abc}; V_{17}^{abc}; V_{20}^{abc}; V_{23}^{abc}; V_{26}^{abc}; V_{29}^{abc}; V_{32}^{abc};$ V_{35}^{abc}

Tabela 5.19: Resultado caso 1 – Sistema de 38 barras.

O sistema é observável?	Sim
Pseudo-medidas adicionadas para restaurar a observabilidade	-----
CCMs	(1)[$Q_1^a; Fq_{1-3}^a$] (2)[$Q_1^b; Fq_{1-3}^b$] (3)[$Q_1^c; Fq_{1-3}^c$] (4)[$Q_4^a; Fq_{4-6}^a$] (5)[$Q_4^b; Fq_{4-6}^b$] (6)[$Q_4^c; Fq_{4-6}^c$] (7)[$Q_7^a; Fq_{7-9}^a$] (8)[$Q_7^b; Fq_{7-9}^b$] (9)[$Q_7^c; Fq_{7-9}^c$] (10)[$Q_{10}^a; Fq_{10-12}^a$] (11)[$Q_{10}^b; Fq_{10-12}^b$] (12)[$Q_{10}^c; Fq_{10-12}^c$] (13)[$Q_{13}^a; Fq_{13-15}^a$] (14)[$Q_{13}^b; Fq_{13-15}^b$] (15)[$Q_{13}^c; Fq_{13-15}^c$] (16)[$Q_{16}^a; Fq_{16-18}^a$] (17)[$Q_{16}^b; Fq_{16-18}^b$] (18)[$Q_{16}^c; Fq_{16-18}^c$] (19)[$Q_{19}^a; Fq_{19-21}^a$] (20)[$Q_{19}^b; Fq_{19-21}^b$] (21)[$Q_{19}^c; Fq_{19-21}^c$] (22)[$Q_{22}^a; Fq_{22-24}^a$] (23)[$Q_{22}^b; Fq_{22-24}^b$] (24)[$Q_{22}^c; Fq_{22-24}^c$] (25)[$Q_{25}^a; Fq_{25-27}^a$] (26)[$Q_{25}^b; Fq_{25-27}^b$] (27)[$Q_{25}^c; Fq_{25-27}^c$] (26)[$Q_{28}^a; Fq_{28-30}^a$] (27)[$Q_{28}^b; Fq_{28-30}^b$] (28)[$Q_{28}^c; Fq_{28-30}^c$] (29)[$Q_{31}^a; Fq_{31-33}^a$] (30)[$Q_{31}^b; Fq_{31-33}^b$] (31)[$Q_{31}^c; Fq_{31-33}^c$] (29)[$Q_{33}^a; Fq_{33-35}^a$] (30)[$Q_{33}^b; Fq_{33-35}^b$] (31)[$Q_{33}^c; Fq_{33-35}^c$]
MCs	V_{38}^a ;

Caso 2

Considera-se, neste caso, o sistema de medição apresentado na Tabela 5.20. Os resultados do teste estão na Tabela 5.21. Sendo assim, caso aconteça a retirada de alguma medida dita crítica ou duas ou mais medidas pertencente a um conjunto crítico de medidas, o sistema perderá a observabilidade.

Tabela 5.20: Sistema de Medição – Caso 2 – Sistema de 38 barras

Injeção de Potência Ativa	$P_1^{abc}; P_7^{abc}; P_{10}^{abc}; P_{13}^{abc}; P_{16}^{abc}; P_{22}^{abc}; P_{25}^{abc};$ $P_{28}^{abc}; P_{31}^{abc}; P_{34}^{abc}; P_{37}^{abc}$
Fluxo de Potência Ativa	$Fp_{37-1}^{abc}; Fp_{1-37}^{abc}; Fp_{1-3}^{ab}; Fp_{1-4}^{abc}; Fp_{4-6}^{abc}; Fp_{4-7}^{abc};$ $Fp_{7-9}^{abc}; Fp_{10-12}^{abc}; Fp_{10-13}^{abc}; Fp_{16-18}^{abc}; Fp_{16-19}^{abc};$ $Fp_{19-21}^{abc}; Fp_{19-22}^{abc}; Fp_{22-24}^{abc}; Fp_{22-25}^{abc};$ $Fp_{25-27}^{abc}; Fp_{25-28}^{abc}; Fp_{28-30}^{abc}; Fp_{28-31}^{abc};$ $Fp_{31-33}^{abc}; Fp_{31-34}^{abc}; Fp_{34-35}^{abc};$
Injeção de Potência Reativa	$Q_1^{abc}; Q_7^{abc}; Q_{10}^{abc}; Q_{13}^{abc}; Q_{16}^{abc}; Q_{22}^{abc}; Q_{25}^{abc};$ $Q_{28}^{abc}; Q_{31}^{abc}; Q_{34}^{abc}; Q_{37}^{abc}$
Fluxo de Potência Reativa	$Fq_{37-1}^{abc}; Fq_{1-37}^{abc}; Fq_{1-3}^{ab}; Fq_{1-4}^{abc}; Fq_{4-6}^{abc}; Fq_{4-7}^{abc};$ $Fq_{7-9}^{abc}; Fq_{10-12}^{abc}; Fq_{10-13}^{abc}; Fq_{16-18}^{abc}; Fq_{16-19}^{abc};$ $Fq_{19-21}^{abc}; Fq_{19-22}^{abc}; Fq_{22-24}^{abc}; Fq_{22-25}^{abc};$ $Fq_{25-27}^{abc}; Fq_{25-28}^{abc}; Fq_{28-30}^{abc}; Fq_{28-31}^{abc};$ $Fq_{31-33}^{abc}; Fq_{31-34}^{abc}; Fq_{34-35}^{abc};$
Magnitude de Tensão	$V_{38}^a; V_{37}^{abc}; V_2^{abc}; V_4^{abc}; V_5^{abc}; V_8^{abc}; V_{11}^{abc};$ $V_{14}^{abc}; V_{17}^{abc}; V_{20}^{abc}; V_{23}^{abc}; V_{26}^{abc}; V_{29}^{abc}; V_{32}^{abc};$ V_{35}^{abc}

Tabela 5.21: Resultado caso 2 – Sistema de 38 barras.

O sistema é observável?	Não
Pseudo-medidas adicionadas para restaurar a observabilidade	$Fp_{13-14}^a; Fp_{13-14}^b; Fp_{13-14}^c;$
CCMs	(1)[$Q_7^a; Fq_{7-9}^a$] (2)[$Q_7^b; Fq_{7-9}^b$] (3)[$Q_7^c; Fq_{7-9}^c$] (10)[$Q_{10}^a; Fq_{10-12}^a; Fq_{10-13}^a$] (11)[$Q_{10}^b; Fq_{10-12}^b; Fq_{10-13}^b$] (12)[$Q_{10}^c; Fq_{10-12}^c; Fq_{10-13}^c$] (25)[$Q_{25}^a; Fq_{25-27}^a$] (26)[$Q_{25}^b; Fq_{25-27}^b$] (27)[$Q_{25}^c; Fq_{25-27}^c$] (26)[$Q_{28}^a; Fq_{28-30}^a$] (27)[$Q_{28}^b; Fq_{28-30}^b$] (28)[$Q_{28}^c; Fq_{28-30}^c$] (29)[$Q_{31}^a; Fq_{31-33}^a$] (30)[$Q_{31}^b; Fq_{31-33}^b$] (31)[$Q_{31}^c; Fq_{31-33}^c$] (29)[$Q_{34}^a; Fq_{34-35}^a$] (30)[$Q_{34}^b; Fq_{34-35}^b$] (31)[$Q_{34}^c; Fq_{34-35}^c$]
MCs	$V_{38}^a; V_2^{abc}; V_{20}^{abc}; Q_1^{abc}; Q_{13}^{abc}; Q_{16}^{abc};$ $Fp_{13-14}^{abc}; Fp_{16-18}^{abc}; Fp_{16-19}^{abc}; Fp_{19-21}^{abc};$ $Fq_{16-18}^{abc}; Fq_{16-19}^{abc}; Fq_{19-21}^{abc};$

Caso 3

Supondo, que para o sistema ilustrado na Figura 5.6 e considerando as medidas utilizadas no caso anterior, exceto as medidas de injeção de potência reativa Q_{10}^{abc} e as medidas de fluxo de potência reativa Fq_{10-12}^{abc} , que no caso anterior formavam um conjunto crítico de medidas. O objetivo deste caso, quando comparado ao anterior, é verificar que quando se trata de um conjunto crítico de medidas e se perde mais de uma medida pertencente a este conjunto, o sistema perde a observabilidade. As pseudo-medidas adicionadas no caso anterior, foram consideradas como medidas disponíveis neste caso. Os resultados, seguem na Tabela 5.22.

Tabela 5.22: Resultado caso 3 – sistema 38 barras

O sistema é observável?	Não
Pseudo-medidas adicionadas para restaurar a observabilidade	$V_{11}^a; V_{11}^b; V_{11}^c;$
CCMs	(1)[$Q_1^a; Fq_{1-3}^a$] (2)[$Q_1^b; Fq_{1-3}^b$] (3)[$Q_1^c; Fq_{1-3}^c$] (4)[$Q_4^a; Fq_{4-6}^a$] (5)[$Q_4^b; Fq_{4-6}^b$] (6)[$Q_4^c; Fq_{4-6}^c$] (7)[$Q_7^a; Fq_{7-9}^a$] (8)[$Q_7^b; Fq_{7-9}^b$] (9)[$Q_7^c; Fq_{7-9}^c$] (10)[$Q_{13}^a; Fq_{13-15}^a$] (11)[$Q_{13}^b; Fq_{13-15}^b$] (12)[$Q_{13}^c; Fq_{13-15}^c$] (13)[$Q_{16}^a; Fq_{16-18}^a$] (14)[$Q_{16}^b; Fq_{16-18}^b$] (15)[$Q_{16}^c; Fq_{16-18}^c$] 16[$Q_{19}^a; Fq_{19-21}^a$] (17)[$Q_{19}^b; Fq_{19-21}^b$] (18)[$Q_{19}^c; Fq_{19-21}^c$] (19)[$Q_{22}^a; Fq_{22-24}^a$] (20)[$Q_{22}^b; Fq_{22-24}^b$] (21)[$Q_{22}^c; Fq_{22-24}^c$] (22)[$Q_{25}^a; Fq_{25-27}^a$] (23)[$Q_{25}^b; Fq_{25-27}^b$] (24)[$Q_{25}^c; Fq_{25-27}^c$] (26)[$Q_{28}^a; Fq_{28-30}^a$] (27)[$Q_{28}^b; Fq_{28-30}^b$] (28)[$Q_{28}^c; Fq_{28-30}^c$] (29)[$Q_{31}^a; Fq_{31-33}^a$] (30)[$Q_{31}^b; Fq_{31-33}^b$] (31)[$Q_{31}^c; Fq_{31-33}^c$] (29)[$Q_{34}^a; Fq_{34-35}^a$] (30)[$Q_{34}^b; Fq_{34-35}^b$] (31)[$Q_{34}^c; Fq_{34-35}^c$] (32)[$P_{13}^a; Fp_{13-15}^a$]
MCs	$V_{38}^a; V_{11}^{abc}; V_{12}^{abc}; P_{10}^{abc}; Fp_{10-12}^{abc};$

Caso 4

Considere agora o sistema de medição apresentado na Tabela 5.23. Os resultados estão apresentadas na Tabela 5.24.

Tabela 5.23: Sistema de Medição – Caso 4 – Sistema de 38 barras

Injeção de Potência Ativa	$P_1^{abc}; P_7^{abc}; P_9^{abc}; P_{10}^{abc}; P_{12}^{abc}; P_{13}^{abc}; P_{16}^{abc};$ $P_{22}^{abc}; P_{25}^{abc}; P_{28}^{abc}; P_{31}^{abc}; P_{34}^{abc}; P_{35}^{abc}; P_{37}^{abc}$
Fluxo de Potência Ativa	$Fp_{37-1}^{abc}; Fp_{1-37}^{abc}; Fp_{4-6}^{abc}; Fp_{6-4}^{abc}; Fp_{4-7}^{abc};$ $Fp_{7-4}^{abc}; Fp_{7-9}^{abc}; Fp_{7-10}^{abc}; Fp_{10-7}^{abc}; Fp_{10-12}^{abc};$ $Fp_{10-13}^{abc}; Fp_{16-18}^{abc}; Fp_{16-19}^{abc}; Fp_{19-21}^{abc};$ $Fp_{19-22}^{abc}; Fp_{22-19}^{abc}; Fp_{22-24}^{abc}; Fp_{22-25}^{abc};$ $Fp_{25-27}^{abc};$
Injeção de Potência Reativa	$Q_1^{abc}; Q_7^{abc}; Q_9^{abc}; Q_{10}^{abc}; Q_{12}^{abc}; Q_{13}^{abc}; Q_{16}^{abc};$ $Q_{22}^{abc}; Q_{25}^{abc}; Q_{28}^{abc}; Q_{31}^{abc}; Q_{34}^{abc}; Q_{35}^{abc}; Q_{37}^{abc}$
Fluxo de Potência Reativa	$Fq_{37-1}^{abc}; Fq_{1-37}^{abc}; Fq_{4-6}^{abc}; Fq_{6-4}^{abc}; Fq_{4-7}^{abc};$ $Fq_{7-4}^{abc}; Fq_{7-9}^{abc}; Fq_{7-10}^{abc}; Fq_{10-7}^{abc}; Fq_{10-12}^{abc};$ $Fq_{10-13}^{abc}; Fq_{16-18}^{abc}; Fq_{16-19}^{abc}; Fq_{19-21}^{abc};$ $Fq_{19-22}^{abc}; Fq_{22-19}^{abc}; Fq_{22-24}^{abc}; Fq_{22-25}^{abc};$ $Fq_{25-27}^{abc};$
Magnitude de Tensão	$V_{38}^a; V_{37}^{abc}; V_2^{abc}; V_4^{abc}; V_5^{abc}; V_8^{abc}; V_{11}^{abc};$ $V_{14}^{abc}; V_{17}^{abc}; V_{20}^{abc}; V_{23}^{abc}; V_{26}^{abc}; V_{29}^{abc}; V_{32}^{abc}$

Tabela 5.24: Resultado caso 4 – sistema 38 barras

O sistema é observável?	Não
Pseudo-medidas adicionadas para restaurar a observabilidade	$V_{28}^{abc}; V_{30}^{abc}; V_{31}^{abc}; V_{34}^{abc}; Fp_{28-29}^{abc};$
CCMs	(1) [$Q_1^a; Fq_{1-3}^a$] (2) [$Q_1^b; Fq_{1-3}^b$] (3) [$Q_1^c; Fq_{1-3}^c$] (4) [$Q_4^a; Fq_{4-6}^a$] (5) [$Q_4^b; Fq_{4-6}^b$] (6) [$Q_4^c; Fq_{4-6}^c$] (7) [$Q_{13}^a; Fq_{13-15}^a$] (8) [$Q_{13}^b; Fq_{13-15}^b$] (9) [$Q_{13}^c; Fq_{13-15}^c$] (10) [$Q_{19}^a; Fq_{19-21}^a$] (11) [$Q_{19}^b; Fq_{19-21}^b$] (12) [$Q_{19}^c; Fq_{19-21}^c$] (19) [$Q_{22}^a; Fq_{22-24}^a; Fq_{22-25}^a$] (20) [$Q_{22}^b; Fq_{22-24}^b; Fq_{22-25}^b$] (21) [$Q_{22}^c; Fq_{22-24}^c; Fq_{22-25}^c$]
MCs	$V_{38}^a; V_{26}^{abc}; V_{28}^{abc}; V_{29}^{abc}; V_{30}^{abc}; V_{31}^{abc}; P_{28}^{abc}; V_{32}^{abc}; V_{34}^{abc};$ $P_{25}^{abc}; P_{31}^{abc}; P_{34}^{abc}; P_{35}^{abc}; Q_{25}^{abc}; Q_{28}^{abc}; Q_{31}^{abc}; Q_{34}^{abc}; Q_{35}^{abc};$ $Fp_{25-27}^{abc}; Fp_{28-29}^{abc}; Fp_{31-33}^{abc}; Fq_{25-27}^{abc}; Fq_{28-29}^{abc};$ $Fq_{31-33}^{abc};$

5.4 Conclusões

Apreciando os resultados obtidos nos testes apresentados neste capítulo, comprovar-se a eficiência da metodologia proposta, tendo em vista a resposta coerente a que todos chegaram.

Vale ressaltar que para realização dos testes foram utilizados sistemas trifásicos já empregados em outros trabalhos da área em pauta. São sistemas com linhas desequilibradas e cargas desbalanceadas.

A partir dos estudos realizados para desenvolvimento da metodologia proposta nesta dissertação de mestrado, bem como dos testes realizados e apresentados neste capítulo, no próximo capítulo o conceito de observabilidade topológica, desenvolvida para modelagem monofásica, será estendida para modelagem trifásica do problema de estimação de estado. Vale lembrar que o conceito de observabilidade topológica explora o desacoplamento $P\theta - QV$ e baseia-se na relação entre medidas e o grafo da rede, propiciando um entendimento melhor do problema de observabilidade de redes no contexto de estimação de estado.

Capítulo 6

6 Análise de observabilidade topológica para sistemas trifásicos

Os métodos topológicos para análise de observabilidade (KRUMPHOLZ et al., 1980; QUINTANA et al., 1982a; MORI; TSUZUKI, 1991) fundamentam-se nos conceitos da teoria de grafos e requerem a criação de rotinas específicas, que não exigem cálculos, mas que são de natureza combinatória e complexa. Para definir as condições segundo as quais um sistema é topologicamente observável, faz-se necessário entender alguns conceitos e definições da teoria de grafos.

6.1 Conceitos e Definições da Teoria de Grafos

Um **grafo** $G(V, A)$ é definido pelo par V e A , onde:

- V – conjunto de **vértices** ou **nós** do grafo;
- A – conjunto de pares de nós não-ordenados: as **arestas** do grafo.

Se u e v são dois nós de um grafo e se o par $\{u, v\}$ é uma aresta denotada por y , diz-se que y conecta u e v , como pode ser visto na Figura 6.1. Neste caso, a aresta $\{u, v\}$ é dita ser incidente ao nó u e ao nó v .

Figura 6.1: Exemplo de um grafo

A **ordem** de um grafo G é dada pelo número de elementos do conjunto de nós, ou seja, pelo número de nós de G ; a ordem do grafo apresentado na Figura 6.1 é 4. O **grau** de um nó é dado pelo número de arestas que lhe são incidentes. A Tabela 6.1 informa o grau de cada nó do grafo apresentado na Figura 6.1.

Tabela 6.1 – Grau de cada um dos nós do grafo apresentado na Figura 6.1.

Nó	Grau
w	1
u	2
v	2
z	3

Um **caminho** é uma seqüência de nós, tal que de cada um dos nós exista uma aresta distinta, para o nó seguinte. Além disso, se nenhum dos nós no caminho se repete, o caminho é chamado de caminho simples ou **cadeia**. O comprimento do caminho é o número de arestas que o caminho usa. Dois caminhos são independentes se não tiverem nenhum nó em comum, exceto o primeiro e o último.

Se um caminho começa e acaba no mesmo nó, este caminho é chamado de **ciclo**. Um exemplo de ciclo é a seqüência de arestas $\{u, v\}$, $\{v, z\}$, $\{z, u\}$ da Figura 6.1, ou o caminho $\{u, v, z, u\}$ da mesma Figura 6.1.

Um par de nós em um grafo é um **par conexo**, se existir um caminho entre eles. Um grafo $G(V, A)$ é um **grafo conexo**, se todo par de nós em $G(V, A)$ for um par conexo.

Diz-se que H é um **subgrafo conexo máximo** de um grafo G , se o único subgrafo conexo contendo H é o próprio H . Um subgrafo conexo H máximo também é chamado de **componente**. Um grafo G é conexo, se o número de seus componentes for igual a um.

Um grafo chama-se **acíclico** se não contém ciclos. **Uma árvore** é um grafo conexo acíclico. Seja $G(V, A)$ um grafo de ordem $n > 2$; as propriedades seguintes são equivalentes, para caracterizar o grafo G como uma árvore:

- G é conexo e acíclico;
- G é acíclico e tem $n - 1$ arestas;
- G é conexo e tem $n - 1$ arestas;
- G é acíclico e por adição de uma aresta se cria um ciclo e somente um;
- G é conexo, mas deixa de sê-lo se uma aresta é eliminada (todas as arestas são pontes⁷).
- Todo par de nós de G é unido por uma e somente uma cadeia simples.

⁷ Uma aresta é dita ser uma ponte, se sua remoção provoca uma redução na conexidade do grafo.

Um grafo formado por um conjunto de árvores é chamado de **floresta**. Logo, cada componente de uma floresta é uma árvore. No caso de uma floresta com apenas uma árvore, tem-se uma floresta conexa. Assim, uma árvore é uma floresta conexa.

6.2 Observabilidade Topológica – Modelagem Monofásica da Rede

O conceito de observabilidade topológica desenvolvida para modelagem monofásica da rede explora o desacoplamento $P\theta - QV$, apresentado no capítulo 4, e baseia-se na relação entre medidas e o grafo da rede, cujas arestas e vértices representam os ramos e as barras do sistema, respectivamente. De acordo com essa relação, um SEP é "topologicamente" observável, com relação a um conjunto de medidas, unicamente se existir, associada a tal sistema, uma árvore geradora de posto completo do grafo da rede (nesse contexto árvore geradora é uma árvore abrangendo todas as barras da rede; uma árvore geradora é de posto completo, se for possível atribuir-se-lhe a cada ramo, pelo menos uma medida distinta). Uma árvore geradora de posto completo pode ser chamada simplesmente de árvore geradora observável (KRUMPHOLZ et al., 1980).

Formulou-se, então, a seguinte regra para associação de medidas para arestas do grafo da rede (KRUMPHOLZ et al., 1980; QUINTANA et al., 1982a):

1. Uma medida z (medida de fluxo ou injeção) pode ser atribuída a uma aresta a , do grafo da rede, se z for uma medida de fluxo, no ramo correspondente àquela aresta, ou uma medida de injeção, em uma das barras terminais daquele ramo.

No caso de medidas de fluxo, essa correspondência é direta. Uma medida de injeção em uma barra do sistema, por outro lado, pode ser associada a qualquer aresta incidente ao vértice que corresponde àquela barra. A escolha adequada desta associação de medidas de injeção é que reside a principal dificuldade para a determinação da observabilidade topológica.

Vale ressaltar que, para sistemas de medição em que as medidas de potência ativa e reativa são realizadas aos pares, se existir pelo menos uma medida de magnitude de tensão, o sistema considerado $P\theta$ observável também será QV observável. Face ao exposto, usualmente, para tais sistemas, a análise de observabilidade topológica é realizada considerando apenas o modelo $P\theta$, ou seja, considerando apenas as medidas de injeção e de fluxo de potência ativa.

6.3 Observabilidade Topológica – Modelagem Trifásica da Rede

De acordo com a definição de observabilidade topológica apresentada na seção anterior, um sistema trifásico será topologicamente observável, com relação a um conjunto de medidas trifásicas, unicamente se existir, associada a tal sistema, uma árvore geradora de posto completo do grafo da rede.

Para modelagem monofásica o grafo da rede corresponde ao diagrama unifilar do sistema, facilitando o processo de associação de medidas para as arestas desse grafo. Para modelagem trifásica o grafo da rede é mais complexo, dificultando esse processo de associação.

Para definir o grafo da rede para modelagem trifásica é necessário analisar as equações de injeção e de fluxo de potência ativa trifásica apresentadas no capítulo 4. Observe que uma medida de fluxo de potência ativa em uma das fases do ramo entre uma barra i e j , por exemplo Fp_{i-j}^a (Medida de fluxo na fase a da barra i para a barra j), relaciona os ângulos de fase de tensão (variáveis de estado do modelo $P\theta$) de todas as fases da barra j . Por outro lado, uma medida de injeção de potência em uma das fases de uma barra qualquer K , por exemplo, P_K^a , relaciona os ângulos de fase de tensão de todas as fases de todas as barras incidentes à barra K .

Face ao exposto, o grafo da rede, para modelagem trifásica do problema de estimação de estado, deve representar todas essas possibilidades de conexão, tornando-se um grafo bastante complexo.

Como exemplo, vamos considerar o sistema trifásico de duas barras apresentado na Figura 6.2. O grafo dessa rede trifásica, considerando apenas o modelo $P\theta$, é ilustrado na Figura 6.3.

Figura 6.2: Sistema trifásico de duas barras.

Figura 6.3: Grafo da rede trifásica apresentada na Figura 6.2.

Observe que a medida de fluxo de potência ativa na fase **a**, da barra **i** para barra **j**, pode ser atribuída aos seguintes ramos do grafo da rede: $\theta_i^a \rightarrow \theta_j^a$; $\theta_i^a \rightarrow \theta_j^b$ e $\theta_i^a \rightarrow \theta_j^c$.

Para exemplificar como se daria o processo de busca por uma árvore geradora de posto completo, para o grafo de uma rede trifásica, vamos analisar a observabilidade topológica $P\theta$ do sistema de potência trifásico apresentado na Figura 6.2. Observe que as medidas de potência ativa, apresentadas naquela figura, garantem a observabilidade $P\theta$ do sistema.

O processo de busca por uma árvore geradora de posto completo se desenvolve pelo grafo da rede, associando uma medida distinta a cada ramo desse grafo, de acordo com a regra para associação de medidas, para arestas do grafo da rede, supracitada.

Aplicando esse processo de busca, para o sistema da Figura 6.2, a medida de fluxo na fase **a**, da linha de transmissão conectando as barras **i** e **j**, pode ser atribuída para o ramo do grafo da rede conectando os nós θ_i^a e θ_j^a . Da mesma forma, a medida de fluxo na fase **b** da linha de transmissão conectando as barras **i** e **j** pode ser atribuída para o ramo do grafo da rede conectando os nós θ_i^b e θ_j^b . Continuando esse processo obtém-se a árvore geradora de posto completo ilustrada na Figura 6.4. Conclui-se então que o sistema apresentado na Figura 6.2 é topologicamente observável para o modelo $P\theta$.

Observe que para montar a árvore geradora de posto completo, ilustrada na Figura 6.4, adotou-se θ_i^a como referência. Foram necessárias assim apenas 5, das 6 medidas disponíveis naquele sistema, indicando certa redundância de medidas.

Figura 6.4: Árvore geradora de posto completo para o Sistema exemplo de 2 barras apresentado na Figura 6.2.

Como visto no capítulo 4 desta dissertação, representou-se o gerador trifásico através de duas barras, barra interna e barra terminal. Tendo em vista que nessa representação considera-se que a barra interna é equilibrada, para essa barra existem apenas duas variáveis de estado a serem estimadas (ângulo de fase e magnitude de tensão de uma de suas fases). Porém, para o gerador utilizado como barra de referência, existirá apenas uma variável de estado (magnitude de tensão de uma das fases da barra interna). Sendo assim, para analisar a observabilidade trifásica topológica $P\theta$, para cada barra interna de gerador vai existir apenas um nó no grafo da rede representando apenas uma variável de estado a ser estimada para essa barra para o modelo $P\theta$.

Para entender melhor o que foi supracitado acima, será feito um estudo de observabilidade topológica para alguns casos apresentados no Capítulo 5, para o sistema trifásico de 4 barras, Figura 5.1.

Caso1

A Figura 6.5 apresenta a árvore geradora de posto completo obtida para o primeiro teste (caso 1) com o sistema de 4 barras (Figura 5.1) apresentado no capítulo 5. Observe que a medida $P:3_b$ não foi utilizada, isto ocorre em virtude de a mesma dar a mesma informação que a $F:3-2_b$ (são medidas redundantes). Observa-se ainda que existe apenas um nó no grafo da rede associado à barra interna do gerador. O ramo do grafo em vermelho representa a conexão através da pseudo-medida permitindo a obtenção da árvore geradora de posto completo (restauração da observabilidade).

Figura 6.5: Árvore Geradora de Posto Completo para o Sistema de 4 barras apresentado no caso 2 do capítulo 5.

Caso 2

A Figura 6.6 apresenta a árvore geradora de posto completo obtida para o sistema apresentado no caso 2 do sistema de 4 barras da Figura 5.1. Observe a análise topológica está coerente com os resultados apresentado no Capítulo 5, em que todas as medidas, neste caso, foram consideradas críticas.

Figura 6.6: Árvore Geradora de Posto Completo para o Sistema de 4 barras apresentado no caso 2 do capítulo 5.

Caso 3

Para o caso 3, do sistema de 4 barras apresentado no capítulo 5, será feito a análise topológica de duas formas, com e sem a medida P:1_a, isto porque, o objetivo aqui é comparar os resultados com os apresentados no Capítulo anterior. De acordo com a Figura 6.7, que apresenta a árvore geradora de posto completo considerando a medida P:1_a, pode-se observar que a medida F:2-3_b não foi utilizada na análise, porém quando se perde a medida P:1_a, a medida F:2-3_b passa a ser utilizada, conforme a Figura 6.8, e todas as medidas se tornam críticas, sendo que P:2_a passa a dar a informação da variável de estado equivalente θ_1^a , a medida F:3_a dá informação da variável de estado equivalente θ_2^a e a medida F:2-3_b dá a informação da variável de estado equivalente θ_3^a .

Figura 6.7: Árvore Geradora de Posto Completo para o Sistema de 4 barras apresentado no caso 3 do capítulo 5, considerando a medida $P:1_a$.

Figura 6.8: Árvore Geradora de Posto Completo, para o Sistema de 4 barras apresentado no caso do capítulo 5, desconsiderando a medida $p:1_a$.

6.4 Conclusões

Neste capítulo o conceito de observabilidade topológica, desenvolvida para modelagem monofásica do problema de estimação de estado, foi estendida para modelagem trifásica.

Conforme apresentado neste capítulo, para o caso trifásico a busca por uma árvore geradora de posto completo torna-se um procedimento ainda mais complexo. Isto em razão principalmente da complexidade do grafo da rede associado à modelagem trifásica. Para o caso monofásico a associação de medidas de fluxo é direta, mas para o caso trifásico não. Isto explica a possibilidade de as medidas de fluxo serem classificadas como descartáveis na análise de observabilidade trifásica, como mencionado no capítulo 4.

Embora seja de difícil implantação computacional, a análise de observabilidade topológica trifásica proposta neste capítulo possibilita um entendimento melhor do problema, pois, pensando em termos de árvore geradora de posto completo, torna-se

possível “enxergar” o problema de observabilidade trifásica de forma mais direta, caminhando na topologia da rede, através da associação de ramos e medidas.

Vislumbra-se, ainda, a possibilidade de utilizar o grafo da rede trifásica, aqui proposto, para determinação de uma matriz incidência de medidas para ramos que possibilite análise e restauração da observabilidade trifásica através de um processo de fatoração triangular.

Capítulo 7

7 Conclusões, Artigos Publicados e Perspectivas Futuras

Este capítulo resume o trabalho apresentado e destaca as principais contribuições do mesmo. Além disso, destaca alguns artigos publicados durante o desenvolvimento deste trabalho, expondo ainda perspectivas futuras para dar continuidade aos estudos realizados.

7.1 Conclusões

Demonstrou-se, no decorrer desta dissertação, a necessidade da representação trifásica dos componentes da rede para obtenção de estimativas mais precisas, quando se trata de sistemas desequilibrados e/ou com cargas desbalanceadas. Demonstrou-se, também, que para se obter uma estimação de estado confiável, os SEPs devem ser projetados para serem observáveis e possuírem um nível de redundância que garanta a ausência de medidas críticas e de conjuntos críticos de medidas.

Face ao exposto, justifica-se o interesse desta dissertação em desenvolver uma metodologia que trate das características qualitativas de conjuntos de medidas para efeito de ESEEP, considerando a representação trifásica dos componentes da rede elétrica.

A metodologia proposta nesta dissertação se baseou na metodologia desenvolvida em (LONDON JR. et al., 2007), que possibilita análise e restauração de observabilidade, bem como identificação de MCs e de CCMs, no contexto de estimação de estado monofásica. Isto porque, verificam-se algumas vantagens da mesma em relação às metodologias já desenvolvidas para identificação de MCs e de CCMs. A saber:

- Em relação às metodologias topológicas, possibilita a identificação de CCMs de uma forma bastante direta, sem exigir busca baseadas na teoria de grafos;

- Em relação às metodologias numéricas já desenvolvidas, a quantidade de cálculo necessário é bem menor, pois, não exige a obtenção da matriz de sensibilidade, nem mesmo de uma estimação de estado inicial. O método requer apenas a fatoração da matriz Jacobiana e, em seguida, a análise dos elementos não nulos que aparecem na matriz fatorada, que recebe o nome de matriz H_{Δ} (LONDON Jr. et al., 2007).

A metodologia desenvolvida nesta dissertação trabalha a partir da fatoração triangular da matriz Jacobina do estimador WLS trifásico proposto em (ZHONG e ABUR, 2002).

Analizando os resultados obtidos nos testes apresentados nesta dissertação, comprovou-se a eficiência da metodologia proposta, tendo em vista as respostas coerentes dos diversos testes realizados com sistemas trifásicos já empregados em outros trabalhos da área, contendo 4, 7 e 38 barras.

Também foi estendido o conceito de observabilidade topológica, desenvolvida para modelagem monofásica, para modelagem trifásica do problema de estimação de estado. Vale lembrar que o conceito de observabilidade topológica explora o desacoplamento $P\theta - QV$ e baseia-se na relação entre medidas e o grafo da rede, propiciando um entendimento melhor do problema de observabilidade de redes no contexto de estimação de estado. Conforme apresentado no capítulo 6, para o caso trifásico a busca por uma árvore geradora de posto completo torna-se um procedimento ainda mais complexo. Isto em razão principalmente da complexidade do grafo da rede associado à modelagem trifásica.

7.2 Trabalhos Publicados

7.2.1 Relacionados à pesquisa

- [1] D Toyoshima ; M R C Castillo ; FANTIN, C. A. ; London, J.B.A. . Análise e restauração de observabilidade no contexto de estimação de estado trifásica. In: *The 9th latin american congress on eletricity generation and transmission - CLAGTEE 2011, 2011, Mar del Plata. Anais do The 9th latin american congress on eletricity generation and transmission, 2011.*
- [2] D Toyoshima ; M R C Castillo ; FANTIN, C. A. ; London, J.B.A. Observability Analysis and Identification of Critical Measurements on Three- Phase State Estimation (Artigo Aceito). In: *2012 Power e Energy Society transmission and distribution conference and exposition, 2012, Orlando, Florida.*
- [3] FANTIN, C. A. ; D Toyoshima ; M R C Castillo; London, J.B.A. Análise de Observabilidade e Identificação de Medidas Críticas no Contexto de Estimação de Estado Trifásica. In: Resumo aceito para publicação no *XII SEPOPE - Symposium of Specialists in Electrical Operation and Expasion Planning, 2012, 20-23 maio* (Resumo Aprovado).
- [4] D Toyoshima ; M R C Castillo ; FANTIN, C. A. ; London, J.B.A. Observability and Measurement Redundancy Analysis on Three-Phase State Estimation. Aceito para publicação no *IEEE Power e Energy Society General Meeting San Diego, 2012, 22-27 julho.*

7.2.2 Em outros tópicos de pesquisa

- [1] FANTIN, C. A. ; Sanches, D.S. ; London, J.B.A. ; Delbem, A.C.B. ; Santos, A.C. Reconfiguração de Redes Para Melhoria do Perfil de Tensão e Redução de Perdas em Sistemas de Distribuição de Grande Porte. In: *IX Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, 2011, Cuiabá. Eficiência Energética, 2011.*

- [2] FANTIN, C. A. ; Sanches, D.S. ; MARQUEZ, R. A. C. ; Santos, A.C ; Delbem, A.C.B. ; London, J.B.A. . Metodologia para redução de perdas de energia elétrica e melhoria do perfil de tensão em sistemas de distribuição de energia. In: *The 9th latin american congress on eletricity generation and transmission - CLAGTEE 2011, 2011, Mar del Plata. Anais do The 9th latin american congress on eletricity generation and transmission, 2011..*

7.3 Perspectivas Futuras

Conforme foi abordado no decorrer do texto, este trabalho propõe uma metodologia que possibilita análise e restauração de observabilidade, bem como identificação de MCs e de CCMs, no contexto de estimação de estado trifásica.

Vislumbra-se, como trabalho futuro, desenvolver um estimador de estado trifásico que leve em conta, além de medidas convencionais obtidas pelo sistema SCADA, medidas fasoriais sincronizadas (MFSs), isto em virtude dessas medidas, atualmente, serem alvo de inúmeras pesquisas.

Importa mencionar que a justificativa pelo interesse crescente pela inclusão de MFSs no processo de EESEP, não é apenas pelo fato de as MFSs apresentarem em geral um nível maior de precisão que as medidas adquiridas pelo sistema SCADA, mas também pelo fato de que variáveis cuja medição, antes inviável, passarem a ser monitoradas através das MFSs obtidas pelas Unidades de Medição Fasorial (PMU do inglês, Phasor Measurement Units), como é o caso dos ângulos de fase das tensões nodais e dos fasores de corrente nos ramos da rede elétrica.

Ainda, como trabalho futuro, vislumbra-se a possibilidade de utilizar o grafo da rede trifásica, proposto no capítulo 6 desta dissertação, para determinação de uma matriz incidência de medidas para ramos, que possibilite análise e restauração da observabilidade trifásica através de um processo de fatoração triangular bem mais simples.

Capítulo 8

8 Referências Bibliográficas

ABUR, A.; CELIK, M.K.; (1991) , "A fast algorithm for the weighted least absolute value state estimation," *Power Engineering Review, IEEE* , vol.11, no.2, pp.41, Feb 1991 doi: 10.1109/MPER.1991.88711

ABUR, A. e EXPÓSITO, A.G. (2004). Power system state estimation: theory and implementation. Marcel e Dekker Publishers, Nova York, EUA.

ALMEIDA, M. C. (2007), “Estimação de estado generalizada trifásica”. Tese de doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, UNICAMP.

ALMEIDA, M.C.; ASADA, E.N.; GARCIA, A.V.:(2006a) , "A Numerical Method for Finding Spanning Trees in Power System State Estimation," *Power System Technology, 2006. PowerCon 2006. International Conference on* , vol., no., pp.1-6, 22-26 Oct. 2006 doi: 10.1109/ICPST.2006.321731

ALMEIDA, M.C.; ASADA, E.N.; GARCIA, A.V.:(2006b) , "Effects of load imbalance and system asymmetry on three-phase state estimation," *Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE* , vol., no., pp.6 pp., 0-0 0 doi: 10.1109/PES.2006.1709586

ALMEIDA, M.C.; ASADA, E.N.; GARCIA, A.V.; (2008), "Power System Observability Analysis Based on Gram Matrix and Minimum Norm Solution". *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 23, p. 1611-1618

ALMEIDA, M.C.; ASADA, E.N.; GARCIA, A.V.; (2009), "Identifying Critical Sets in State Estimation Using Gram Matrix". *Proceedings of the IEEE Powertech 2009*, Bucharest – Romania.

ARRILLAGA, J; ARNOLD, C. P.; HARKER B. J.; (1978), "Computer modeling of electrical power systems". John Wiley e Sons.

BARAN, M.E.; KELLEY, A.W.; , "State estimation for real-time monitoring of distribution systems ," *Power Systems, IEEE Transactions on* , vol.9, no.3, pp.1601-1609, Aug, 1994 doi:10.1109/59.336098.

BARAN, M.; MCDERMOTT, T.E.; , "State estimation for real time monitoring of distribution feeders," *Power e Energy Society General Meeting, 2009. PES '09. IEEE* , vol., no., pp.1-4, 26-30 July 2009 doi: 10.1109/PES.2009.5275616.

BARAN, M.E.; ZHU, J.; ZHU, H. ; GARREN, K.E. (1995). A meter placement method for state estimation. *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol.10, N° 3, p.1704-1710, agosto.

BENEDITO, R.A.S.; MOREIRA, E.M.; LONDON, J.B.A.; BRETAS, N.G.; (2008), "Observability analysis based on path graph concepts and triangular factorization of the Jacobian matrix," *Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2008 IEEE/PES* , vol., no., pp.1-7, 13-15 Aug. 2008 doi: 10.1109/TDC-LA.2008.4641699

BENEDITO, R.A.S.; BRETAS, N.G.; LONDON Jr., J.B.A.; ALBERTO, L.F.C.:(2009), "Geometrical approaches for gross errors analysis in power systems state estimation," *PowerTech, 2009 IEEE Bucharest* , vol., no., pp.1-7, June 28 2009-July 2 2009 doi: 10.1109/PTC.2009.5281845

BRETAS, N.G. (1996). Network Observability: A theory based on triangular factorization and path graph concepts - part I. *International conference on Automatic Control*, cidade do Porto, Portugal, Setembro.

BRETAS, N.G.; LONDON Jr., J.B.A.; ALBERTO, L.F.C.; BRETAS, A.S. (2005). "A Topological Approach to the Identification of Critical Measurements in Power-System State Estimation". *IEEE Transactions on Circuits and Systems*. Vol. 52, N°1, p. 139 – 147, janeiro.

CASTILLO, E.; CONEJO, A.J.; PRUNEDA, R.E.; Solares, C.;(2006) , "Observability analysis in state estimation: a unified numerical approach," *Power Systems, IEEE Transactions on* , vol.21, no.2, pp. 877- 886, May 2006
doi: 10.1109/TPWRS.2006.873418

CLEMENTS, K.A.; WOLLENBER, B.F. (1975), "An algorithm for observability determination in power system state estimation." *IEEE PES Summer Meeting*, Paper A 75 447-3

COSER, J.; COSTA, A.S.; ROLIM, J.G.; (2006) , "Metering Scheme Optimization With Emphasis on Ensuring Bad-Data Processing Capability," *Power Systems, IEEE Transactions on* , vol.21, no.4, pp.1903-1911, Nov. 2006.
doi:10.1109/TPWRS.2006.881137

COUTTO FILHO, M.B.D.; SOUZA, J.C.S.; OLIVEIRA, F.M.F.; SCHILLING, M.Th. (2001). Identifying critical measurements and sets for power system state estimation. *Proceedings do IEEE Porto PowerTech* , paper EDT2-147, p. 1-6, Porto, Portugal, setembro.

COUTTO FILHO, M.B.D.; SOUZA, J.C.S. (2009), Forecasting-Aided State Estimation – Part I: Panorama. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 24, No. 4, p. 1667-1677, 2009.

FALCÃO, D.M.; ARIAS, M. (1994). State Estimation and Observability Analysis Based on Echelon Forms of the Linearized Measurement Models”, IEEE Trans. On Power Systems IE , Vol. 9(2), pp. 979-987, maio.

HANDSCHIN, E.; SCHWEPPE, F.C.; KOHLAS, J.; FIECHTER, A. (1975). Bad data analysis for power systems state estimation. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-94, N°2, p. 329-337, março/abril.

HANSEN, C.W.; DEBS, A.S.:(1995) , "Power system state estimation using three-phase models," *Power Systems, IEEE Transactions on* , vol.10, no.2, pp.818-824, May 1995 doi: 10.1109/59.387922

KORRES, G.N.; CONTAXIS, G.C. (1991a). A reduced model for bad data processing in state estimation. *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol. 6, N° 2, p.550-557, maio.

KORRES, G.N.; CONTAXIS, G.C. (1991b). Identification and updating of minimally dependent sets of measurements in state estimation. *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol. 6, N°3, p.999-1005, agosto.

KRUMPHOLZ, G.R.; CLEMENTS, K.A.; DAVIS, P.W. (1980). Power system observability: a practical algorithm using network topology. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, N°4, p. 1534-1542, Julho – Agosto.

KE LI; , "State estimation for power distribution system and measurement impacts," *Power Systems, IEEE Transactions on* , vol.11, no.2, pp.911-916, May 1996 doi: 10.1109/59.496174

LONDON Jr., J.B.A.; ALBERTO, L.F.C e BRETAS, N.G. (2007). “Analysis of Measurement Set Qualitative Characteristics for State Estimation Purposes”. *IET Generation, Transmission e Distribution*, v. 1, p. 39-45.

LONDON, J. B. A.; PIERETI, S. A. R.; BENEDITO, R. A. S.; BRETAS, N. G.; (2009), Redundancy and observability analysis of conventional and PMU measurements. *IEEE Transactions on Power Systems*,[S.l.], v.24, n.3, p.1629{1630, Aug. 2009. 46, 47, 51

MELIOPOULOS, A.P.; COKKINIDES, G.J.; STEFOPOULOS, G.K.; (2005) , "Numerical experiments for three-phase state estimation performance and evaluation," *Power Tech, 2005 IEEE Russia* , vol., no., pp.1-7, 27-30 June 2005 doi: 10.1109/PTC.2005.4524705

MELIOPOULOS, A.P.; FAN ZHANG; (1996) , "Multiphase power flow and state estimation for power distribution systems," *Power Systems, IEEE Transactions on* , vol.11, no.2, pp.939-946, May 1996 doi: 10.1109/59.496178.

MELIOPOULOS, S.; COKKINIDES, G.; HUANG, R.; FARANTATOS, E.; SUNGYUN CHOI; YONGHEE LEE; XUEBEI YU; , "Smart Grid Infrastructure for Distribution Systems and Applications," *System Sciences (HICSS), 2011 44th Hawaii International Conference on* , vol., no., pp.1-11, 4-7 Jan. 2011 doi: 10.1109/HICSS.2011.377.

MILI, L.; VAN CUTSEM, Th.; RIBBENS-PAVELLA, M. (1984). Hypothesis testing identification: A new method for bad data analysis in power system state estimation. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-103,Nº11, p. 3239-3252, novembro.

MILI, L.; PHANIRAJ, V.; ROUSSEUW, P.J.:(1991) , "Least median of squares estimation in power systems," *Power Systems, IEEE Transactions on* , vol.6, no.2, pp.511-523, May 1991 doi: 10.1109/59.76693

MONTICELLI, A.; WU, F.F. (1985a). Network observability: Identification of observable islands and measurement placement. *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-104, Nº5,p. 1035-1041, maio.

MONTICELLI, A.; WU, F.F. (1985b). Network observability: Theory. *IEEE Transaction on Power Apparatus and System*, Vol. PAS-104, Nº5, p. 1042-1048, maio.

MONTICELLI, A.; WU, F.F. (1986). Observability analysis for orthogonal transformation based state estimation". *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.1, No 1, p. 201-208, fevereiro.

MONTICELLI, A. (1999). State Estimation in Electric Power Systems: A Generalized Approach. Kluwer Academic Publishers, Massachusetts, USA.

MONTICELLI, A. J. (1983). "Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica", São Paulo - Brasil: Edgard Blucher.

MORI, H.; TSUZUKI, S. A fast method for topological observability analysis using a minimum spanning tree technique. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, [S.l.], p.491{499, 1991. 27

PHADKE, A. G. State Estimation with phasor measurements. *IEEE Transactions on Power System*, [S.l.], v.1, n.1, p.233{240, 1986. 2, 16, 21, 22

PIERETI, S.A.R.; DELBEM, A.C.B.; LONDON, J.B.A.; BRETAS, N.G.; (2007) , "Tracking Network Topology Processor Using Node-depth Representation," *Power Tech, 2007 IEEE Lausanne* , vol., no., pp.143-148, 1-5 July 2007 doi: 10.1109/PCT.2007.4538307

QUINTANA, V.H.; SIMÕES-COSTA, A.; MANDEL, A. (1982a). Power system topological observability using a direct graph-theoretic approach. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-101, N°3, p. 617-626, março.

SCHWEPPE, F. C.; WILDES, J. and ROM, D. (1968). Power system static state estimation, *Power Syst. Eng. Group, M.I.T.* Rep. 10, novembro.

SCHWEPPE, F.C (1970). Power system static-state estimation, part III: Implementation. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-89,N° 1, p. 130-135, janeiro.

SCHWEPPE, F.C.; WILDES, J. (1970). Power system static-state estimation, part I: Exact model. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-89,Nº1, p. 120-125, janeiro.

SIMÕES-COSTA, A.; PIAZZA, T.S.; MANDEL, A. (1990). Qualitative methods to solve qualitative problems in power system state estimation. *IEEE Transactions on power Systems*, Vol. 5, Nº3, p. 941-949, agosto.

SIMÕES-COSTA, A.; SALGADO, R. (2002). Análise Estática de Segurança de Sistemas Elétricos de Potência. Notas de aula UFSC, setembro.

SOUZA, J.C.S.; COUTTO FILHO, M.B.D.; SCHILLING, M.Th. (2005). Optimal Metering Systems for Monitoring Power Networks Under Multiple Topological Scenarios. *IEEE Transaction on Power Systems* Vol.20, Nº4, p.1700-1708, novembro.

STEFPOPOULOS, G.K.; ALAILEH, R.H.; COKKINIDES, G.J.; MELIOPOULOS, A.P.S.; (2007), "On Three-Phase State Estimation in the Presence of GPS-Synchronized Phasor Measurements," *Power Symposium, 2007. NAPS '07. 39th North American* , vol., no., pp.406-412, Sept. 30 2007-Oct. 2 2007 doi: 10.1109/NAPS.2007.4402342

THORP, J. S.; PHADKE, A. G.; KARIMI, K. J. Real time voltage-phasor measurement for static state estimation. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, [S.l.], v.PAS-104, n.11, p.3098-3106, 1985. 2, 16, 21, 22

TINNEY, W.F.; BRANDWAJN, V. ; CHAN, S.M. (1985). Sparse vector methods. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-104, Nº2, p. 295-301, fevereiro.

WU. F.F.; MOSLEHI. K; BOSE. A. (2005). Power System Control Centers: Past, Present, and Future. *PROCEEDINGS OF THE IEEE*, VOL. 93, NO. 11, NOVEMBER 2005.

VIGLIASSI, M.P.; LONDON, J.B.A.; DELBEM, A.; BRETAS, N.G.; (2009), "Metering system planning for state estimation via evolutionary algorithm and HA

matrix," *PowerTech, 2009 IEEE Bucharest* , vol., no., pp.1-6, June 28 2009-July 2 2009. doi: 10.1109/PTC.2009.5281902.

ZHONG ,S. ; ABUR, A.; (2002), "Effects of nontransposed lines and unbalanced loads on state estimation," *Power Engineering Society Winter Meeting, 2002. IEEE* , vol.2, no., pp. 975- 979 vol.2, 2002 doi: 10.1109/PESW.2002.985151.

ZHOU, M.; CENTENO, V. A.; THORP, J. S.; PHADKE, A. G. An alternative for including phasor measurements in state estimators. *IEEE Transactions on Power Systems*, [S.l.], v.21, n.4, p.1930{1937, 2006. 21, 22.

APÊNDICE A

Neste apêndice encontram-se os parâmetros referentes aos sistemas de 4, 7 e 38 barras utilizados no capítulo 5 desta dissertação. A Tabela A.1, apresenta os dados do sistema de 4 barras balanceado e desbalanceado, dados do gerador e transformador utilizados.

Tabela A.1: Dados do sistema de 4 barras.

<i>Parâmetros Simétricos Linha 2-3</i>	Resistência série das linhas (parâmetros em pu)								
	Raa	Rbb	Rcc	Rba	Rca	Rcb	Rab	Rac	Rbc
	0.006	0.006	0.006	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
	Reatância série das linhas (parâmetros em pu)								
	Xaa	Xbb	Xcc	Xba	Xca	Xcb	Xab	Xac	Xbc
	0.050	0.050	0.050	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017
	Shunt das linhas (parâmetros em pu)								
	Yaa	Ybb	Ycc	Yba	Yca	Ycb	Yab	Yac	Ybc
	0.0350	0.0350	0.0350	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006
<i>Parâmetros Assimétricos Linha 2-3</i>	Resistência série das linhas (parâmetros em pu)								
	Raa	Rbb	Rcc	Rba	Rca	Rcb	Rab	Rac	Rbc
	0.006	0.006	0.007	0.002	0.001	0.002	0.002	0.001	0.002
	Reatância série das linhas (parâmetros em pu)								
	Xaa	Xbb	Xcc	Xba	Xbc	Xcb	Xab	Xac	Xbc
	0.045	0.050	0.047	0.015	0.017	0.017	0.015	0.017	0.017
	Shunt das linhas (parâmetros em pu)								
	Yaa	Ybb	Ycc	Yba	Yca	Ycb	Yab	Yac	Ybc
	0.0350	0.0352	0.0340	-0.006	-0.004	-0.006	-0.006	-0.004	-0.006
<i>Dados das cargas balanceadas</i>	Barra 1 (parâmetros em pu)								
	Pa	Qa	Pb	Qb	Pc	Qc			
	0.0000	0.0000	0.000	0.0000	0.0000	0.0000			
	Barra 2 (parâmetros em pu)								
	Pa	Qa	Pb	Qb	Pc	Qc			
	-1.4631	-0.6030	-1.4631	-0.6030	-1.4631	-0.6030			
	Barra 3 (parâmetros em pu)								
	Pa	Qa	Pb	Qb	Pc	Qc			
	-1.4331	-0.4560	-1.4331	-0.4560	-1.4331	-0.4560			
<i>Dados das cargas desbalanceadas</i>	Barra 1 (parâmetros em pu)								
	Pa	Qa	Pb	Qb	Pc	Qc			
	0.0000	0.0000	0.000	0.0000	0.0000	0.0000			
	Barra 2 (parâmetros em pu)								
	Pa	Qa	Pb	Qb	Pc	Qc			

	-1.4400	-0.6000	-1.4100	-0.3600	-1.5390	-0.8490
	Barra 3 (parâmetros em pu)					
	Pa	Qa	Pb	Qb	Pc	Qc
	-1.5000	-0.4500	-1.4500	-0.4200	-1.4490	-04980
Parâmetros do Transformador	Transformador (parâmetros em pu)					
	Tipo	Yt		Tap 1	Tap 2	
	$\Delta : Yg$	0.002+j0.038		1.000	1.022	
Parâmetros do Gerador	Gerador (parâmetros em pu)					
	Y0	Y1	Y2	P	Vreg	
	J0.0150	J0.010	J0.091	0.000	1.050	

A Tabela A.2 apresenta os dados do sistema de 7 barras, Figura 5.2 desta dissertação.

Tabela A.2: Parâmetros da rede do sistema de 7 barras.

Parâmetros da rede	Linha	Resistência série das linhas (parâmetros em pu)								
		Raa	Rbb	Rcc	Rba	Rca	Rcb	Rab	Rac	Rbc
	1-2	0.0023	0.0021	0.0024	0.0012	0.0011	0.0010	0.0012	0.0011	0.0010
	1-3	0.0030	0.0042	0.0042	0.0025	0.0020	0.0040	0.0040	0.0020	0.0040
	2-3	0.0030	0.0031	0.0033	0.0021	0.0020	0.0020	0.0021	0.0020	0.0020
	3-4	0.0025	0.0022	0.0026	0.0013	0.0012	0.0010	0.0013	0.0012	0.0010
	4-5	0.0050	0.0053	0.0054	0.0022	0.0017	0.0022	0.0022	0.0017	0.0022
		Reatância série das linhas (parâmetros em pu)								
		Xaa	Xbb	Xcc	Xba	Xca	Xcb	Xab	Xac	Xbc
	1-2	0.0147	0.0150	0.0148	0.0080	0.0070	0.0080	0.080	0.0070	0.0080
	1-3	0.0250	0.0280	0.0280	0.0220	0.0250	0.0280	0.0250	0.0250	0.0280
	2-3	0.0255	0.0253	0.0250	0.0120	0.0100	0.0120	0.0120	0.0100	0.0120
	3-4	0.0137	0.0150	0.0146	0.0090	0.0070	0.0090	0.0090	0.0070	0.0090
	4-5	0.0350	0.0400	0.0370	0.0130	0.0150	0.0150	0.0130	0.0150	0.0150
		Shunt das linhas (parâmetros em pu)								
		Yaa	Ybb	Ycc	Yba	Yca	Ycb	Yab	Yac	Ybc
	1-2	0.0450	0.0400	0.0350	-0.008	-0.009	-0.011	-0.008	-0.009	-0.011
	1-3	0.0400	0.0350	0.0280	-0.045	-0.040	-0.032	-0.030	-0.035	-0.032
	2-3	0.0430	0.0380	0.0250	-0.032	-0.028	-0.032	-0.040	-0.032	-0.028
	3-4	0.0350	0.0352	0.0340	-0.013	-0.014	-0.013	-0.013	-0.014	-0.013
	4-5	0.0345	0.0352	0.0343	-0.016	-0.014	-0.016	-0.016	-0.014	-0.016
cargas balanceadas	Barras	Barra 1 (parâmetros em pu)								
		Pa	Qa	Pb	Qb	Pc	Qc			
	1	-1.38	-0.39	-1.38	-0.39	-1.38	-0.39			
	2	-1.14	-0.45	-1.14	-0.45	-1.14	-0.45			
	3	-0.84	-0.24	-0.84	-0.24	-0.84	-0.24			
	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
	5	-0.78	-0.30	-0.78	-0.30	-0.78	-0.30			
cargas desbalanceadas	Barras	Barra 1 (parâmetros em pu)								
		Pa	Qa	Pb	Qb	Pc	Qc			
	1	-1.35	-0.36	-1.35	-0.39	-1.26	-0.33			
	2	-1.20	-0.51	-1.08	-0.45	-1.14	-0.36			
	3	-0.90	-0.1	-0.84	-0.27	-0.78	-0.30			
	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
	5	-0.60	-0.30	-0.90	-0.30	-0.84	-0.30			
6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				

Parâmetros do Transformador	Transformador (parâmetros em pu)				
	Conexão	Tipo	Yt	Tap 1	Tap 2
	6-4	$\Delta : Y_g$	0.0018+j0.038	1.000	1.028

Gerador 7	Gerador (parâmetros em pu)				
	Y0	Y1	Y2	P	Vreg
	J0.0150	J0.010	J0.091	0.000	1.050

A Tabela A.3 apresenta os dados do sistema de 38 barras, Figura 5.3 desta dissertação.

Tabela A.3: Dados sistema 38 barras.

	Resistência série das linhas (parâmetros em pu)								
	Raa	Rbb	Rcc	Rba	Rca	Rcb	Rab	Rac	Rbc
Linha 38-1	0.00015	0.00015	0.00015	0.00007	0.00007	0.00007	0.00007	0.00007	0.00007
Linha 1-2	0.0001934	0.0001934	0.0001934	0.00003	0.00003	0.00003	0.00003	0.00003	0.00003
Linha 1-3	0.0001934	0.0001934	0.0001934	0.0000308	0.0000308	0.0000308	0.0000308	0.0000308	0.0000308
Linha 1-4	0.0001583	0.0001583	0.0001583	0.0000792	0.0000792	0.0000792	0.0000792	0.0000792	0.0000792
Linha 4-5	0.0003869	0.0003869	0.0003869	0.0000616	0.0000616	0.0000616	0.0000616	0.0000616	0.0000616
Linha 4-6	0.0003869	0.0003869	0.0003869	0.0000616	0.0000616	0.0000616	0.0000616	0.0000616	0.0000616
Linha 4-7	0.0001583	0.0001583	0.0001583	0.0000792	0.0000792	0.0000792	0.0000792	0.0000792	0.0000792
Linha 7-8	0.0005803	0.0005803	0.0005803	0.0000924	0.0000924	0.0000924	0.0000924	0.0000924	0.0000924
Linha 7-9	0.0005803	0.0005803	0.0005803	0.0000924	0.0000924	0.0000924	0.0000924	0.0000924	0.0000924
Linha 7-10	0.0001583	0.0001583	0.0001583	0.0000792	0.0000792	0.0000792	0.0000792	0.0000792	0.0000792
Linha 10-11	0.0007737	0.0007737	0.0007737	0.0001233	0.0001233	0.0001233	0.0001233	0.0001233	0.0001233
Linha10-12	0.0007737	0.0007737	0.0007737	0.0001233	0.0001233	0.0001233	0.0001233	0.0001233	0.0001233
Linha10-13	0.0001583	0.0001583	0.0001583	0.0000792	0.0000792	0.0000792	0.0000792	0.0000792	0.0000792
Linha 13-14	0.0009672	0.0009672	0.0009672	0.0001541	0.0001541	0.0001541	0.0001541	0.0001541	0.0001541
Linha 13-15	0.0009672	0.0009672	0.0009672	0.0001541	0.0001541	0.0001541	0.0001541	0.0001541	0.0001541
Linha 13-16	0.0001583	0.0001583	0.0001583	0.0000792	0.0000792	0.0000792	0.0000792	0.0000792	0.0000792
Linha 16-17	0.0011606	0.0011606	0.0011606	0.0001849	0.0001849	0.0001849	0.0001849	0.0001849	0.0001849
Linha 16-18	0.0011606	0.0011606	0.0011606	0.0001849	0.0001849	0.0001849	0.0001849	0.0001849	0.0001849
Linha 16-19	0.0001583	0.0001583	0.0001583	0.0000792	0.0000792	0.0000792	0.0000792	0.0000792	0.0000792
Linha 19-20	0.0013540	0.0013540	0.0013540	0.0002157	0.0002157	0.0002157	0.0002157	0.0002157	0.0002157
Linha 19-21	0.0013540	0.0013540	0.0013540	0.0002157	0.0002157	0.0002157	0.0002157	0.0002157	0.0002157
Linha 19-22	0.0001583	0.0001583	0.0001583	0.0000792	0.0000792	0.0000792	0.0000792	0.0000792	0.0000792
Linha 22-23	0.0015474	0.0015474	0.0015474	0.0002465	0.0002465	0.0002465	0.0002465	0.0002465	0.0002465
Linha 22-24	0.0015474	0.0015474	0.0015474	0.0002465	0.0002465	0.0002465	0.0002465	0.0002465	0.0002465
Linha 22-25	0.0001583	0.0001583	0.0001583	0.0000792	0.0000792	0.0000792	0.0000792	0.0000792	0.0000792
Linha 25-26	0.0017409	0.0017409	0.0017409	0.0002773	0.0002773	0.0002773	0.0002773	0.0002773	0.0002773
Linha 25-27	0.0017409	0.0017409	0.0017409	0.0002773	0.0002773	0.0002773	0.0002773	0.0002773	0.0002773
Linha 25-28	0.0001583	0.0001583	0.0001583	0.0000792	0.0000792	0.0000792	0.0000792	0.0000792	0.0000792
Linha 28-29	0.0019343	0.0019343	0.0019343	0.0003081	0.0003081	0.0003081	0.0003081	0.0003081	0.0003081
Linha 28-30	0.0019343	0.0019343	0.0019343	0.0003081	0.0003081	0.0003081	0.0003081	0.0003081	0.0003081
Linha28-31	0.0001583	0.0001583	0.0001583	0.0000792	0.0000792	0.0000792	0.0000792	0.0000792	0.0000792
Linha31-32	0.0021277	0.0021277	0.0021277	0.0003389	0.0003389	0.0003389	0.0003389	0.0003389	0.0003389
Linha31-33	0.0021277	0.0021277	0.0021277	0.0003389	0.0003389	0.0003389	0.0003389	0.0003389	0.0003389
Linha31-34	0.0001583	0.0001583	0.0001583	0.0000792	0.0000792	0.0000792	0.0000792	0.0000792	0.0000792
Linha34-35	0.0023212	0.0023212	0.0023212	0.0003697	0.0003697	0.0003697	0.0003697	0.0003697	0.0003697
Linha34-36	0.0023212	0.0023212	0.0023212	0.0003697	0.0003697	0.0003697	0.0003697	0.0003697	0.0003697
Linha34-37	0.0023212	0.0023212	0.0023212	0.0003697	0.0003697	0.0003697	0.0003697	0.0003697	0.0003697
	Reatância série das linhas (parâmetros em pu)								
	Xaa	Xbb	Xcc	Xba	Xca	Xcb	Xab	Xac	Xbc
Linha 38-1	0.0001508	0.0001508	0.0001508	0.0003029	0.0003029	0.0003029	0.0003029	0.0003029	0.000302
Linha 1-2	0.0001611	0.0001611	0.0001611	0.0000785	0.0000785	0.0000785	0.0000785	0.0000785	0.0000785
Linha 1-3	0.0001611	0.0001611	0.0001611	0.0000785	0.0000785	0.0000785	0.0000785	0.0000785	0.0000785
Linha 1-4	0.0003029	0.0003029	0.0003029	0.0001508	0.0001508	0.0001508	0.0001508	0.0001508	0.0001508
Linha 4-5	0.0003222	0.0003222	0.0003222	0.0001570	0.0001570	0.0001570	0.0001570	0.0001570	0.0001570
Linha 4-6	0.0003222	0.0003222	0.0003222	0.0001570	0.0001570	0.0001570	0.0001570	0.0001570	0.0001570
Linha 4-7	0.0003029	0.0003029	0.0003029	0.0001508	0.0001508	0.0001508	0.0001508	0.0001508	0.0001508
Linha 7-8	0.0004833	0.0004833	0.0004833	0.0002355	0.0002355	0.0002355	0.0002355	0.0002355	0.0002355
Linha 7-9	0.0004833	0.0004833	0.0004833	0.0002355	0.0002355	0.0002355	0.0002355	0.0002355	0.0002355
Linha 7-10	0.0003029	0.0003029	0.0003029	0.0001508	0.0001508	0.0001508	0.0001508	0.0001508	0.0001508
Linha 10-11	0.0006444	0.0006444	0.0006444	0.0003140	0.0003140	0.0003140	0.0003140	0.0003140	0.0003140

Linha10-12	0.0006444	0.0006444	0.0006444	0.0003140	0.0003140	0.0003140	0.0003140	0.0003140	0.0003140
Linha10-13	0.0003029	0.0003029	0.0003029	0.0001508	0.0001508	0.0001508	0.0001508	0.0001508	0.0001508
Linha 13-14	0.0008055	0.0008055	0.0008055	0.0003925	0.0003925	0.0003925	0.0003925	0.0003925	0.0003925
Linha 13-15	0.0008055	0.0008055	0.0008055	0.0003925	0.0003925	0.0003925	0.0003925	0.0003925	0.0003925
Linha 13-16	0.0003029	0.0003029	0.0003029	0.0001508	0.0001508	0.0001508	0.0001508	0.0001508	0.0001508
Linha 16-17	0.0008055	0.0008055	0.0008055	0.0003925	0.0003925	0.0003925	0.0003925	0.0003925	0.0003925
Linha 16-18	0.0003029	0.0003029	0.0003029	0.0001508	0.0001508	0.0001508	0.0001508	0.0001508	0.0001508
Linha 16-19	0.009666	0.009666	0.009666	0.0004709	0.0004709	0.0004709	0.0004709	0.0004709	0.0004709
Linha 19-20	0.009666	0.009666	0.009666	0.0004709	0.0004709	0.0004709	0.0004709	0.0004709	0.0004709
Linha 19-21	0.0003029	0.0003029	0.0003029	0.0001508	0.0001508	0.0001508	0.0001508	0.0001508	0.0001508
Linha 19-22	0.0011277	0.0011277	0.0011277	0.0005494	0.0005494	0.0005494	0.0005494	0.0005494	0.0005494
Linha 22-23	0.0011277	0.0011277	0.0011277	0.0005494	0.0005494	0.0005494	0.0005494	0.0005494	0.0005494
Linha 22-24	0.0003029	0.0003029	0.0003029	0.0001508	0.0001508	0.0001508	0.0001508	0.0001508	0.0001508
Linha 22-25	0.0012888	0.0012888	0.0012888	0.0006279	0.0006279	0.0006279	0.0006279	0.0006279	0.0006279
Linha 25-26	0.0003029	0.0003029	0.0003029	0.0001508	0.0001508	0.0001508	0.0001508	0.0001508	0.0001508
Linha 25-27	0.0014499	0.0014499	0.0014499	0.0007064	0.0007064	0.0007064	0.0007064	0.0007064	0.0007064
Linha 25-28	0.0014499	0.0014499	0.0014499	0.0007064	0.0007064	0.0007064	0.0007064	0.0007064	0.0007064
Linha 28-29	0.0003029	0.0003029	0.0003029	0.0001508	0.0001508	0.0001508	0.0001508	0.0001508	0.0001508
Linha 28-30	0.0016110	0.0016110	0.0016110	0.0007849	0.0007849	0.0007849	0.0007849	0.0007849	0.0007849
Linha28-31	0.0016110	0.0016110	0.0016110	0.0007849	0.0007849	0.0007849	0.0007849	0.0007849	0.0007849
Linha31-32	0.0003029	0.0003029	0.0003029	0.0001508	0.0001508	0.0001508	0.0001508	0.0001508	0.0001508
Linha31-33	0.0017721	0.0017721	0.0017721	0.0008634	0.0008634	0.0008634	0.0008634	0.0008634	0.0008634
Linha31-34	0.0017721	0.0017721	0.0017721	0.0008634	0.0008634	0.0008634	0.0008634	0.0008634	0.0008634
Linha34-35	0.0003029	0.0003029	0.0003029	0.0001508	0.0001508	0.0001508	0.0001508	0.0001508	0.0001508
Linha34-36	0.0019332	0.0019332	0.0019332	0.0009419	0.0009419	0.0009419	0.0009419	0.0009419	0.0009419
Linha34-37	0.0019332	0.0019332	0.0019332	0.0009419	0.0009419	0.0009419	0.0009419	0.0009419	0.0009419

Dados das cargas em p.u

	Pa	Pb	Pc	Qa	Qb	Qc
Barra 1	0.370	0.370	0.370	0.210	0.210	0.210
Barra 2	0.150	0.150	0.150	0.090	0.090	0.090
Barra 3	0.150	0.150	0.150	0.090	0.090	0.090
Barra 4	0.370	0.370	0.370	0.210	0.210	0.210
Barra 5	0.300	0.300	0.300	0.170	0.170	0.170
Barra 6	0.300	0.300	0.300	0.170	0.170	0.170
Barra 7	0.370	0.370	0.370	0.210	0.210	0.210
Barra 8	0.450	0.450	0.450	0.260	0.260	0.260
Barra 9	0.450	0.450	0.450	0.260	0.260	0.260
Barra 10	0.370	0.370	0.370	0.210	0.210	0.210
Barra 11	0.600	0.600	0.600	0.340	0.340	0.340
Barra 12	0.600	0.600	0.600	0.340	0.340	0.340
Barra 13	0.370	0.370	0.370	0.210	0.210	0.210
Barra 14	0.750	0.750	0.750	0.430	0.430	0.430
Barra 15	0.750	0.750	0.750	0.430	0.430	0.430
Barra 16	0.370	0.370	0.370	0.210	0.210	0.210
Barra 17	0.900	0.900	0.900	0.510	0.510	0.510
Barra 18	0.900	0.900	0.900	0.510	0.510	0.510
Barra 19	0.370	0.370	0.370	0.210	0.210	0.210
Barra 20	1.060	1.060	1.060	0.600	0.600	0.600
Barra 21	1.060	1.060	1.060	0.600	0.600	0.600
Barra 22	0.370	0.370	0.370	0.210	0.210	0.210
Barra 23	1.210	1.210	1.210	0.680	0.680	0.680
Barra 24	1.210	1.210	1.210	0.680	0.680	0.680
Barra 25	0.370	0.370	0.370	0.210	0.210	0.210
Barra 26	1.360	1.360	1.360	0.770	0.770	0.770
Barra 27	1.360	1.360	1.360	0.770	0.770	0.770
Barra 28	0.370	0.370	0.370	0.210	0.210	0.210
Barra 29	1.510	1.510	1.510	0.850	0.850	0.850
Barra 30	1.510	1.510	1.510	0.850	0.850	0.850
Barra 31	0.370	0.370	0.370	0.210	0.210	0.210
Barra 32	1.660	1.660	1.660	0.940	0.940	0.940
Barra 33	1.660	1.660	1.660	0.940	0.940	0.940

	Barra 34	0.370	0.370	0.370	0.210	0.210	0.210
	Barra 35	1.810	1.810	1.810	1.020	1.020	1.020
	Barra 36	1.810	1.810	1.810	1.020	1.020	1.020
Parâmetros do Gerador	Gerador (parâmetros em pu)						
	Y0	Y1	Y2	P	Vreg		
	J0.0150	J0.010	J0.091	0.000	1.050		