UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO–USP
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Camila Silva Vieira

**Processamento de Erros Grosseiros
através do Índice de Não-Detecção de
Erros e dos Resíduos Normalizados**

São Carlos
2018

Camila Silva Vieira

**Processamento de Erros Grosseiros
através do Índice de Não-Detecção de
Erros e dos Resíduos Normalizados**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Prof. Dr. João Bosco Augusto London Junior

São Carlos

2018

Trata-se da versão corrigida da dissertação. A versão original se encontra disponível na EESC/USP que aloja o Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica.

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

V657p Vieira, Camila Silva
 Processamento de Erros Grosseiros através do Índice
 de Não-Detecção de Erros e dos Resíduos Normalizados /
 Camila Silva Vieira; orientador João Bosco Augusto
 London Junior. São Carlos, 2017.

 Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
 em Engenharia Elétrica e Área de Concentração em
 Sistemas Elétricos de Potência -- Escola de Engenharia
 de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2017.

 1. Sistema Elétrico de Potência. 2. Estimação de
 Estado. 3. Estimador de Estado por Mínimos Quadrados
 Ponderados. 4. Processamento de Erros Grosseiros. 5.
 Interpretação Geométrica. 6. Índice de Não-Detecção de
 Erros. 7. Ponderação. 8. Erros das Estimativas. I.
 Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **CAMILA SILVA VIEIRA.**

Título da dissertação: "Processamento de erros grosseiros através do índice de não-detecção de erros e dos resíduos normalizados"

Data da defesa: 20/10/2017

Comissão Julgadora:

Resultado:

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

Aprovado

Prof. Dr. **Madson Cortes de Almeida**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

Aprovado

Prof. Dr. **José Luiz Rezende Pereira**
(Universidade Federal de Juiz de Fora/UFJF)

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica:
Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer a Deus por me dar sabedoria para produzir esse trabalho.

Em especial quero agradecer ao professor João Bosco Augusto London Junior, pela sua orientação nesse trabalho e contribuição para o meu desenvolvimento como pesquisadora e profissional.

Reconhecimentos a CNPq (Conselho Nacional de Tecnologia e Pesquisa) pelo financiamento da minha bolsa de mestrado 831551/1999-2.

Quero agradecer também a minha família, Javert Melo Vieira, Maura Auxiliadora da Silva e Mariana Silva Vieira Fachim pelo apoio emocional e financeiro durante o período do meu mestrado.

Eu sou grandemente grata pelo meu marido, Luan Filipe dos Santos Colombari, pelo seu carinho, paciência e contribuições na minha pesquisa.

Eu tenho enormes dívidas com minha amiga Camila dos Anjos Fantin pelo seu apoio profissional e pessoal mas principalmente por ter me ajudado a entrar nesse programa de mestrado e me emprestar sua casa no começo dos meus estudos. Por isso, eu agradeço também a Aline Nonato.

Eu sou também grata pela minha amiga e companheira de apartamento Marina Silva Camillo de Carvalho por toda ajuda e companheirismo. Além disso quero agradecer ao meu colega Mohamad Ismail pela paciência e ajuda durante nossos estudos compartilhados.

Finalmente eu quero agradecer aos meus colegas de laboratório, Leandro Tolomeu, Julio Massignan, Breno Bretas e Luana Locatelli por compartilhar suas idéias e ajuda no laboratório.

*“O fim das coisas é melhor que o seu início,
e o paciente é melhor que o orgulhoso.”*

Eclesiastes 7:8

Resumo

Vieira, Camila S. **Processamento de Erros Grosseiros através do Índice de Não-Detecção de Erros e dos Resíduos Normalizados**. 134 p. Dissertação de mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2018.

Esta dissertação trata do problema de processamento de Erros Grosseiros (EGs) com base na aplicação do chamado Índice de Não-Detecção de Erros, ou apenas *UI* (Undetectability Index), na análise dos resíduos do estimador de estado por mínimos quadrados ponderados. O índice *UI* foi desenvolvido recentemente e possibilita a classificação das medidas de acordo com as suas características de não refletirem grande parcela de seus erros nos resíduos daquele estimador. As medidas com maiores *UIs* são aquelas cujos erros são mais difíceis de serem detectados através de métodos que fazem uso da análise dos resíduos, pois grande parcela do erro dessas medidas não aparece no resíduo. Inicialmente demonstrou-se, nesta dissertação, que erros das estimativas das variáveis de estado em um sistema com EG não-detectável (em uma medida de alto índice *UI*) podem ser mais significativos que em medidas com EGs detectáveis (em medidas com índices *UIs* baixos). Justificando, dessa forma, a importância de estudos para tornar possível o processamento de EGs em medidas com alto índice *UI*. Realizou-se, então, nesta dissertação, diversas simulações computacionais buscando analisar a influência de diferentes ponderações de medidas no *UI* e também nos erros das estimativas das variáveis de estado. Encontrou-se, então, uma maneira que destacou-se como a mais adequada para ponderação das medidas. Por fim, ampliaram-se, nesta dissertação, as pesquisas referentes ao *UI* para um estimador de estado por mínimos quadrados ponderados híbrido.

Palavras-chave: Sistema Elétrico de Potência; Estimação de Estado; Estimador de Estado por Mínimos Quadrados Ponderados; Processamento de Erros Grosseiros; Interpretação Geométrica; Índice de Não-Detecção de Erros; Ponderação; Erros das Estimativas; Estimador de Estado WLS híbrido.

Abstract

Vieira, Camila S. **Bad Data Processing through the Undetectability Index and the Normalized Residuals.** 134 p. Master Thesis – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, 2018.

This dissertation deals with the problem of Gross Errors processing based on the use of the so-called Undetectability Index, or just UI . This index was developed recently and it is capable to classify the measurements according to their characteristics of not reflecting their errors into the residuals of the weighted least squares state estimation process. Gross errors in measurements with higher UI s are very difficult to be detected by methods based on the residual analysis, as the errors in those measurements are masked, i.e., they are not reflected in the residuals. Initially, this dissertation demonstrates that a non-detectable gross error (error in a measurement with high UI) may affect more the accuracy of the estimated state variables than a detectable gross error (error in a measurement with low UI). Therefore, justifying the importance of studies that make possible gross errors processing in measurements with high UI . In this dissertation, several computational simulations are carried out to analyze the influence of different weights of measurements in the UI index and also in the accuracy of the estimated state variables. It is chosen a way that stood out as the most appropriate for weighing the measurements. Finally, in this dissertation, the studies referring to the UI is extended for a hybrid weighted least squares state estimator.

Keywords: Power Systems State Estimation; Weighted Least Squares Estimator; Bad Data Processing; Geometric Interpretation; Undetectability Index; Weighting; Measurement Error Estimation; Hybrid WLS Estimator.

Lista de siglas

EE Estimação de Estado

EGs Erros Grosseiros

G Ganho

HTI Hypothesis Testing Identification

PMUs Phasor Measurements Units

SEP Sistema Elétrico de Potência

SCADA Supervisory Control and Data Acquisition System

WLS Weighted Least Squares

Sumário

1	Introdução	19
1.1	Introdução	19
1.2	Proposição	24
1.3	Estrutura do Trabalho	26
2	Estimação de Estado em Sistemas Elétricos de Potência	29
2.1	Introdução	29
2.2	Formulação Geral do Problema de EE em SEP	29
2.3	Etapas do Processo de EE em SEP	30
2.3.1	Obtenção da topologia do sistema e representação no modelo barra-ramo	30
2.3.2	Análise e restauração da observabilidade	30
2.3.3	Estimação de Estado	30
2.3.4	Processamento de Erros Grosseiros em Medidas	31
2.4	Redundâncias de Medidas	32
2.5	Medidas Ponto de Alavancamento	33
2.6	Formulação do Estimador de Estado WLS	34
2.6.1	Método da Equação Normal	34
2.7	Deteção de Erros Grosseiros	36
2.7.1	Teste do Índice $J(\hat{x})$	36
2.7.2	Propriedade dos Resíduos das Medidas	37
2.7.3	Teste do Maior Resíduo Normalizado	39
2.7.4	Teste do $\hat{\mathbf{b}}$	40
2.7.5	Teste de Hipóteses HTI	41
2.8	Tratamento de medidas com erros grosseiros	42
3	Índice de Não-Deteção de Erros Grosseiros (UI)	43
3.1	Introdução	43

3.2	Interpretação Geométrica do Estimador WLS	43
3.3	Decomposição do vetor de erro na medida	46
3.4	Índice de Não-Detecção de EGs (UI)	47
3.5	Utilização do Índice UI para Estimação dos erros das medidas	50
3.6	Comparação entre o e_σ e o teste- $\hat{b}$	53
3.7	Considerações Finais	54
4	Análise do Índice UI para medidas SCADA	55
4.1	Introdução	55
4.2	Preparação de Dados	56
4.3	Processamento de Erros Grosseiros em medidas SCADA	57
4.3.1	Simulações sem ruído gaussiano	58
4.3.2	Simulações com ruído gaussiano	63
4.4	Falha no teste do $\hat{b}$	70
4.5	Influência de EGs em medidas com alto e baixo índices UIs nos erros das estimativas das variáveis de estado	75
4.5.1	Sistema do IEEE de 14 barras	75
4.5.2	Sistema do IEEE de 30 barras	76
4.6	Considerações finais	78
5	Influência da Ponderação das Medidas no índice UI e na exatidão das estimativas	81
5.1	Introdução	81
5.2	Simulações Computacionais	83
5.2.1	Influência da ponderação das medidas no índice UI	87
5.2.2	Influência da ponderação das medidas na exatidão das estimativas	89
5.2.3	Influência da ponderação das medidas, no processamento de EGs, na presença de medidas com ruído e com EGs	91
5.3	Considerações Finais	93
6	Índice UI em Sistemas de Medição Híbridos	97
6.1	Introdução	97
6.2	Medição Fasorial Sincronizada no Processo de Estimação de Estado (EE) Sistema Elétrico de Potência (SEP)	97
6.3	Simulações Computacionais considerando Sistemas de Medição Híbridos .	101
6.3.1	Preparação dos Dados	101
6.3.2	Algoritmos Implementados	101
6.3.3	Processamento de EGs	102
6.3.4	Influência da inserção de PMUs no Índice UI de medidas SCADA	114
6.4	Índices UIs em um sistema somente com medidas de PMU	116

6.5	Considerações Finais	118
7	Conclusão	119
7.1	Perspectivas Futuras	120
7.2	Publicações	120
	Referências	123
	Anexos	129
ANEXO A	Transformação de Householder para solução de sistemas lineares	131

Introdução

1.1 Introdução

A operação em tempo real dos sistemas elétricos de potência (SEP) tem como principal objetivo o suprimento de energia elétrica, em obediência à trilogia de continuidade, qualidade e economia de serviço. Para alcançar tal objetivo, é necessário que os níveis de tensão, frequência, fluxos nas interligações, carregamento de linhas e equipamentos, sejam mantidos dentro de faixas, ou limites de segurança. Desta forma, a operação dos SEP exige que uma grande quantidade de informações esteja disponível para os operadores dos sistemas. Essas informações devem permitir a determinação do estado operativo corrente do SEP, isto é, determinar se o sistema está ou não operando adequadamente e, caso não esteja, deve indicar o que deve ser feito para corrigir essa operação inadequada.

Para saber se um sistema de potência está ou não operando de forma adequada analisa-se o seguinte conjunto de restrições (MONTICELLI, 1999):

- ❑ Restrições de Carga ($g(x) = 0$): traduzem o fato de que o SEP deve atender todos os consumidores. Logo são restrições de igualdade, sendo x as variáveis de estado que serão definidas na sequência;
- ❑ Restrição de Operação ($h(x) < 0$): refletem a necessidade de serem obedecidos os limites de operação dos equipamentos do SEP, por exemplo, a máxima potência que pode ser transmitida por uma determinada linha de transmissão;
- ❑ Restrições de segurança ($s(x) < 0$): consiste de um conjunto preestabelecido de contingências possíveis (ou as mais prováveis) de equipamentos do SEP para um determinado estado de operação. Tem o papel de verificar a capacidade de o SEP continuar operando da forma adequada após a ocorrência de alguma perturbação.

Destaca-se que todas essas restrições são funções vetoriais das variáveis de estado x , que serão definidas a seguir.

Baseando-se nessas restrições, quatro estados de operação foram definidos:

1. ESTADO NORMAL - SEGURO: É o estado de operação ideal, pois são obedecidos os três conjuntos de restrições: carga, operação e segurança. Isto significa que o sistema está em perfeitas condições de operação, sendo que, nenhuma das contingências de segurança preestabelecidas, se de fato ocorrer, levará o sistema ao estado de emergência;
2. ESTADO NORMAL - ALERTA: Neste estado, são obedecidas apenas as restrições de carga e operação. Da mesma maneira que no estado seguro, o sistema está atendendo perfeitamente a demanda, porém, basta que qualquer uma das contingências listadas venha a ocorrer para levar o sistema para o estado de emergência.
3. ESTADO DE EMERGÊNCIA: O que caracteriza o estado de emergência é a violação das restrições de operação. A emergência pode ser provocada por uma contingência e conseqüente desligamento de um ou mais componentes do sistema (linhas, geradores, etc);
4. ESTADO RESTAURATIVO: Este estado é atingido quando uma emergência é eliminada por desligamento manual ou automático de partes do sistema, efetuado pelo centro de controle ou por dispositivos locais. As restrições operacionais são obedecidas, mas o sistema não está intacto (cargas não-atendidas, ilhamentos, etc). Nota-se, portanto, que ao se passar do estado de emergência para o estado restaurativo, sacrifica-se a integridade total do sistema, a fim de se resgatar a observância das restrições de operação.

As transições entre os estados podem ocorrer tanto em consequência de perturbações no sistema (transições involuntárias) como devido a ações de controle (transições voluntárias).

Face ao exposto, para operar um SEP o primeiro passo é identificar o estado operativo corrente do mesmo, e, em seguida, determinar as ações de controle cabíveis. Como os estados operativos são funções das variáveis de estado x , usualmente definidas como as tensões complexas nas barras do sistema, a operação de um SEP requer a determinação dessas variáveis.

As variáveis de estado são determinadas através de um conjunto de medidas analógicas que são realizadas no SEP constituído usualmente de: fluxo de potência ativa e reativa nas linhas, injeção de potência ativa e reativa e algumas magnitudes de tensão nas barras. Devido à grande dimensão dos sistemas de potência, tais informações são obtidas através dos sistemas de telemedição, isto é, medições feitas à distância, que nem sempre propiciam a obtenção de todas as informações necessárias, estando ainda sujeitas a uma série de erros. Assim, para a obtenção de um banco de dados confiável, é necessário que as medidas sejam filtradas. Dessa forma, para execução dessa tarefa, os centros de controle dispõem de um conjunto de programas desenvolvíveis em computador para realização do processo de estimação de estado.

O primeiro passo do processo de estimação de estado é a obtenção da topologia do sistema, que se realiza a partir de medidas lógicas, obtidas de forma contínua consistindo em status de chaves e disjuntores (PIERETI, 2007). Uma vez obtida a topologia do sistema, o próximo passo será verificar se é possível determinar todos as variáveis de estado do sistema, através das medidas analógicas disponibilizadas em tempo-real pelo Sistema de Aquisição e Supervisão de Dados (SCADA do inglês, Supervisory Control and Data Acquisition). Em caso afirmativo, o sistema dir-se-á observável (BRETTAS, 1996; JR; ALBERTO; BRETAS, 2007; BENEDITO; LONDON; BRETAS, 2009; ALMEIDA; ASADA; GARCIA, 2008; ALMEIDA; GARCIA; ASADA, 2012). Caso contrário, a falta de medidas pode ser suprida por pseudo-medidas¹, através das quais o sistema se tornará observável como um todo. Sendo o sistema observável, a partir da topologia do sistema e dos seus parâmetros, armazenados no banco de dados dos centros de operação, bem como do conjunto de medidas analógicas disponível, realizar-se-á a estimação de estado propriamente dita.

Em razão de as medidas analógicas, utilizadas no processo de estimação de estado, apresentarem ruídos inerentes ao processo de telemedição, a estimação obtida, para as variáveis de estado desconhecidas, também não será exata. Pode-se dizer então que o processo de estimação de estado consiste em encontrar uma forma de atingir-se a melhor estimativa das variáveis de estado desconhecidas. Para isto, dos muitos critérios estatísticos existentes, o que vem sendo mais utilizado, no processo de estimação de estado em SEP, é o dos mínimos quadrados ponderados (WLS do inglês, Weighted Least Squares) (SCHWEPPE; WILDES, 1970).

Quando os erros nas medidas são Gaussianos, o Estimador WLS funciona muito bem, falhando, entanto, na ocorrência de um ou mais Erros Grosseiros (EGs)². Dentre as causas de EGs, permite-se-nos destacar: erros de conversão analógico-digital, erros nos canais de comunicação das telemedidas, e também a falta de sincronismo dos dados obtidos pelo Sistema SCADA, que ocorre pela ausência de uma fonte de sincronização das medições realizadas nos SEP.

Na tentativa de superar tal limitação, métodos para detecção e identificação de EGs foram desenvolvidos, dentre os quais os mais utilizados são aqueles baseados na análise estatística dos resíduos das medidas, ou numa função dos mesmos (MONTICELLI, 1999; ABUR; EXPOSITO, 2004). Isto porque os resíduos fornecem informações úteis sobre eventuais violações das suposições feitas em relação ao modelo de medição.

Na ocorrência de EG simples, isto é, quando apenas uma medida possui EG, ou EGs múltiplos não interativos, o estimador WLS associado com técnicas para processamento de EGs a partir da análise dos resíduos das medidas apresentam um bom desempenho.

¹Dados de previsão de carga, previsão de geração, dados históricos, etc, que fazem parte do banco de dados do centro de operação.

²Em geral dizemos que uma medida é portadora de EG, quando a mesma desvia do seu valor verdadeiro de, no mínimo, três vezes a sua variância (MILI et al., 1984).

Entretanto, podem falhar nas seguintes situações (BENEDITO, 2011)³ :

- ❑ EGs associados a medidas com baixa redundância (medidas críticas ou pertencentes a conjuntos críticos de medidas);
- ❑ EGs múltiplos interativos;
- ❑ EGs em medidas que possuem a característica de serem altamente influentes, ou seja, de atraírem a convergência do processo de estimação de estado, chamadas tradicionalmente de medidas ponto de alavancamento (MONTICELLI, 2000).

Devido a estes problemas, estimadores de estado mais robustos estatisticamente foram aplicados em SEP, como, por exemplo, o baseado no método do Mínimo Valor Absoluto Ponderado (Weighted Least Absolute Value, WLAV) (IRVING; OWEN; STERLING, 1978; KOTIUGA; VIDYASAGAR, 1982). O estimador WLAV mostrou-se mais robusto que o WLS associado com técnicas de análise de resíduos na presença de EGs simples e múltiplos. Entretanto, o WLAV também falha na ocorrência de EG em uma ou mais medidas ponto de alavancamento (discussão da referência (FALCÃO; ASSIS, 1988)).

Para contornar os problemas causados pelas medidas classificadas como pontos de alavancamento com EGs, em (PHANIRAJ; MILI; ROUSSEEUW, 1991) foi proposto o Estimador baseado no método da Mínima Mediana do Resíduo Ponderado ao Quadrado (Weighted Least Median of Squares, WLMS) para SEP. Esse estimador foi a primeira proposta de estimador robusto estatisticamente que é capaz de identificar EGs em medidas classificadas como pontos de alavancamento. Entretanto, tal estimador requer uma busca combinatorial, tornando-o inviável para aplicação, em tempo real, em SEP de grande porte (MONTICELLI, 2000; FALCAO; ARIAS, 1994).

Em função da inviabilidade prática do estimador WLMS, e tendo em vista que o estimador WLS, associado à análise dos resíduos das medidas, é o mais utilizado na prática, em função da simplicidade da sua formulação e da facilidade de ser implementado em computador, diversas pesquisas têm sido desenvolvidas para melhorar o processamento de EGs através desse estimador.

Em (MONTICELLI; GARCIA, 1983), o chamado teste- $\hat{b}$ é utilizado, em conjunto com o teste do maior resíduo normalizado, para melhorar o processo de identificação de possíveis EGs através da análise dos resíduos do estimador WLS.

Outra forma para identificar EGs através do estimador WLS foi proposta em (MILI; CUTSEM; RIBBENS-PAVELLA, 1984), conhecida como Identificação por Teste de Hipótese (teste HTI), que se baseia numa análise estatística concernente aos valores dos erros estimados em medidas, ao invés da análise dos resíduos normalizados. A eficiência do teste HTI dependerá do conjunto reduzido de medidas escolhido, também denominado conjunto

³Definições e conceitos pertinentes à redundância de medidas, aos tipos de EGs em medidas, assim como, à análise de resíduos das medidas, serão detalhados no capítulo 3.

suspeito (conjunto de medidas suspeitas de estarem com EG). Consequentemente, esse conjunto deve ser escolhido de modo a incluir todas as medidas portadoras de erros. Para selecionar essas medidas foi proposta, então, a utilização dos maiores resíduos normalizados. Vale destacar, entanto, que a escolha desse conjunto suspeito, através dos maiores resíduos normalizados, pode ser comprometida, já que existe a possibilidade de uma ou mais medidas portadoras de EGs apresentarem baixos valores de resíduos normalizados (ABUR; EXPOSITO, 2004) e, por conseguinte, obter-se-ão estimativas más para os valores dos erros.

Em (CARO; CONEJO; MÍNGUEZ, 2009; CARO et al., 2011) foi proposta uma matriz de ponderação não diagonal, para o estimador WLS, a fim de considerar as relações de dependência dos ruídos aleatórios das medidas aferidas.

A partir de uma análise geométrica dos resíduos do estimador WLS, em (LONDON JR. et al., 2004) foi demonstrado que a dificuldade em detectar EGs, em determinadas medidas redundantes, é um problema estrutural do processo de detecção a partir da análise dos resíduos do estimador WLS. Seguindo esse caminho, em (BENEDITO et al., 2013) foi desenvolvido um índice que permite a classificação das medidas de acordo com as suas características de não refletirem grande parcela de seus erros, nos resíduos do processo de estimação de estado por WLS. Esse índice foi denominado Índice de Não-Detecção de Erros, ou, simplesmente, *UI* (*Undetectability Index*). As medidas com maiores *UIs* são aquelas cujos EGs são mais difíceis de serem detectados, através da análise dos resíduos do estimador de estado WLS. Isso porque os erros dessas medidas são, de certa forma, *mascarados*, isto é, não são refletidos nos resíduos do estimador WLS. Em razão disso, o processamento de EGs, seja através da utilização do teste do maior resíduo normalizado, ou através do chamado teste- $\hat{b}$ (MONTICELLI; GARCIA, 1983), pode falhar na ocorrência de EGs em medidas com elevados índices *UIs*.

Conforme demonstrado em (BENEDITO, 2011), através do índice *UI* é possível obter-se uma estimativa da magnitude do erro de medida. Dessa forma, ao invés de eliminar a medida com erro, torna-se possível corrigir o valor da mesma para, em seguida, re-estimar as variáveis de estado, assim como proposto em (MONTICELLI; GARCIA, 1983), a partir do chamado teste- $\hat{b}$.

Fazendo uso também de uma análise geométrica dos resíduos do estimador de estado WLS, em (BRETAS et al., 2009; BRETAS et al., 2013), métodos para processamento de EGs foram propostos. Entretanto, apresentam ainda dificuldades para processamento de EGs múltiplos interativos.

No trabalho de Benedito (2011) foi feito um extenso estudo para mostrar os fatores que determinam o índice *UI* e através de simulações computacionais foi comprovado que os valores das medidas influenciam muito pouco (praticamente de forma desprezível) os valores dos índices *UI*. Comprovou-se que os parâmetros elétricos do sistema, juntamente com a redundância e a ponderação das medidas, são os fatores que realmente determinam os valores dos índices *UIs*.

Na tentativa de melhorar o processamento de EGs através da análise dos resíduos normalizados do estimador WLS, em (FILHO; SOUZA; GUIMARAENS, 2014) foi proposta a utilização de medidas fasoriais sincronizadas juntamente com medidas SCADA.

Importa destacar que o interesse por técnicas mais robustas para detecção e identificação de EGs tem aumentado muito em função da possibilidade de as informações fornecidas aos estimadores de estado sofrerem ataques cibernéticos (ASHOK; GOVINDARASU; AJJARAPU, 2016; CHAOJUN; JIRUTITIJAROEN; MOTANI, 2015). Acreditava-se, inicialmente, que as técnicas para processamento de EGs, a partir da análise dos resíduos do estimador WLS, seriam capazes de detectarem a presença de medidas corrompidas por esses ataques. Porém, em (LIU; NING; REITER, 2009) foi demonstrado que um tipo específico de ataque às informações processadas pelo estimador WLS, definido em inglês como *False Data Injection Attacks*, pode passar despercebido pela análise dos resíduos do estimador WLS. Nesse sentido importa destacar que alguns trabalhos indicam que a análise dos resíduos falha em função de esses ataques causarem um tipo de EG que não é refletido nos resíduos das medidas (CHAKHCHOUKH; ISHII, 2015), da mesma forma que os EGs em medidas com alto índice UI .

1.2 Proposição

Dentro do grupo de pesquisa em Estimação de Estado do Laboratório de Análise Computacional de Sistemas Elétricos de Potência (LACO-SEP), no qual este mestrado está inserido, ao longo dos últimos anos diversas pesquisas têm sido desenvolvidas propondo melhorias no contexto de processamento de EGs a partir da análise dos resíduos do estimador WLS. Cumpre ressaltar que essas pesquisas fazem uso de uma análise geométrica desses resíduos, ao invés da análise estatística normalmente empregada. A vantagem da análise geométrica está no fato de a mesma tornar mais evidentes os problemas estruturais do processo de detecção e identificação de EGs, através da análise dos resíduos do estimador WLS.

Nesse contexto, um dos principais resultados obtidos pelo grupo é, a nosso ver, a proposição do índice UI (BENEDITO; LONDON; BRETAS, 2009; BENEDITO et al., 2013), que, conforme mencionado anteriormente, permite qualificar as medidas de acordo com as suas características de não refletirem grande parcela de seus erros nos resíduos do estimador WLS. Consequentemente, o índice UI possibilita mensurar a dificuldade em detectar EGs nas medidas, através de técnicas que fazem uso dos resíduos do estimador WLS (ou seja, das técnicas baseadas nos testes do índice $J(x)$, do maior resíduo normalizado, $\hat{b}$ e no teste HTI).

Conforme mencionado anteriormente, as análises de sensibilidade, realizadas através de diversas simulações computacionais apresentadas em (BENEDITO, 2011), demonstram que os valores dos parâmetros da rede elétrica, juntamente com a ponderação e a redundância

local das medidas, são os fatores que mais influenciam nos valores dos índices UIs . Verificou-se, também, que os valores das medidas não influenciam de forma significativa os valores dos índices UIs .

Em (BENEDITO, 2011) foram propostas ainda duas aplicações para o índice UI :

- Um algoritmo para processamento de EGs simples. Para isso o primeiro passo foi demonstrar que é possível, através do índice UI , obter uma estimativa da magnitude do erro de medida em desvio padrão, para sistemas de medição contendo EGs simples, mesmo para medidas com UI elevado. Logo, ao invés de eliminar a medida portadora de EG, torna-se possível corrigir o valor da mesma para, em seguida, estimar novamente as variáveis de estado, assim como proposto por Monticelli e Garcia (1983). Com isso, em (BENEDITO, 2011) foi proposto um algoritmo para melhorar a detecção e identificação de EGs simples, baseado na análise do resíduo normalizado e do erro composto em desvio padrão. Vale ressaltar, entanto, que através de diversas simulações computacionais apresentadas em (BENEDITO, 2011), verificou-se que a eficácia do algoritmo proposto, aplicado em sistemas de medição sem adicionar ruído gaussiano às medidas, não foi a mesma nas simulações realizadas adicionando ruído gaussiano nas medidas. Ou seja, nas simulações considerando ruído nas medidas foi constatado que o algoritmo pode falhar, tanto na detecção, quanto na identificação de EGs, para medidas com altos índices UI (maior que 2). Destaca-se que, da mesma forma que o algoritmo proposto em (BENEDITO, 2011), o teste- $\hat{b}$, proposto em (MONTICELLI; GARCIA, 1983), também falha nessas condições;
- Dois algoritmos para projeto ou fortalecimento de sistemas de medição, para efeito de estimação de estado, que objetivam a obtenção de sistemas de medição confiáveis (observáveis e sem medidas críticas e conjuntos críticos) formados apenas por medidas com UI menor que um valor pré-estabelecido. Vale lembrar que quanto maior o índice UI das medidas, maior é a possibilidade de as técnicas para processamento de EGs baseadas na análise dos resíduos falharem para tratamento de EGs simples.

Com base nos algoritmos propostos em (BENEDITO, 2011), para projeto e fortalecimento de sistemas de medição, em (BOZZ, 2014) foi desenvolvido um método que, fazendo uso de um algoritmo evolutivo, otimiza o processo de busca para definição dos locais para instalação de medidores. O objetivo desse método é a obtenção de sistemas de medições confiáveis e de baixo custo, formados apenas por medidas com UIs menores que um valor pré-estabelecido.

Esta dissertação de mestrado tem como principal objetivo dar continuidade às pesquisas já realizadas no LACO-SEP, relacionadas à utilização do índice UI para processamento de EGs. Para isso as propostas deste trabalho são as seguintes:

1. Comprovar que, apesar de os EGs simples em medidas com alto índice UI não afetarem de forma significativa os resíduos das medidas, eles afetam as estimativas

do estimador WLS tanto quanto, ou, até mesmo, de forma mais significativa que os EGs em medidas com baixo índice UI . Isto com o intuito de justificar a importância de estudos para tornar possível o processamento de EGs em medidas com alto índice UI (lembrando que quanto maior o índice UI de uma medida maior a possibilidade de falha no processamento de EGs simples nessa medida a partir da análise dos resíduos do estimador WLS);

2. Definir uma maneira mais adequada para ponderar as medidas. Ou seja, ponderações que acarretem uma diminuição do índice UI das medidas, afetando de forma positiva o processamento de EGs, sem comprometer a exatidão das estimativas. Vale salientar que, conforme demonstrado em (BENEDITO, 2011), a ponderação das medidas é um dos fatores que mais influenciam nos valores dos índices UIs (juntamente com os valores dos parâmetros da rede elétrica e a redundância das medidas);
3. Estender a visão geométrica dos resíduos do estimador de estado WLS, baseada na obtenção e análise do índice UI (BENEDITO et al., 2013), para sistemas de medição híbridos, isto é, sistemas formados por medidas convencionais, obtidas via sistema SCADA, e por medidas fasoriais sincronizadas obtidas pelas PMUs.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está estruturado da seguinte forma:

Capítulo 2 - detalha todo o processo de Estimação de Estado em Sistemas Elétricos de Potência, destacando, em especial, o estimador WLS e o processo de detecção e identificação de EGs via análise dos resíduos desse estimador.

Capítulo 3 - apresenta o Índice UI , bem como todo o embasamento teórico necessário para seu entendimento. Apresenta, ainda, um procedimento para utilização desse índice para estimar a magnitude de erros de medidas em desvio padrão.

Capítulo 4 - mostra diversas simulações computacionais para validação dos aspectos teóricos apresentados no Capítulo 4.

Capítulo 5 - realiza uma análise para determinar uma maneira adequada para definição da ponderação das medidas, fazendo uso apenas de informações que estão disponíveis na prática. Nesse capítulo considerar-se-á como mais adequada a ponderação que: (i) proporciona um valor menor de UI para as medidas; (ii) permite a obtenção de estimativas de melhor exatidão; e (iii) aumenta a eficiência das técnicas de processamento de EGs baseadas na análise dos resíduos do estimador WLS na ocorrência de EGs simples.

Capítulo 6 - estende a visão geométrica dos resíduos do estimador de estado WLS, baseada na obtenção e análise do índice UI , para sistemas de medição formados por medidas SCADA e medidas fasoriais sincronizadas.

Capítulo 7 - destaca as principais conclusões e as perspectivas futuras para continuidade do trabalho desenvolvido nesta dissertação.

Estimação de Estado em Sistemas Elétricos de Potência

2.1 Introdução

Neste capítulo apresentar-se-á, de forma detalhada, o processo de estimação de estado em SEP. Inicialmente será apresentada a formulação geral do problema de estimação de estado (EE). Depois serão detalhadas as quatro etapas do processo convencional de EE em SEP e, em seguida, será apresentada a formulação do estimador WLS, bem como métodos para processamento de EGs baseados na análise dos resíduos desse estimador.

2.2 Formulação Geral do Problema de EE em SEP

Tendo as medidas analógicas aferidas através de sistemas de telemedição (medições feitas à distância) é possível relaciona-las com a topologia da rede juntamente com seus parâmetros através de equações não-lineares das variáveis de estado, com possíveis erros de medição, pela equação abaixo:

$$\underline{z} = \underline{h}(\underline{x}) + \underline{w} \quad (2.1)$$

Onde:

$\underline{z}$: vetor de medidas analógicas aferidas ($m \times 1$);

$\underline{h}(\underline{x})$: vetor de funções não lineares que relaciona as medidas com as variáveis de estado ($m \times 1$);

$\underline{x}$: vetor de variáveis de estado ($n \times 1$);

$\underline{w}$: vetor de erros das medidas que são consideradas variáveis aleatórias independentes, com distribuição Gaussiana de média zero e matriz de covariância R , suposta diagonal. ($m \times 1$);

m : número de medidas;

n : número de variáveis de estado a serem estimadas.

As medidas analógicas são usualmente medidas de fluxos de potência ativa e reativa, injeção de potência ativa e reativa e magnitude de tensão obtidas através do sistema Supervisory Control and Data Acquisition System (SCADA). Geralmente as informações de injeções de potência nulas em barras passivas são utilizadas no processo de estimação de estado. Essas informações são conhecidas como medidas virtuais. Em função de serem informações precisas, elas são tratadas como medidas com variâncias muito baixas.

Na próxima sessão serão descritas, detalhadamente, as quatro etapas do processo de estimação de estado em SEP.

2.3 Etapas do Processo de EE em SEP

2.3.1 Obtenção da topologia do sistema e representação no modelo barra-ramo

Esta etapa é realizada através do configurador de redes. A partir de medidas lógicas obtidas de forma contínua e que consistem em estado de chaves e disjuntores, e também de informações sobre a localização de medidores, o configurador de redes determina o diagrama unificar da rede, no modelo barra-ramo, com a correspondente configuração de medidores. A figura 2.2 mostra o modelo barra-ramo e a correspondente locação de medidores, obtida para o sistema apresentado na figura 2.1.

2.3.2 Análise e restauração da observabilidade

Na segunda etapa verifica-se se é possível estimar todas as variáveis de estado do sistema com as medidas disponíveis no conjunto de medição. Caso isso seja possível segue-se para a próxima etapa. Caso contrário, há duas alternativas.

A primeira consiste em restaurar a observabilidade utilizando pseudo-medidas. A segunda alternativa é buscar ilhas observáveis no sistema e estimar o estado de cada "ilha" (parte do sistema onde é possível calcular o estado do sistema) separadamente.

Então pode-se seguir para a próxima etapa, que é a estimação de estado propriamente dita.

2.3.3 Estimação de Estado

Nesta etapa realiza-se a estimação de estado propriamente dita, ou seja, a partir de um conjunto de informações fornecido para o estimador (a topologia da rede no modelo barra-ramo (Etapa 1), os valores das medidas necessárias para o sistema ser observável (observabilidade verificada na Etapa 2) e os parâmetros elétricos disponíveis no banco de dados das companhias), o estimador entrega como saída as estimativas das tensões complexas nodais nas barras do SEP.

Figura 2.1: Modelo do sistema em nível de seção de barra e dispositivos seccionadores, incluindo arranjos de medidores (UG representa unidade geradora; LT representa linha de transmissão; TR representa transformador; CS representa condensador síncrono; W medidor de potência ativa e Var medidor de potência reativa).

Fonte: (LONDON, 2012)

Vale lembrar que, em razão da simplicidade da sua formulação, bem como da facilidade com que nos permite implantar em computador, o estimador WLS é o mais utilizado na prática.

2.3.4 Processamento de Erros Grosseiros em Medidas

Conforme mencionado no capítulo 1, as medidas analógicas fornecidas ao estimador de estado estão sujeitas a EGs. Dessa forma, o estimador de estado deve ser robusto o suficiente para detectar e identificar a ocorrência de EGs. Após a identificação da medida portadora de EG, é necessário eliminar o seu efeito sobre a estimativa. Isso pode ser feito de duas formas:

1. Eliminando a medida com EG do conjunto de medidas e procedendo-se à estimação de estado novamente; ou
2. Recuperando o valor da medida com EG, através do valor de erro estimado, conhecido

Figura 2.2: Modelo barra-ramo do SEP da Figura 2.1, incluindo localização de medidores.

Fonte: (LONDON, 2012)

como teste- $\hat{b}$ proposto em (MONTICELLI; GARCIA, 1983). Em seguida realiza-se a estimação de estado novamente (Etapa 3).

O processo de estimação de estado como um todo termina quando, após uma estimativa, não for detectada/identificada nenhuma medida com EG.

Os EGS são usualmente classificados da seguinte forma:

Erros Grosseiro simples : quando há apenas uma medida portadora de EG;

Erro Grosseiro Múltiplo : quando há mais de uma medida com EG. Tais erros podem ainda ser classificados como interativos ou não-interativos:

Erros Não-Interativos : Quando os resíduos das medidas são fracamente correlacionados, ou seja, o resíduo de uma medida pouco afeta o resíduo de outra medida;

Erros Interativos : Quando os resíduos das medidas são fortemente correlacionados, ou seja, o resíduo de uma medida afeta o resíduo de outra medida. Os EGs interativos podem ser classificados ainda como conformativos ou não-conformativos:

Não-conformativos : São EGs que não são mascarados no resíduo da medida.

Conformativos : São EGs que são mascarados pelo resíduo. Desta forma, as medidas com EGs irão apresentar resíduos normalizados pequenos, e medidas *sadias* (sem EGs) podem ser identificadas como portadores de EGs.

A correlação entre esses tipos de EGs esta apresentado na figura 2.3 (MONTICELLI; WU; YEN, 1986).

2.4 Redundâncias de Medidas

Em termos de redundância, as medidas fornecidas ao estimador de estado podem ser classificadas como:

Figura 2.3: Classificação de erros grosseiros em medidas

Fonte: Monticelli, Wu e Yen (1986)

Medida Crítica: É a medida que, se retirada de um conjunto de medidas de um sistema observável (ou de uma ilha observável), torna o mesmo não observável (ou torna a ilha não observável). Além disso, essas medidas possuem resíduos nulos independente de estarem ou não com EGs, o que torna impossível a detecção de EGs por análise de resíduos (CLEMENTS; DAVIS; KRUMPHOLZ, 1981).

Medida Redundante: Uma medida é classificada como redundante quando ela não é crítica.

Conjunto Crítico: É definido como um conjunto de medidas redundantes que ao remover uma delas do sistema de medição torna as demais medidas críticas.

Um termo bastante utilizado para aferir a redundância de medidas é o conceito de redundância global, que é definido como a razão entre o número de medidas e o número de variáveis de estado a serem estimadas. Entretanto, deve-se ter em mente que um bom nível de redundância global (maior que 3,5) não exclui a possibilidade do conjunto de medição possuir medidas críticas ou conjunto crítico de medidas (pois as medidas disponíveis podem estar distribuídas no sistema de uma forma inadequada).

2.5 Medidas Ponto de Alavancamento

Do inglês *leverage point*, esse termo foi empregado na análise de estatística robusta de regressão por Rousseeuw e Leroy (1987), Huber (1964) e introduzida no problema de EE de SEP por Phaniraj, Mili e Rousseeuw (1991).

Em Phaniraj, Mili e Rousseeuw (1991), os autores definem as medidas “ponto de alavancamento” como sendo aquelas que possuem posições discrepantes (no inglês, *outliers*), em relação às demais medidas projetadas no espaço de fator.

No processo de EE de SEP, espaço de fator é definido como sendo o espaço de dimensão N , gerado pelas linhas $l_i (i = 1, \dots, M)$, da matriz Jacobiana ponderada $\tilde{H}$ ($\tilde{H} = R^{-1/2} \cdot H$). Desta forma, cada uma das linhas $\underline{l}_i^t$ representa um ponto no espaço fator. Assim, a medida ponto de alavancamento corresponde a um ponto $\underline{l}_i^t$, afastado dos demais no espaço de fator.

Usualmente as seguintes situações tendem a gerar medidas ponto de alavancamento em SEP:

- Medidas de fluxo e de injeção de potência, adjacentes às linhas de transmissão que sejam relativamente curtas, quando comparadas com as demais linhas de transmissão do sistema;
- Medidas de injeção de potência, adjacentes às barras que apresentam elevado número de linhas incidentes.

2.6 Formulação do Estimador de Estado WLS

2.6.1 Método da Equação Normal

Aplicando o estimador WLS, a melhor estimativa do vetor de variáveis de estado $\underline{x}$, aqui designado por $\hat{\underline{x}}$, pode ser obtida, determinando-se o valor de $\underline{x}$ que torne mínimo o índice $J(\underline{x})$, com relação ao vetor de estado $\underline{x}$. O índice $J(\underline{x})$ é dado por:

$$J(\underline{x}) = \underline{w}^t \cdot R^{-1} \cdot \underline{w} \quad (2.2)$$

ou

$$J(\underline{x}) = [\underline{z} - h(\underline{x})]^t \cdot R^{-1} \cdot [\underline{z} - h(\underline{x})] \quad (2.3)$$

Sendo R^{-1} o inverso da matriz de covariância do vetor de erros das medidas, aqui utilizada como a matriz de ponderação das medidas.

O índice $J(\underline{x})$ torna-se mínimo quando:

$$\frac{\partial J(\underline{x})}{\partial \underline{x}} = 0 \quad (2.4)$$

ou

$$H(\hat{\underline{x}})^T \cdot R^{-1} \cdot [\underline{z} - h(\hat{\underline{x}})] = 0 \quad (2.5)$$

Sendo $H(\hat{\underline{x}})$ a matriz de primeiras derivadas das funções não lineares do vetor $\underline{h}(\underline{x})$, conhecida como matriz Jacobiana, calculada no ponto representado pelo vetor de variáveis

de estado estimado $\hat{\underline{x}}$, e representada por:

$$H(\hat{\underline{x}}) = \left. \frac{\partial h(\underline{x})}{\partial \underline{x}} \right|_{\underline{x}=\hat{\underline{x}}} \quad (2.6)$$

Em razão de o índice $J(\underline{x})$ ser representado por uma função quadrática, expressa em termos de um vetor de equações não-lineares, a solução de $\hat{\underline{x}}$ exige a aplicação de um método iterativo, que resolva uma equação linear a cada iteração k , de modo a calcular a estimativa corrente do vetor de variáveis de estado, através de sucessivas correções (SCHWEPPE; HANDSCHIN, 1974), dados por:

$$\underline{x}^{k+1} = \underline{x}^k + \Delta \underline{x}^k \quad (2.7)$$

No entanto, para determinar a correção $\Delta \underline{x}^k$, efetua-se a linearização das equações de $\underline{h}(\underline{x})$ em torno do ponto $\underline{x}^k$, representada pela equação:

$$\underline{h}(\underline{x}^{k+1}) \cong \underline{h}(\underline{x}^k) + H(\underline{x}^k) \cdot \Delta \underline{x}^k \quad (2.8)$$

Reescrevendo a equação 2.8, em relação às aproximações realizadas em $\underline{h}(\underline{x})$, obtêm-se o modelo de medição que se converteu em linear.

$$\underline{z} = \underline{h}(\underline{x}^k) + H(\underline{x}^k) \cdot \Delta \underline{x}^k + \underline{w} \quad (2.9)$$

ou ainda

$$\Delta \underline{z}(\underline{x}^k) = \underline{z} - \underline{h}(\underline{x}^k) = H(\underline{x}^k) \cdot \Delta \underline{x}^k + \underline{w} \quad (2.10)$$

Sendo $\Delta \underline{z}(\underline{x}^k)$ definido como vetor dos resíduos de medição.

A partir do modelo de medição linear, a função objetivo $J(\Delta \underline{x})$ torna-se:

$$J(\Delta \underline{x}) = [\Delta \underline{z}(\underline{x}^k) - H(\underline{x}^k) \cdot \Delta \underline{x}^k]^T \cdot R^{-1} \cdot [\Delta \underline{z}(\underline{x}^k) - H(\underline{x}^k) \cdot \Delta \underline{x}^k] \quad (2.11)$$

cujos mínimos são calculados a partir de

$$\frac{\partial J(\Delta \underline{x})}{\partial \Delta \underline{x}} = H(\underline{x}^k)^T \cdot R^{-1} \cdot [\Delta \underline{z}(\underline{x}^k) - H(\underline{x}^k) \cdot \Delta \underline{x}^k] = 0 \quad (2.12)$$

Logo, a solução pode ser processada pela seguinte expressão:

$$\Delta \underline{x}^k = [H(\underline{x}^k)^T \cdot R^{-1} \cdot H(\underline{x}^k)]^{-1} \cdot H(\underline{x}^k)^T \cdot R^{-1} \cdot \Delta \underline{z}(\underline{x}^k) \quad (2.13)$$

que é denominada Equação Normal, onde:

$$H(\underline{x}^k)^T \cdot R^{-1} \cdot H(\underline{x}^k) = G(\underline{x}^k) \quad (2.14)$$

Representa a matriz Ganho (G), ou matriz de informação.

O processo iterativo começa a partir de uma estimativa inicial $\underline{x}^0$, e, a cada iteração k , as correções nas variáveis de estado $\Delta \underline{x}$ são obtidas através da equação 2.13. A atualização

do vetor de variáveis de estado é obtida através da relação iterativa representada na equação 2.7, até que algum critério de parada seja satisfeito, por exemplo:

$$\max |\Delta \underline{x}^k| \leq \varepsilon \quad (2.15)$$

No qual ε denota a tolerância previamente estabelecida. Assim, esses critérios indicarão que o processo iterativo é encerrado quando a magnitude dos ajustes nas variáveis de estado for desprezível.

O algoritmo do estimador WLS pode ser descrito nos seguintes passos:

Passo 1 : Fazer $k = 0$ e escolher a solução inicial $\underline{x}^k = \underline{x}^0$;

Passo 1 : Calcular as matrizes $H(\underline{x}^k)$ e $G(\underline{x}^k)$ no ponto $\underline{x} = \underline{x}^k$;

Passo 3 : Obter a correção nas variáveis de estado através da equação normal e atualizar as variáveis;

$$\Delta \underline{x}^k = G(\underline{x}^k)^{-1} \cdot H(\underline{x}^k)^T \cdot R^{-1} \cdot \Delta \underline{z}(\underline{x}^k) \quad (2.16)$$

$$\underline{x}^{k+1} = \underline{x}^k + \Delta \underline{x}^k \quad (2.17)$$

Passo 4 : Testar a convergência: se $\max |\Delta \underline{x}^k| \leq \varepsilon$, o processo convergiu, $\hat{\underline{x}} = \underline{x}^{k+1}$. Caso contrário, faça $k = k + 1$ e retorne ao Passo 2.

2.7 Detecção de Erros Grosseiros

A detecção de erros grosseiros consiste em determinar se o conjunto de medidas contém erros grosseiros ou não, já a identificação é encontrar a medida específica que possui erro grosseiro. Medidas portadoras de erros grosseiros podem ser removidos do sistema desde que ela não torne o sistema não-observável.

Os testes mais comuns para detecção de erros grosseiros a partir do estimador WLS são o teste do maior resíduo normalizado, teste do índice $J(\hat{\underline{x}})$, teste $\hat{b}$ e o método de identificação por teste de hipótese (Hypothesis Testing Identification (HTI)).

2.7.1 Teste do Índice $J(\hat{\underline{x}})$

O primeiro método de detecção de erros grosseiros foi proposto por Schweppe e Wildes (1970) e baseia-se na distribuição de probabilidade qui-quadrado (χ^2). O índice $J(\underline{x})$ representa o somatório dos quadrados dos resíduos ponderados, pelos inversos das variâncias dos erros de medição, sendo dado por:

$$J(\hat{\underline{x}}) = \sum_{i=1}^m \frac{(z_i - h_i(\hat{\underline{x}}))^2}{\sigma_i^2} \quad (2.18)$$

Então a detecção de erros grosseiros no processo de EE em SEP pode ser realizado pelo índice $J(\hat{\underline{x}})$ através de um teste de hipótese. Admitindo que o vetor dos erros

nas medidas (w) possua distribuição normal e que não haja nenhuma medida com erro grosseiro, 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 e variáveis de estado respectivamente.

Se $J(\hat{x}) > C$ há erro grosseiro, mas se $J(\hat{x}) < C$ não há erro grosseiro. Para determinar o parâmetro C escolhe-se uma probabilidade de alarme falso α .

Esse método possibilita a detecção de EGs mas não a identificação das medidas com EGs. No caso da presença de medidas críticas com EGs esse método irá falhar, pois o resíduo dessas medidas é nulo.

Os passos do algoritmo para detecção a partir do Índice $J(x)$ são:

Passo 1: Resolva o estimador WLS e calcule o valor da função objetivo:

$$J(\hat{x}) = \sum_{i=0}^m \frac{(z_i - h_i(\hat{x}))^2}{\sigma_i^2} \quad (2.19)$$

sendo: $\hat{x}$: vetor de variáveis de estado estimadas de dimensão n .

$h_i(\hat{x})$: valor estimado da medida i .

z_i : valor medido da medida i .

$\sigma_i^2 = R_{ii}$: variância do erro na medida i .

m : número de medidas

Passo 2: Encontre na tabela da distribuição χ^2 o valor correspondente à uma detecção com probabilidade $p = 95\%$ e $(m - n)$ graus de liberdade. Seja este valor $\chi_{(m-n),p}^2$, assim:

$$p = Pr(J(\hat{x}) \leq \chi_{(m-n),p}^2) \quad (2.20)$$

Passo 3: Teste se $J(\hat{x}) \geq \chi_{(m-n),p}^2$. Em caso afirmativo, há suspeita de EG, caso contrário, assume-se que as medidas são livres de EGs.

2.7.2 Propriedade dos Resíduos das Medidas

Considere a equação do modelo de medição linear:

$$\Delta z = H\Delta x + \underline{w} \quad (2.21)$$

Onde, $E(w) = 0$ e $conv(w) = R$, que é uma matriz diagonal, assumindo que os erros das medidas não são correlacionados. Deve-se atentar ao fato de que os resíduos das medidas podem ser correlacionas, mesmo se os erros das medidas forem considerados como independentes (ABUR; EXPOSITO, 2004). Então, para o estimador WLS, o vetor de estado estimado linearizado será:

$$\Delta \hat{x} = (H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1} \Delta z \quad (2.22)$$

$$\Delta \hat{x} = G^{-1} H^T R^{-1} \Delta z \quad (2.23)$$

O valor de Δz estimado será:

$$\Delta \hat{z} = H \Delta \hat{x} = K \Delta z \quad (2.24)$$

Sendo K a matriz de projeção ou matriz chapéu dado por:

$$K = H G^{-1} H^T R^{-1} \quad (2.25)$$

A matriz K nos dá uma boa indicação da redundância local das medidas. Se o valor da diagonal principal é elevado se comparado com os demais elementos da respectiva linha da matriz podemos dizer que o valor estimado dessa medida é determinado essencialmente por aquele valor medido, indicando que o nível de redundância local é baixo.

A seguir apresenta-se algumas propriedades principais da matriz de projeções (ABUR; EXPOSITO, 2004):

1. $K \cdot K \cdot K \cdots K = K$
2. $K \cdot H = H$
3. $(I - K) \cdot H = 0$

O vetor de resíduo da medida é a diferença entre o valor da medida menos o valor estimado. Representado matematicamente por:

$$\underline{r} = \underline{z} - \underline{\hat{z}} \quad (2.26)$$

Utilizando as equações 2.24 e 2.26 podemos dizer que o resíduo da medida é dado por:

$$\begin{aligned} r &= \Delta z - \Delta \hat{z} \\ r &= (I - K) \Delta z \\ r &= (I - K)(H \Delta x + \underline{w}) \\ r &= (I - K) \underline{w} \\ r &= S \underline{w} \end{aligned} \quad (2.27)$$

A matriz S é chamada de matriz de sensibilidade do resíduo e representa a sensibilidade dos resíduos das medidas em relação aos erros destas medidas (MONTICELLI, 2000). Essa matriz tem as seguintes propriedades:

1. Não é uma matriz simétrica, a menos que as covariâncias dos erros sejam todas iguais, isto é, $R = k \cdot I$, onde k é um escalar.
2. $S \cdot S \cdot S \cdots S = S$
3. $S \cdot R \cdot S^T = S \cdot R$

Uma das hipóteses que consideramos no EE Weighted Least Squares (WLS) é que os erros das medidas seguem uma distribuição de probabilidade Gaussiana $w_i \sim N(0, R_{ii})$ para todo i . A partir dessa informação podemos dizer que a média do vetor de resíduos de medidas $E(r)$ é:

$$E(r) = E(S \cdot w) = S \cdot E(w) = 0 \quad (2.28)$$

Mas a matriz de covariância do vetor resíduo de medidas (Ω) é dado por:

$$\begin{aligned} cov(r) &= \Omega = E(r \cdot r^T) \\ &= S \cdot E(r \cdot r^T) \cdot S^T \\ &= S \cdot R \cdot S^T \\ &= S \cdot R \end{aligned} \quad (2.29)$$

2.7.3 Teste do Maior Resíduo Normalizado

Outro caminho para detecção de EGs é o teste do maior resíduo normalizado. 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:

$$r = z - h(\hat{x}) \quad (2.30)$$

Em seguida o resíduo é normalizado dividindo-o pelo correspondente elemento da diagonal principal da matriz de covariância de resíduos.

$$r_i^N = \frac{r_i}{\sqrt{\Omega_{ii}}} \quad (2.31)$$

Sendo $\sqrt{\Omega_{ii}}$ o desvio padrão do i -ésimo componente do vetor dos resíduos e Ω a matriz de covariância dos resíduos dada por:

$$\Omega = R - H(\hat{x}) \cdot G^{-1}(\hat{x}) \cdot H^T(\hat{x}) \quad (2.32)$$

O vetor de resíduos normalizados apresenta uma distribuição normal padrão $r_i^N \sim N(0, 1)$ logo, podemos detectar se uma medida possui erros grosseiros através do seguinte teste:

- Se algum $|r_i^N| > \beta$ com $i = 1, \dots, M$; há suspeita de Erros Grosseiros (EGs)
- Se algum $|r_i^N| \leq \beta$ com $i = 1, \dots, M$; não há suspeita de EGs

Sendo β um limiar estatístico determinado admitindo-se certa probabilidade de α de se tomar a decisão errada, para uma distribuição normal padrão, isto é $\beta = N(0, 1)$. Geralmente adota-se $\beta = 3$ (ABUR; EXPOSITO, 2004).

Esse método mostrou-se muito confiável para a detecção de erros grosseiros simples, ou seja, quando há presença de um único erro grosseiro e também quando o nível de redundância é alto, onde não haja medidas críticas ou conjunto críticos de medidas. No caso de erros grosseiros múltiplos é possível detectá-los de forma sequencial, um de cada vez.

É importante lembrar também que nesse método é possível identificar qual medida é portadora de erro grosseiro diferentemente do método $J(\hat{x})$.

Algoritmo para detecção e identificação de erros grosseiros utilizando o teste de maior resíduo normalizado:

Passo 1: Resolva o estimador WLS e obtenha o vetor de resíduos das medidas:

$$r_i = z_i - h_i(\hat{x}) \quad i = 1, \dots, m \quad (2.33)$$

Passo 2: Calcule os resíduos normalizados:

$$r_i^N = \frac{|r_i|}{\sqrt{\Omega_{ii}}} \quad i = 1, \dots, m \quad (2.34)$$

Passo 3: Encontre k de modo que r_k^N seja maior dentre todos os r_i^N . $i = 1, \dots, m$

Passo 4: Se $r_k^N > \beta$, então a medida k é suspeita de possuir erro grosseiro. Caso contrário, pare, não há suspeita de existência de erro grosseiro.

Passo 5: Realize o tratamento adequado à medida errônea e volte ao *Passo 1*.

2.7.4 Teste do $\hat{b}$

Em Monticelli e Garcia (1983) foi proposto o chamado teste- $\hat{b}$ que é utilizado em conjunto com o teste de maior resíduo normalizado, com o objetivo de melhorar ainda mais o processo de identificação de EGs.

O teste- $\hat{b}$ baseia-se em uma estimativa do valor do erro grosseiro, na medida considerada suspeita. Essa estimativa é calculada através da matriz de sensibilidade do resíduo (matriz S) cuja dimensão é $m \times m$. Essa matriz pode ser obtida através da seguinte fórmula.

$$S = I - H(\hat{x}) \cdot G(\hat{x})^{-1} H(\hat{x}) \cdot R^{-1} \quad (2.35)$$

Para obter a estimativa do valor do erro grosseiro, na medida redundante considerada suspeita, deve utilizar a seguinte equação:

$$r_i = S_{ii} \cdot w_i \quad (2.36)$$

Onde i é a medida suspeita de ter erro grosseiro.

A partir da equação 2.36 em Monticelli e Garcia (1983) demonstrou-se que o erro w_i pode ser representado da seguinte forma:

$$w_i = \frac{r_i}{S_{ii}} = \frac{R_{ii} \cdot r_i}{\Omega_{ii}} = \sigma_i \cdot \frac{\sigma_i \cdot r_i}{\Omega_{ii}} \quad (2.37)$$

$$w_i = \sigma_i \cdot \hat{b}_i \quad (2.38)$$

Sendo:

$$\hat{b}_i = \frac{\sigma_i \cdot r_i}{\Omega_{ii}} = \frac{\sigma_i \cdot r_i}{\sqrt{\Omega_{ii}} \cdot \sqrt{\Omega_{ii}}} = \frac{\sigma_i \cdot r_i^N}{\sqrt{\Omega_{ii}}} \quad (2.39)$$

Através disso é possível detectar a presença de erros na medida de maior resíduo normalizado pelo teste:

- Se $|\hat{b}_i| > c$, a medida i apresenta erro grosseiro.
- Se $|\hat{b}_i| \leq c$, a medida i não apresenta erro grosseiro.

Em Monticelli e Garcia (1983) o valor de limiar c escolhido foi $c = 4$. O teste- $\hat{b}$ apresenta as mesmas limitações do teste do resíduo normalizado já citadas anteriormente.

O algoritmo para processamento de EGs pelo teste- $\hat{b}$ é:

Passo 1: Determine as variáveis de estado ($\hat{x}$) por meio do estimador de estado WLS;

Passo 2: Calcule o resíduo normalizado de cada medida;

$$r_i^N = \frac{|r_i|}{\sqrt{\Omega_{ii}}} \quad i = 1, \dots, m. \quad (2.40)$$

Passe 3: Encontre a medida i com o maior resíduo normalizado em módulo;

Passo 4: Determine o erro estimado $\hat{b}_i$ para medida i , dado por:

$$\hat{b}_i = \frac{\sigma_i}{\sqrt{\Omega_{ii}}} \cdot r_i^N \quad (2.41)$$

Passo 5: Verificar se a medida i possui EG, ou seja:

- Se $\hat{b}_i > c$, a medida i apresenta EG; vá para o passo 6;
- Se $\hat{b}_i \leq c$, a medida i não apresenta EG; fim.

Passo 6: Remova a medida z_i do plano de medição e volte ao Passo 1.

Outra opção seria ao invés de eliminar a medida portadora de EG é substituí-la fazendo uso do $\hat{b}_i$, conforme proposto em Monticelli e Garcia (1983).

2.7.5 Teste de Hipóteses HTI

Foi proposto por Mili, Cutsem e Ribbens-Pavella (1984) uma outra forma de detectar erros grosseiros. Esse método basea-se na análise estatística concernente aos valores de erros estimados em medidas, ao invés da análise dos resíduos das medidas.

O erros estimados das medidas podem ser calculados através da seguinte equação:

$$\hat{w} = S^{-1} \cdot r \quad (2.42)$$

Onde: $\hat{w}$ é o vetor de erros estimados.

É importante notar que não é possível obter a estimativa dos erros de todas as medidas pois o posto da matriz S é menor que o número de medidas m , com mais precisão: $\text{posto}(S) = m - n$. Logo só é possível estimar o erro de $m - n$ medidas através da forma reduzida da matriz S .

A eficiência desse método depende do conjunto reduzido de medidas suspeitas escolhido, denominado conjunto suspeito. As medidas classificadas como suspeitas de estarem com EGs são aquelas apresentando os maiores resíduos normalizados.

Depois de escolhido o conjunto suspeito e do cálculo dos seus erros estimados ($\hat{w}^S$), deve-se obter a distribuição de probabilidade para o erro estimado, e a seguir, identificar

os EGs, através de um teste de hipótese similar ao apresentado para a detecção de erros via índice $J(\hat{x})$. Dessa forma, é possível detectar erros múltiplos, ou seja, mais de um erro por vez.

Deve-se lembrar que o teste de resíduos normalizados pode falhar se houverem medidas com EGs mascarados nos resíduos, ou seja, medidas com resíduos baixos mas que apresentam EGs. Logo a seleção do conjunto de medidas suspeitos pode ser comprometido devido a falha do teste dos resíduo normalizado.

2.8 Tratamento de medidas com erros grosseiros

Após a identificação da medida portadora de erro grosseiro há duas maneiras que tratar esse problema com o intuito de eliminar seu efeito.

- i) Remover a medida com erro grosseiro do conjunto de medidas e re-estimar o estado.
- ii) Recuperar o valor da medida através do valor de erro estimado, ou $\hat{b}_i$, e re-estimar o estado.

A recuperação da medida pode ser feita através da seguinte equação:

$$z_i^{novo} = z_i^{antigo} - \sigma_i \cdot \hat{b}_i \quad (2.43)$$

Onde:

z_i^{novo} é o valor novo da medida recuperada.

z_i^{antigo} é o valor da medida que contém erro grosseiro.

σ_i é o valor do desvio padrão da medida.

$\hat{b}_i$ é o valor calculado pela equação 2.39

Índice de Não-Detecção de Erros Grosseiros (UI)

3.1 Introdução

Neste capítulo será apresentado o índice UI , juntamente com todo o embasamento teórico necessário para seu entendimento, conforme apresentado em (BENEDITO, 2011). Vale lembrar que as propostas de pesquisas desta dissertação de mestrado baseiam-se na utilização desse índice. Após a definição do índice UI , apresentar-se-á um procedimento para utilização desse índice para estimar a magnitude de erros de medidas em desvio padrão, conforme realizado a partir do teste- $\hat{b}$ apresentado em (MONTICELLI; GARCIA, 1983).

3.2 Interpretação Geométrica do Estimador WLS

Como visto em capítulos anteriores, as m medidas e as n variáveis de estado de um sistema elétrico estão relacionadas através do seguinte modelo de medição

$$\underline{z} = h(\underline{x}) + \underline{w} \quad (3.1)$$

Sendo que os vetores acima conservam os significados anteriormente descritos.

A partir do modelo representado pela expressão 3.1 tem-se que $\underline{z} \in R^m$, $\underline{x} \in R^n$ e $h : R^n \rightarrow R^m$ é uma função não linear e continuamente diferenciável. Como o número de medidas m é, em geral, maior que o número de variáveis de estado n , há mais equações que variáveis de estado a serem estimadas. Desta forma, a estimativa do vetor de variáveis de estado $\underline{x}$, pelo método WLS, é obtida através da minimização do índice (ou função) $J(\underline{x})$, dado por:

$$J(\underline{x}) = (\underline{z} - h(\underline{x}))^T \cdot R^{-1} \cdot (\underline{z} - h(\underline{x})) \quad (3.2)$$

Onde, R^{-1} é uma matriz simétrica e definida positiva (conforme apresentado no Capítulo 2, R é a matriz de covariância das medidas).

Geometricamente, a função $J(\underline{x})$ é uma norma no espaço vetorial das medidas R^m , que é induzida pelo produto interno $\langle \underline{u}, \underline{v} \rangle = \underline{u}^t \cdot R^{-1} \cdot \underline{v}$, ou seja:

$$\begin{aligned} J(\underline{x}) &= \|(\underline{z} - h(\underline{x}))\|_{R^{-1}}^2 = \langle \underline{z} - h(\underline{x}), \underline{z} - h(\underline{x}) \rangle \\ J(\underline{x}) &= (\underline{z} - h(\underline{x}))^t \cdot R^{-1} \cdot (\underline{z} - h(\underline{x})) \end{aligned} \quad (3.3)$$

Conforme apresentado no capítulo 2, sendo $\hat{\underline{x}}$ o vetor de variáveis de estado estimadas, isto é, a solução do problema de minimização acima, o vetor de medidas estimadas $\hat{\underline{z}}$ e o vetor dos resíduos são dados respectivamente pelas seguintes equações:

$$\begin{aligned} \hat{\underline{z}} &= h(\hat{\underline{x}}) \\ \underline{r} &= \underline{z} - \hat{\underline{z}} \end{aligned} \quad (3.4)$$

A linearização da equação 3.1 num certo ponto $\underline{x}^*$, resulta em:

$$\Delta \underline{z} = H \cdot \Delta \underline{x} + \underline{w} \quad (3.5)$$

Sendo $H = \frac{\partial h}{\partial \underline{x}}$ a matriz Jacobiana calculada em $\underline{x}^*$, $\Delta \underline{z} = \underline{z} - h(\underline{x}^*)$ o vetor de correção e $\Delta \underline{x} = \underline{x} - \underline{x}^*$.

Se o sistema representado pela equação 3.5 é observável ($\text{posto}(H) = n$), então o espaço vetorial das medidas R^m pode ser decomposto numa soma direta de dois subespaços vetoriais, isto é:

$$R^m = \Re(H) \oplus \Re(H)^\perp \quad (3.6)$$

Onde, $\Re(H)$ representa o subespaço vetorial de dimensão n em R^m , denominado imagem de H ; $\Re(H)^\perp$ representa o complemento ortogonal de $\Re(H)$, isto é, se $\underline{u} \in \Re(H)$ e $\underline{v} \in \Re(H)^\perp$, então $\langle \underline{u}, \underline{v} \rangle = \underline{u}^t \cdot R^{-1} \cdot \underline{v} = 0$

A equação 3.5 calculada em $\underline{x}$, que torna mínimo o índice $J(\underline{x})$, pode ser interpretada como uma projecção de vetor de correção $\Delta \underline{z}$ em $\Re(H)$. Assim, considere P como um operador linear, que projeta o vetor $\Delta \underline{z}$ em $\Re(H)$, ou seja:

$$\Delta \hat{\underline{z}} = P \cdot \Delta \underline{z} = H \cdot \Delta \hat{\underline{x}} \quad (3.7)$$

Desta forma, o vetor de resíduo $\underline{r}$, para o modelo linearizado, é dado por:

$$\underline{r} = \Delta \underline{z} - \Delta \hat{\underline{z}} = \Delta \underline{z} - H \cdot \Delta \hat{\underline{x}} \quad (3.8)$$

A partir desses dois vetores, o operador P , que torna mínima a norma de $J(\underline{x})$, é aquele que projeta $\Delta \underline{z}$ ortogonalmente em $\Re(H)$, em termos do produto interno $\langle \underline{u}, \underline{v} \rangle = \underline{u}^t \cdot R^{-1} \cdot \underline{v}$, isto é, o vetor $\Delta \hat{\underline{z}}$ é ortogonal ao vetor $\underline{r}$. Mais precisamente:

$$\begin{aligned} \langle \Delta \hat{\underline{z}}, \underline{r} \rangle &= \Delta \hat{\underline{z}}^t \cdot R^{-1} \cdot \underline{r} = 0 \\ \langle \Delta \hat{\underline{z}}, \underline{r} \rangle &= (H \cdot \Delta \hat{\underline{x}})^t \cdot R^{-1} \cdot (\Delta \underline{z} - H \cdot \Delta \hat{\underline{x}}) = 0 \end{aligned} \quad (3.9)$$

Resolvendo-se a equação 3.9 para $\Delta\hat{x}$, obtém-se:

$$\Delta\hat{x} = (H^t \cdot R^{-1} \cdot H)^{-1} \cdot H^t \cdot R^{-1} \cdot \Delta z \quad (3.10)$$

Como $\Delta\hat{z} = P \cdot \Delta z = H \cdot \Delta\hat{x}$, a matriz projeção P é:

$$P = H \cdot (H^t \cdot R^{-1} \cdot H)^{-1} \cdot H^t \cdot R^{-1} \quad (3.11)$$

Conforme apresentado no capítulo 2, na literatura concernente à estimação de estado em SEP, essa matriz é usualmente chamada de matriz "chapéu", representada pela letra K . Ante o exposto, a matriz de projeção P será representada pela letra K . Ademais todas as propriedades da matriz K , apresentadas no capítulo 2 são preservadas.

Caso a matriz de ponderação R^{-1} seja dada por $R^{-1} = c \cdot I$, sendo c um número real positivo e I a matriz identidade de ordem $m \times m$, então $K = K^t$ e K será uma projeção ortogonal.

A figura 3.1 ilustra o operador K atuando sobre o vetor Δz .

Figura 3.1: Interpretação geométrica do operador K , atuando sobre o vetor Δz , para $m = 3$ e $n = 2$.

Fonte:(BENEDITO, 2011)

O vetor resíduo pode ser calculado, em termos da matriz de projeção K , através da seguinte expressão:

$$\begin{aligned} \underline{r} &= \Delta z - \Delta\hat{z} = \Delta z - K \cdot \Delta z \\ \underline{r} &= (I - K) \cdot \Delta z = S \cdot \Delta z \end{aligned} \quad (3.12)$$

Onde a matriz $(I - K)$, ou matriz de sensibilidade dos resíduos S , é um operador que projeta Δz em $\mathfrak{R}(H)^\perp$.

Como conclusões importantes desta seção, temos:

- i) A matriz de projeção K projeta Δz em $\mathfrak{R}(H)$ ($\Delta\hat{z} = K \cdot \Delta z$)
- ii) A matriz de sensibilidade S projeta Δz em $\mathfrak{R}(H)^\perp$ ($\underline{r} = S \cdot \Delta z$)

3.3 Decomposição do vetor de erro na medida

A partir da decomposição do espaço vetorial das medidas em uma soma direta de $\Re(H)$ e $\Re(H)^\perp$, o vetor de erro das medidas ($\underline{w}$) será decomposto em duas componentes: a primeira definida como detectável e outra como não-detectável.

Para fazer isso, considere que $\underline{x}_v$ seja o vetor de variáveis de estado verdadeiro, o qual é desconhecido em situações práticas. Logo, $\underline{z}_v = h(\underline{x}_v)$ será correspondente ao valor real do vetor de medidas. Considerando o modelo linearizado, $\Delta \underline{x}_v = \underline{x}_v - \hat{x}$ e $\Delta \underline{z}_v = H \cdot \Delta \underline{x}_v$, e assumindo que a matriz Jacobiana disponível H é parecida com a obtida com medidas sem erros grosseiros, então $\underline{z}_v$ é próximo do $\Re(H)$ e $\Delta \underline{z}_v \approx \underline{z}_v - \hat{z}$.

O vetor de erros das medidas é dado por:

$$\underline{w} = \underline{z} - \underline{z}_v \approx \Delta \underline{z} - \Delta \underline{z}_v \quad (3.13)$$

E pode ser decomposto em:

$$\underline{w} = K \cdot \underline{w} + (I - K) \cdot \underline{w} \quad (3.14)$$

Denominando $\underline{w}_U$ e $\underline{w}_D$, respectivamente, as componentes indetectável e detectável de $\underline{w}$, temos:

$$\begin{aligned} \underline{w}_U &= K \cdot \underline{w} \\ \underline{w}_D &= (I - K) \cdot \underline{w} \end{aligned} \quad (3.15)$$

De acordo com essas equações verifica-se que $\underline{w}_U \in \Re(H)$ e $\underline{w}_D \in \Re(H)^\perp$. Consequentemente:

$$\|\underline{w}\|_{R^{-1}}^2 = \|\underline{w}_U\|_{R^{-1}}^2 + \|\underline{w}_D\|_{R^{-1}}^2 \quad (3.16)$$

Reescrevendo a equação 3.12 em termos dessas componentes do vetor $\underline{w}$ é possível escrever o vetor de resíduo ($\underline{r}$) da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \underline{r} &= (I - K)\Delta \underline{z} \\ \underline{r} &\cong (I - K)\Delta \underline{z}_v + (I - K)\underline{w}_U + (I - K)\underline{w}_D \end{aligned} \quad (3.17)$$

Já que $\Delta \underline{z} \in \Re(H)$ e $\underline{w}_U \in \Re(H)$, $(I - K)\Delta \underline{z}_v = 0$ e $(I - K)\Delta \underline{w}_U = 0$. Consequentemente, a equação 3.17 se torna:

$$\underline{r} = (I - K)\Delta \underline{z} \cong (I - K)\underline{w}_D \cong \underline{w}_D \quad (3.18)$$

A equação 3.18 demonstra uma propriedade dos resíduos já conhecida, isto é, que o vetor de resíduo é igual a componente detectável ($\underline{w}_D$) do vetor de erros. Em outras palavras, o vetor de resíduos do estimador WLS não é afetado pela componente não detectável ($\underline{w}_U$) do vetor de erro das medidas.

A equação 3.18 indica, também, que a dificuldade, ou mesmo a impossibilidade de detectar erros em algumas medidas, através da análise dos resíduos do estimador WLS,

ocorre em razão de a componente não-detectável do erro dessa medida ser mais significativa que a componente detectável. Dessa forma, os resíduos dessas medidas serão pequenos, mesmo quando o valor do erro for elevado, isto é, mesmo quando a medida for portadora de EG. Isso justifica o fato de o teste dos resíduos normalizados falhar em determinadas situações de EGs simples em medidas redundantes.

Pode-se afirmar então que valores baixos de resíduos normalizados não implicam necessariamente em valores baixos de erros em medidas, tendo em vista a existência das componentes não-detectáveis. Quando os valores dos resíduos normalizados não forem maiores que o limiar de detecção, permite-se-nos afirmar apenas, com certo grau de confiança, que somente os valores das componentes detectáveis dos erros em todas as medidas são pequenos. Por isso, torna-se essencial a verificação da componente não-detectável dos erros de medidas, para obtenção de um processamento de EG mais eficiente. O índice UI foi proposto para possibilitar a obtenção dessa componente.

3.4 Índice de Não-Detecção de EGs (UI)

O índice UI foi proposto a partir das componentes detectáveis e não detectáveis do vetor de erro das medidas (BENEDITO, 2011). Suponha então a existência de um único erro simples de magnitude b na i -ésima medida, ou seja:

$$\underline{w}^i = b \cdot \underline{\delta}^i \quad (3.19)$$

Onde $\underline{\delta}^i = [0, \dots, 0, \overset{i}{1}, 0, \dots, 0]^t$. Assim pela equação 3.15 obtemos:

$$\begin{aligned} \underline{w}_U^i &= K \cdot \underline{w}^i \\ \underline{w}_D^i &= (I - K) \cdot \underline{w}^i \end{aligned} \quad (3.20)$$

Fazendo uso dessas componentes define-se como índice UI , para a i -ésima medida, como sendo (BENEDITO et al., 2013):

$$UI_i = \frac{\|\underline{w}_U^i\|_{R^{-1}}}{\|\underline{w}_D^i\|_{R^{-1}}} = \frac{\sqrt{(\underline{w}_U^i)^t \cdot R^{-1} \cdot (\underline{w}_U^i)}}{\sqrt{(\underline{w}_D^i)^t \cdot R^{-1} \cdot (\underline{w}_D^i)}} \quad (3.21)$$

Em Benedito (2011) foi demonstrado que o numerador e denominador da equação 3.21 pode ser simplificado, respectivamente, como:

$$\begin{aligned} \|\underline{w}_U^i\|_{R^{-1}} &= b \cdot \sigma_i^{-1} \cdot \sqrt{K_{ii}} \\ \|\underline{w}_D^i\|_{R^{-1}} &= b \cdot \sigma_i^{-1} \cdot \sqrt{(1 - K_{ii})} \end{aligned} \quad (3.22)$$

Consequentemente, temos:

$$\begin{aligned} UI_i &= \frac{b \cdot \sigma_i^{-1} \cdot \sqrt{K_{ii}}}{b \cdot \sigma_i^{-1} \cdot \sqrt{(1 - K_{ii})}} \\ UI_i &= \frac{\sqrt{K_{ii}}}{\sqrt{(1 - K_{ii})}} \end{aligned} \quad (3.23)$$

Note que o UI não depende da magnitude do erro b , mas sim dos elementos da diagonal principal das matrizes K e $S(S = I - K)$, que, por sua vez, dependem: dos valores dos parâmetros do sistema; da redundância local e ponderação das medidas; e do valor das medidas.

Entretanto, através da realização de diversas simulações computacionais, em Benedito (2011) verificou-se que o índice UI varia muito pouco com alterações nos valores das medidas. Dessa forma, pode-se concluir que os fatores que mais influenciam, no valor do índice UI de medidas redundantes, são: os valores dos parâmetros do sistema e a ponderação e redundância local das medidas.

No capítulo 5 desta dissertação será explorado com maiores detalhes a influência das ponderações das medidas no índice UI .

A medida com um valor grande de UI indica que uma grande parcela do seu erro será *maskarada* no processo de estimação de estado WLS. Consequentemente, esse erro vai contribuir pouco para o valor do resíduo daquela medida. Em particular, se $\underline{w}^i \in \Re(H)$, então $\underline{w}_D^i = 0$ e o correspondente UI tende ao infinito ($UI_i \rightarrow \infty$). Essa situação mostra que o UI para uma medida crítica é infinito, isto é, não tem componente detectável (resíduo é nulo), uma vez que essa medida pertence ao $\Re(H)$.

Geometricamente, o UI de uma medida mostra a sua posição em relação à $\Re(H)$ (imagem da matriz Jacobiana). Isso é ilustrado na figura 3.2 para um sistema com duas medidas e uma variável a ser estimada ($m = 2$ e $N = 1$).

Figura 3.2: Interpretação geométrica considerando dois erros distintos em z_1

Fonte:(BENEDITO, 2011)

Na figura 3.2 foram considerados dois erros distintos para medida z_1 , o primeiro com magnitude w' (azul) e o segundo com magnitude w'' (vermelho). Note que o UI de z_1 será o mesmo, independente da magnitude do erro, porque as componentes w_U e w_D aumentam proporcionalmente com a magnitude do erro (conforme esperado pelas análises previamente realizadas). Considerando a equação 3.21 e a figura 3.2, podemos ainda

concluir que o UI de uma medida em particular é igual a cotangente do ângulo α entre o eixo da medida e a imagem da matriz Jacobiana $\Re(H)$.

Essa visão geométrica das componentes do vetor de erros possibilita uma compreensão ampla e simples do problema de detecção/identificação de EGs.

Vale destacar que as diversas simulações computacionais apresentadas em Benedito et al. (2013) confirmaram que os valores dos resíduos normalizados de medidas portadoras de EGs, com índice UI de valor baixo, são próximos ao valor da magnitude do erro aplicado em desvio padrão. Em contrapartida, quanto maior o índice UI , menor será o resíduo normalizado da medida portadora de EG e também o índice $J(\hat{x})$ do conjunto em análise.

Para deixar mais evidente a diferença entre medidas com alto e baixo UI , consideremos o sistema de duas barras apresentado na figura 3.3, contendo duas medidas e uma variável a ser estimada (estimador WLS linear).

Figura 3.3: Sistema de duas barras e duas linhas

Fonte:(BENEDITO, 2011)

Consideremos ainda que os parâmetros e a ponderação das duas medidas de fluxo, apresentadas na figura 3.3, sejam tais que tornem a medida $z1$ uma medida com alto UI e a medida $z2$ uma medida com baixo UI . Destarte, se a medida $z1$ for portadora de EG, esse erro vai ser de difícil detecção, pois o resíduo de tal medida será baixo, ver figura 3.4.

Figura 3.4: Exemplo de erro grosseiro em medida com alto UI

Fonte:(BENEDITO, 2011)

A explicação para isso é que a componente detectável do erro dessa medida é muito baixa, ou, em outras palavras, a medida $z1$ apresenta um UI muito alto. Por outro lado, se a medida $z2$ for portadora de EG, tendo em vista que a componente detectável do erro

dessa medida é superior à componente não-detectável, pois a medida z_2 apresenta baixo UI , a mesma vai apresentar um resíduo elevado, tornando mais fácil a detecção de EG, através da análise dos resíduos, conforme ilustrado na figura 3.5.

Figura 3.5: Exemplo de erro grosseiro em medida com baixo UI

Fonte:(BENEDITO, 2011)

O algoritmo para Cálculo do Índice UI está descrito abaixo:

Utilizando o estimador WLS convencional, faça:

Passo 1: Determine o valor estimado das variáveis de estado ($\hat{x}$) através da solução iterativa da equação normal.

Passo 2: Calcule as matrizes K e $(I - K)$ para $\hat{x}$, ou apenas os elementos da diagonal principal dessas matrizes;

Passo 3: Para cada medida i , calcule o índice UI diretamente pela equação 3.23, isto é:

$$UI_i = \frac{\sqrt{K_{ii}}}{\sqrt{(1-K_{ii})}} \quad (3.24)$$

3.5 Utilização do Índice UI para Estimação dos erros das medidas

Como foi visto na seção anterior o resíduo de uma medida corresponde apenas à componente detectável do erro da mesma e o índice UI de uma medida corresponde à relação entre a componente não-detectável e detectável do seu erro. Dessa forma, o índice UI pode ser utilizado para estimar a componente não-detectável do erro de uma medida, utilizando o resíduo da medida (componente detectável), obtido através do estimador WLS, conforme proposto em Benedito et al. (2013).

Como as duas componentes do vetor de erros são ortogonais entre si, e com a definição do índice UI (3.21), torna-se possível obtermos o erro composto para cada medida i , da

seguinte maneira:

$$\begin{aligned}
\overline{ec}_i^2 &= \|\underline{w}_{Ui}\|_{R^{-1}}^2 + \|\underline{w}_{Di}\|_{R^{-1}}^2 \\
\overline{ec}_i &= \sqrt{\|\underline{w}_{Ui}\|_{R^{-1}}^2 + \|\underline{w}_{Di}\|_{R^{-1}}^2} \\
\overline{ec}_i &= \sqrt{(UI_i \cdot \|\underline{w}_{Di}\|_{R^{-1}})^2 + \|\underline{w}_{Di}\|_{R^{-1}}^2} \\
\overline{ec}_i &= \sqrt{(UI_i \cdot \underline{r}_i)^2 + \underline{r}_i^2} \\
\overline{ec}_i &= \sqrt{(UI_i^2 + 1) \cdot \underline{r}_i^2} \\
\overline{ec}_i &= \underline{r}_i \cdot \sqrt{(UI_i^2 + 1)}
\end{aligned} \tag{3.25}$$

A consideração feita agora é que uma única medida (i -ésima) tenha erro grosseiro e as demais sejam isentas de qualquer erro ou ruído, isto é:

$$\underline{z}^{erro} = \underline{z} + \underline{w}^{erro} \tag{3.26}$$

Com $\underline{w}^{erro} = b \cdot \sigma_i \cdot [0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0]^t$, podemos calcular o valor esperado do erro composto $E\{\overline{ec}_i\}$, através do seguinte desenvolvimento:

$$\begin{aligned}
E\{\overline{ec}_i\} &= E\{\underline{r}_i \cdot \sqrt{(UI_i^2 + 1)}\} = \sqrt{(UI_i^2 + 1)} \cdot E\{\underline{r}_i\} \\
E\{\overline{ec}_i\} &= \sqrt{(UI_i^2 + 1)} \cdot E\{\underline{w}_i^{erro} \cdot S_{ii}\} \\
E\{\overline{ec}_i\} &= \sqrt{(UI_i^2 + 1)} \cdot b \cdot \sigma_i \cdot S_{ii}
\end{aligned} \tag{3.27}$$

Como $\sqrt{(UI_i^2 + 1)}$ pode ser simplificada por:

$$\begin{aligned}
\sqrt{(UI_i^2 + 1)} &= \sqrt{\frac{K_{ii}}{(1-K_{ii})} + 1} = \sqrt{\frac{K_{ii}+1-K_{ii}}{(1-K_{ii})}} \\
\sqrt{(UI_i^2 + 1)} &= \sqrt{\frac{1}{(1-K_{ii})}} = \sqrt{\frac{R_{ii}}{\Omega_{ii}}} = \frac{\sigma_i}{\sqrt{\Omega_{ii}}}
\end{aligned} \tag{3.28}$$

Finalmente temos:

$$\begin{aligned}
E\{\overline{ec}_i\} &= \frac{\sigma_i}{\sqrt{\Omega_{ii}}} \cdot b \cdot \sigma_i \cdot S_{ii} = \frac{b \cdot R_{ii} \cdot S_{ii}}{\sqrt{\Omega_{ii}}} \\
E\{\overline{ec}_i\} &= \frac{b \cdot \Omega_i}{\sqrt{\Omega_{ii}}} = b \cdot \sqrt{\Omega_{ii}}
\end{aligned} \tag{3.29}$$

Com base na equação 3.29, torna-se possível obter o erro composto em desvio padrão para cada medida $i(e_{\sigma_i})$, da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
e_{\sigma_i} &= \frac{\overline{ec}_i}{\sqrt{\Omega_{ii}}} = \frac{\underline{r}_i \cdot \sqrt{(UI_i^2 + 1)}}{\sqrt{\Omega_{ii}}} \\
e_{\sigma_i} &= \underline{r}_i^N \cdot \sqrt{(UI_i^2 + 1)}
\end{aligned} \tag{3.30}$$

Onde $\underline{r}_i^N$ é o resíduo normalizado da medida i .

Através dos resultados mostrados no decorrer desse texto pode-se verificar que o valor esperado do erro composto, em desvio padrão $E\{\overline{ec}_i\}$ para a medida i , portadora de erro grosseiro, torna-se:

$$\begin{aligned}
E\{\overline{ec}_i\} &= E\{\underline{r}_i^N \cdot \sqrt{(UI_i^2 + 1)}\} = E\{\frac{\underline{r}_i}{\sqrt{\Omega_{ii}}} \cdot \sqrt{(UI_i^2 + 1)}\} \\
E\{\overline{ec}_i\} &= E\{\frac{\overline{ec}_i}{\sqrt{\Omega_{ii}}}\} = \frac{1}{\sqrt{\Omega_{ii}}} \cdot E\{\overline{ec}_i\} \\
E\{\overline{ec}_i\} &= \frac{1}{\sqrt{\Omega_{ii}}} \cdot b \cdot \sqrt{\Omega_{ii}} = b
\end{aligned} \tag{3.31}$$

Logo, com o erro composto em desvio padrão (e_{σ_i}), torna-se possível estimar o erro da medida errada ($\hat{w}_i$), através da seguinte equação:

$$\hat{w}_i = e_{\sigma_i} \cdot \sigma_i \quad (3.32)$$

A partir da estimativa do erro é possível calcular o valor da medida (valor corrigido):

$$z_i^{corrigido} = z_i^{erro} - \hat{w}_i = z_i^{erro} - e_{\sigma_i} \cdot \sigma_i \quad (3.33)$$

Com relação ao que foi mostrado acima podemos perceber que através do índice *UI* é possível aumentar a eficiência no processamento de EGs.

Conforme mostrado neste capítulo, medidas de alto valor de *UI* podem apresentar erros mesmo quando o seu resíduo normalizado é pequeno, em casos assim o teste do maior resíduo normalizado falha.

Em Monticelli e Garcia (1983), Abur e Exposito (2004) foi mostrado que, quando apenas uma das medidas é portadora de EG (erro grosseiro simples), e as demais são medidas perfeitas (sem ruído), a medida portadora de EG vai apresentar o maior resíduo normalizado em módulo. Quando isso ocorre em uma medida com alto índice *UI* seu resíduo também será o mais alto, mas provavelmente menor que o limiar do teste de maior resíduo normalizado, pois a componente não detectável do erro é bem maior que a parte detectável, mascarando o EG. Nessas situações deve-se comparar o limiar de detecção de EGs com o valor do erro composto em desvio padrão, isto em razão de o erro composto contemplar as duas componentes do erro. Se o erro composto em desvio padrão for maior que o limiar ele poderá ser utilizado para corrigir o valor da medida, logo não é preciso eliminar a medida portadora de erro grosseiro, assim como proposto em Monticelli e Garcia (1983) (teste- $\hat{b}$).

Por outro lado, se o índice *UI* da medida portadora de EG for pequeno, a componente detectável do erro será maior. Nesse caso, provavelmente o teste do resíduo normalizado funcionará de forma adequada, tanto para detectar quanto para identificar a medida com EG, e a contribuição do índice *UI* seria para correção do valor da medida.

Com base nas informações supracitadas, em Benedito (2011) foi desenvolvido um algoritmo que possibilita detecção, identificação e correção de medidas portadoras de EGs simples. O algoritmo para a detecção e identificação de erros grosseiros simples utilizando o erro composto por desvio padrão é explicado a seguir:

Após a execução do estimador WLS faça:

Passo 1: Determine o valor estimado das variáveis de estado ($\hat{x}$), através da solução iterativa da equação normal;

Passo 2: Calcule as matrizes K e $(I - K)$ considerando $\hat{x}$, ou calcule apenas os elementos da diagonal principal dessas matrizes;

Passo 3: Calcule o resíduo normalizado r_i^N para cada medida i e o índice UI. isto é:

$$r_i^N = \frac{r_i}{\sqrt{\Omega_{ii}}} \quad (3.34)$$

$$UI_i = \frac{\sqrt{K_{ii}}}{\sqrt{(1 - K_{ii})}} \quad (3.35)$$

Passo 4: Através dos resíduos normalizados e dos índices UI_i , calcule o erro composto e_{σ_i} para cada medida i , utilizando a equação:

$$\underline{e}_{\sigma_i} = \underline{r}_i^N \cdot \sqrt{(UI_i^2 + 1)} \quad (3.36)$$

Passo 5: Para medida com o maior resíduo normalizado em módulo, verifique se o módulo de seu erro composto em desvio padrão é maior que o certo limiar de detecção pré-estabelecido c (pode ser o mesmo limiar que o teste dos resíduos normalizados), ou seja:

- Se $e_{\sigma_i} > c$, esta medida i apresenta EG; vá para o passo 6
- Se $e_{\sigma_i} \leq c$, a medida i não tem EG; fim.

Passo 6: Corrija a medida i identificada como portadora de EG da seguinte forma:

$$\underline{z}_i^{corrigido} = \underline{z}_i - \underline{e}_{\sigma_i} \cdot \underline{\sigma}_i; \quad (3.37)$$

Observe que para o cálculo do $\underline{z}_i^{corrigido}$ (equação supracitada), o sinal (positivo ou negativo) do $\underline{e}_{\sigma_i}$ deve ser levado em conta, e não apenas sua magnitude.

As diversas simulações realizadas em (BENEDITO, 2011) comprovaram que o algoritmo funciona muito bem, detectando, identificando e corrigindo os EGs simples de forma correta para todos os casos que foram analisados, mesmo para medidas com UI de alto valor. Mas isso aconteceu apenas para os testes realizados sem adicionar ruídos gaussianos às medidas. Ou seja, com exceção da medida com EG, todas as demais foram simuladas sem acrescentar ruído algum. Porém, quando foram considerados ruídos gaussianos, o algoritmo apresentou problemas quando EGs simples eram atribuídos para medidas com elevado índice UI .

3.6 Comparação entre o e_σ e o teste- $\hat{b}$

Através de uma análise comparativa entre a equação do $\hat{b}_i$ (equação 2.39) e a equação do erro composto em desvio e_{σ_i} (equação 3.30), verifica-se serem as mesmas iguais, ou seja:

$$\begin{aligned} \underline{e}_{\sigma_i} &= \underline{r}_i^N \cdot \sqrt{(UI_i^2 + 1)} = \underline{r}_i^N \cdot \sqrt{\frac{K_{ii}}{(1-K_{ii})} + 1} \\ \underline{e}_{\sigma_i} &= \underline{r}_i^N \cdot \sqrt{\frac{K_{ii}+1-K_{ii}}{(1-K_{ii})}} = \underline{r}_i^N \cdot \sqrt{\frac{1}{(1-K_{ii})}} \\ \underline{e}_{\sigma_i} &= \underline{r}_i^N \cdot \sqrt{\frac{R_{ii}}{\Omega_{ii}}} = \frac{\underline{r}_i^N \cdot \sigma_i}{\sqrt{\Omega_{ii}}} = \hat{b}_i \end{aligned} \quad (3.38)$$

Face ao exposto, verifica-se também que aplicando o algoritmo proposto em Benedito et al. (2013), baseado na análise do erro composto obtido através do índice UI , e aquele proposto em Monticelli e Garcia (1983) com base no teste- $\hat{b}$, os resultados obtidos são exatamente os mesmos. Entretanto, considerando que o caminho percorrido para obtenção

do $\hat{b}$ e do erro composto são distintos, a igualdade das equações dos mesmos serve apenas para validá-los, ou melhor, para validar o erro composto, uma vez que o teste- $\hat{b}$ já vem sendo utilizado há alguns anos, para melhoria da análise de EGs. Lembremo-nos ainda de que, em Monticelli e Garcia (1983), a ideia era determinar um valor para medida suspeita de EG que iria zerar o resíduo da mesma no processo de estimação de estado.

Dessa forma, o algoritmo proposto para processamento de EG através da análise do erro composto não apresentou uma contribuição inovadora para área de estimação de estado, tendo em vista que o teste- $\hat{b}$ já tinha sido desenvolvido. Porém, lembrando que o índice *UI* possibilita a classificação das medidas de acordo com suas características de não refletirem grande parcela de seus erros, nos resíduos do estimador WLS, informação que não é obtida através do teste- $\hat{b}$, outras aplicações foram vislumbradas para o índice *UI*, algumas apresentadas e analisadas em Benedito et al. (2013) e outras propostas nesta dissertação. Além disso, através do índice *UI* é possível entender a causa da falha, tanto do algoritmo proposto em Benedito et al. (2013), baseado na análise do erro composto, quanto do teste- $\hat{b}$, para tratamento de EGs simples em condições reais, ou seja, quando são considerados os ruídos das medidas inerentes do processo de medição, pois no mundo real as medidas não são perfeitas.

3.7 Considerações Finais

Com base nos trabalhos apresentados em (BENEDITO, 2011; BENEDITO et al., 2013), neste capítulo foi apresentado todo o embasamento teórico do índice *UI*, que foi desenvolvido a partir de uma análise geométrica do estimador de estado WLS.

Conforme apresentado, o índice *UI* permite qualificar as medidas, de um SEP, de acordo com as suas características de não refletirem grande parcela de seus erros nos resíduos do estimador WLS.

Analisando o estimador de estado WLS através de projeções ortogonais, verifica-se que grande parcela dos erros em medidas que apresentam índices *UI* elevados, isto é, medidas que estão próximas da imagem da matriz Jacobiana, não aparece nos seus resíduos. Isto é, tais erros são, de certa forma, mascarados.

Dentre as informações apresentadas neste capítulo vale lembrar que os índices *UIs* das medidas dependem principalmente dos valores dos parâmetros do sistema elétrico e da ponderação e redundância local das medidas.

Apresentou-se, ainda, uma das aplicações já propostas para o índice *UI*, o processamento de EGs, tendo em vista ser possível obter-se uma estimativa para os erros das medidas através do índice *UI*. Porém, conforme apresentado anteriormente, o procedimento proposto para detecção, identificação e correção de medidas com EGs falha em determinadas situações.

Análise do Índice UI para medidas SCADA

4.1 Introdução

Nesse capítulo serão apresentadas diversas simulações computacionais para validação dos aspectos teóricos apresentados no capítulo 3. Para isso foram implementados diversos algoritmos para processamento de erros grosseiros, que fazem uso dos resíduos do estimador de estado WLS, e foram considerados, para simulação, os sistemas de 14 e 30 barras do IEEE.

Destacar-se-ão simulações onde o teste do maior resíduo normalizado falha em medidas com altos índices UIs , ressaltando a importância desse parâmetro para estimação de estado. Alguns casos onde o teste do $\hat{b}$ falha, em medidas com alto índice UI , serão também ilustrados. Para finalizar o capítulo será analisado o efeito, na precisão das estimativas, de EGs em medidas de baixo e alto índice UI .

Para a realização das simulações computacionais foram gerados vários cenários de medidas, com e sem ruído Gaussiano e também com medidas portadoras de EGs simples. Para isso foi desenvolvido um programa computacional, para geração de medidas com ruído, que será apresentado na próxima seção.

Neste capítulo não será realizado um estudo detalhado do efeito da ponderação das medidas no índice UI . Ou seja, as simulações que serão apresentadas consideram apenas um tipo específico de procedimento para ponderação, que será apresentado na sequência. Estudos referentes a esse assunto serão tratados no capítulo 5. Outra particularidade deste capítulo é que as simulações que serão aqui discutidas consideram apenas medidas SCADA. Simulações com sistemas híbridos (SCADA e PMU) serão apresentadas no capítulo 6, após a extensão da visão geométrica dos resíduos do estimador de estado WLS para sistemas de medição híbridos.

4.2 Preparação de Dados

Os valores de referência (que serão considerados como valores verdadeiros das medidas) foram definidos através dos resultados obtidos por um programa de análise de fluxo de carga (ANAREDE). Os valores dos parâmetros, bem como outras informações pertinentes à execução do fluxo de carga, para os sistemas de 14 e 30 barras do IEEE, estão disponíveis no endereço eletrônico “www.ee.washington.edu/research/pstca/”.

Nesse trabalho será utilizada a seguinte nomenclatura para as medidas:

FA:a-b - medida de fluxo de potência ativa da barra “a” para a barra “b”;

FR:a-b - medida de fluxo de potência reativa da barra “a” para a barra “b”;

IA:a - medida de injeção potência ativa na barra “a”;

IR:a - medida de injeção potência reativa na barra “a”;

V:a - Medida de magnitude de tensão na barra “a”;

Os valores dos desvios padrões utilizados para essas simulações foram calculados utilizando a equação 4.1.

$$\sigma_i = \frac{|z_i^{fc}| \cdot pr}{3} \quad (4.1)$$

Sendo pr a precisão do medidor. O valor considerado para essa precisão depende da classificação da medida. Para medidas SCADA o desvio padrão foi calculado utilizando um valor de precisão de 2%. Medidas com valor NULO são medidas virtuais, e por isso seus respectivos valores de desvio padrão não foram calculados. Para execução do estimador WLS atribuiu-se, para as medidas virtuais, a maior ponderação existente dentre todas as medidas desse sistema.

Para emular valores reais de medidas, isto é, medidas com ruído, desenvolveu-se e implementou-se um algoritmo que adiciona ruídos gaussianos de média zero e desvio padrão calculado pela equação supracitada aos valores de referência (valores obtidos através do fluxo de carga). A seguir apresentam-se os passos desse algoritmo, que possibilita a determinação do valor de cada uma das medidas utilizadas no teste.

Passo 1: Obtenha o valor de referência da medida i a partir da solução do problema de fluxo de carga utilizando o programa ANAREDE;

Passo 2: Calcule o desvio padrão da medida i utilizando a equação 4.1:

Passo 3: Sorteie um número aleatório ($N_i^{aleatório}$), com uma distribuição gaussiana de média zero e desvio padrão calculado no passo 2;

Passo 4: Se o valor encontrado é menor ou igual em módulo que 2,5 vezes o desvio padrão calculado no passo 2, vá para o próximo passo. Caso contrário, volte para o passo 3.

Passo 5: Adicione o valor de $N_i^{aleatório}$ encontrado ao valor de referência da medida i (Z_i^{fc}) calculado pelo fluxo de carga, da seguinte forma:

$$Z_i^{ruído} = Z_i^{fc} + N_i^{aleatório} \quad (4.2)$$

A partir desse algoritmo é possível obter diversas amostras de medidas para sistemas de medição convencionais (formado unicamente por medidas SCADA) e híbridos (capítulo 6) com ruídos gaussianos.

4.3 Processamento de Erros Grosseiros em medidas SCADA

Nessa sessão foram feitas simulações utilizando planos de medição com um EG simples (em apenas uma medida), com valores de erros de $10 \cdot \sigma$ e de $20 \cdot \sigma$ da medida. A escolha da medida para simular como portadora de EG foi realizada com base no valor do índice UI . Foram escolhidas então medidas com alto e baixo índice UI . Lembrando que o índice UI é a razão entre a componente não-detectável do erro sobre a componente detectável do erro (BENEDITO, 2011). Dessa forma, se o índice UI de uma medida for maior que 1, isso indica que a parcela não-detectável do erro é maior que a parcela detectável. Ou seja, a maior parcela do erro dessa medida não aparece no resíduo (é mascarado). Dessa maneira, são considerados como altos índices UI s aqueles que são maiores que 1 e índices UI s baixos aqueles que são menores que 1.

Foram testados vários métodos de processamento de EGs, o teste do maior resíduo normalizado, o teste índice $J(x)$, o teste do $\hat{b}$, o cálculo do índice UI e o teste do erro composto em desvio padrão.

Realizou-se uma análise da falha dos métodos de processamento de EGs baseados nos resíduos do estimador WLS com o índice UI . Isso com o objetivo de entender o comportamento desses métodos vislumbrando a possibilidade de melhorar o processamento de EGs.

Para o sistema com apenas medidas SCADA de 14 barras, o limiar de detecção de EGs para o índice $J(x)$ é $\lambda = \chi_{43;(1-0,05)} \cong 58$, considerando uma probabilidade de falso alarme $\alpha = 5\%$ e o grau de liberdade $m - n = 43$ (MONTICELLI; GARCIA, 1983). Simulações utilizando o teste do índice $J(x)$ não foram feitas para o sistema de 30 barras.

Já o limiar de detecção de EGs adotado para os sistemas de 14 e 30 barras, para o teste do maior resíduo normalizado, é $\beta = 3$ (ABUR; EXPOSITO, 2004).

Para o teste do $\hat{b}$ e do e^σ foi utilizado um limiar de detecção de erros grosseiros igual a $c = 4$, para todos os casos simulados (MONTICELLI; GARCIA, 1983).

Observe que não é necessário calcular o índice UI para medidas virtuais, uma vez que essas medidas não estão sujeitas a erros.

4.3.1 Simulações sem ruído gaussiano

4.3.1.1 Alto UI

O primeiro teste contendo apenas medidas SCADA sem ruídos foi feito adicionando um erro grosseiro de 10 vezes o valor do desvio padrão ($10 \cdot \sigma$) na medida de injeção de potência ativa na barra 5 (IA5). Essa medida tem a característica de possuir um valor de UI muito elevado, igual a 11,3976.

Para esse caso podemos ver, na tabela 4.1, que o teste de maior resíduo normalizado e do índice $J(x)$ falham para a detecção do erro grosseiro, pois os parâmetros calculados para essas medidas são menores que os limiares citados na seção 4.3.

Já o teste do $\hat{b}$ e do e_σ iriam detectar o erro grosseiro nessa medida, pois além de ela apresentar o maior resíduo normalizado em módulo, os valores calculados para $\hat{b}$ e e_σ estão acima do limiar utilizado nesses testes. É importante também observar que o valor do $\hat{b}$ e do e_σ são iguais, como foi mostrado na seção 3.6, e são bastante próximos ao valor de erro grosseiro em desvio padrão simulado neste teste.

Tabela 4.1: Medidas SCADA - IEEE 14 barras sem ruídos e erro grosseiro de $10 \cdot \sigma$ na medida IA:5

Medidas SCADA									
Índice $J(x)=0,764357$									
Medidas de Potência Ativa					Medida de Potência Reativa				
Medida	UI :	r^N :	e_σ :	$\hat{b}$:	Medida	UI :	r^N :	e_σ :	$\hat{b}$:
FA:1-2	0,289	0,178	0,185	0,185	FR:1-2	0,581	-0,099	-0,114	-0,114
FA:2-3	0,243	0,056	0,058	0,058	FR:2-3	2,221	0,036	0,088	0,088
FA:3-4	1,276	0,145	0,235	0,235	FR:3-4	2,133	0,093	0,219	0,219
FA:4-2	0,321	-0,121	-0,128	-0,128	FR:4-2	1,180	-0,165	-0,256	-0,256
FA:4-5	0,488	0,643	0,716	0,716	FR:4-5	0,361	-0,094	-0,100	-0,100
FA:5-2	0,291	-0,379	-0,395	-0,395	FR:5-2	1,116	0,281	0,421	0,421
FA:5-6	0,333	-0,155	-0,164	-0,164	FR:5-6	0,451	-0,082	-0,090	-0,090
FA:6-5	0,333	0,155	0,164	0,164	FR:6-5	0,904	-0,123	-0,166	-0,166
FA:6-11	0,899	-0,019	-0,026	-0,026	FR:6-11	0,837	-0,023	-0,030	-0,030
FA:6-12	0,605	-0,004	-0,005	-0,005	FR:6-12	0,831	0,000	-0,001	-0,001
FA:6-13	0,454	-0,002	-0,002	-0,002	FR:6-13	0,430	-0,005	-0,006	-0,006
FA:7-4	0,420	-0,010	-0,011	-0,011	FR:7-4	0,424	0,028	0,031	0,031
FA:7-8	-	0,000	0,000	0,000	FR:7-8	0,417	0,007	0,008	0,008
FA:7-9	0,420	0,009	0,009	0,009	FR:7-9	1,215	-0,055	-0,087	-0,087
FA:8-7	-	0,000	0,000	0,000	FR:8-7	0,428	-0,010	-0,011	-0,011
FA:9-4	0,420	-0,011	-0,011	-0,011	FR:9-4	1,573	-0,073	-0,135	-0,135
FA:9-10	0,979	0,006	0,009	0,009	FR:9-10	0,925	0,031	0,042	0,042
FA:9-14	0,756	0,009	0,012	0,012	FR:9-14	0,725	0,019	0,024	0,024
FA:10-9	0,973	-0,005	-0,007	-0,007	FR:10-9	0,926	-0,032	-0,043	-0,043
FA:10-11	4,246	0,053	0,232	0,232	FR:10-11	3,864	0,058	0,231	0,231
FA:11-6	0,893	0,017	0,023	0,023	FR:11-6	0,867	0,020	0,026	0,026
FA:12-13	3,200	-0,004	-0,013	-0,013	FR:12-13	3,336	-0,002	-0,007	-0,007
FA:13-6	0,449	0,000	0,000	0,000	FR:13-6	0,456	-0,001	-0,001	-0,001
FA:14-13	0,907	0,007	0,009	0,009	FR:14-13	1,227	0,004	0,007	0,007

Continua...

Tabela 4.1: Medidas SCADA - IEEE 14 barras sem ruídos e erro grosseiro de $10 \cdot \sigma$ na medida IA:5

IA:1	0,281	0,206	0,214	0,214	IR:1	1,401	0,138	0,238	0,238
IA:2	6,479	0,026	0,169	0,169	IR:2	0,663	0,225	0,270	0,270
IA:5	11,397	0,874	10,001	10,001	IR:5	9,417	-0,239	-2,260	-2,260
IA:7	-	0,000	0,000	0,000	IR:7	-	0,000	0,000	0,000
IA:8	-	0,000	0,000	0,000	IR:8	0,428	-0,010	-0,011	-0,011
IA:9	0,755	-0,012	-0,015	-0,015	IR:9	0,543	-0,132	-0,150	-0,150
IA:13	0,835	-0,002	-0,002	-0,002	IR:13	0,702	-0,005	-0,007	-0,007
IA:14	0,665	-0,005	-0,005	-0,005	IR:14	0,683	-0,016	-0,019	-0,019

Medidas de Tensão				
Medida	UI:	r^N :	e_σ	$\hat{b}$
V:1	0,149	0,055	0,055	0,055
V:2	0,150	0,053	0,054	0,054
V:3	0,155	0,054	0,055	0,055
V:6	0,156	0,049	0,050	0,050
V:8	0,149	0,047	0,048	0,048
V:12	0,160	0,051	0,051	0,051

Na sequência foi adicionado um erro na mesma medida de injeção de potência ativa na barra 5 (IA5), porém o erro foi vinte vezes o valor do desvio padrão da medida ($20 \cdot \sigma$). Nesse caso, mesmo o erro sendo muito grande, como a maior parte do erro é mascarado na componente não detectável do erro (índice UI alto) o teste de maior resíduo normalizado falha, ficando abaixo do limiar apresentado na seção 4.3. O índice $J(x)$ calculado também fica abaixo do limiar de detecção.

No entanto a detecção do erro grosseiro poderia ser feita por ambas a análise do e_σ como também pelo teste do ($\hat{b}$), como mostra a tabela 4.2.

Tabela 4.2: Medidas SCADA - IEEE 14 barras sem ruídos e erro grosseiro de $20 \cdot \sigma$ na medida IA:5

Medidas SCADA									
Índice J(x)=3,05644									
Medidas de Potência Ativa					Medida de Potência Reativa				
Medida	UI :	r^N :	e_σ :	$\hat{b}$:	Medida	UI :	r^N :	e_σ :	$\hat{b}$:
FA:1-2	0,289	0,355	0,370	0,370	FR:1-2	0,581	-0,197	-0,228	-0,228
FA:2-3	0,243	0,113	0,116	0,116	FR:2-3	2,222	0,073	0,178	0,178
FA:3-4	1,276	0,292	0,473	0,473	FR:3-4	2,133	0,187	0,440	0,440
FA:4-2	0,321	-0,243	-0,255	-0,255	FR:4-2	1,180	-0,329	-0,510	-0,510
FA:4-5	0,488	1,287	1,432	1,432	FR:4-5	0,361	-0,188	-0,200	-0,200
FA:5-2	0,291	-0,757	-0,789	-0,789	FR:5-2	1,116	0,562	0,842	0,842
FA:5-6	0,333	-0,311	-0,328	-0,328	FR:5-6	0,451	-0,164	-0,180	-0,180
FA:6-5	0,333	0,311	0,328	0,328	FR:6-5	0,904	-0,246	-0,332	-0,332
FA:6-11	0,899	-0,039	-0,052	-0,052	FR:6-11	0,837	-0,046	-0,060	-0,060
FA:6-12	0,605	-0,006	-0,007	-0,007	FR:6-12	0,831	-0,005	-0,006	-0,006
FA:6-13	0,454	-0,004	-0,004	-0,004	FR:6-13	0,430	-0,010	-0,010	-0,010
FA:7-4	0,420	-0,019	-0,021	-0,021	FR:7-4	0,424	0,053	0,057	0,057

Continua...

Tabela 4.2: Medidas SCADA - IEEE 14 barras sem ruídos e erro grosseiro de $20 \cdot \sigma$ na medida IA:5

FA:7-8	-	0,000	0,000	0,000	FR:7-8	0,417	0,007	0,008	0,008
FA:7-9	0,420	0,018	0,020	0,020	FR:7-9	1,215	-0,124	-0,194	-0,194
FA:8-7	-	0,000	0,000	0,000	FR:8-7	0,428	-0,012	-0,013	-0,013
FA:9-4	0,420	-0,021	-0,023	-0,023	FR:9-4	1,573	-0,153	-0,285	-0,285
FA:9-10	0,979	0,012	0,017	0,017	FR:9-10	0,925	0,061	0,083	0,083
FA:9-14	0,756	0,018	0,023	0,023	FR:9-14	0,725	0,038	0,047	0,047
FA:10-9	0,973	-0,011	-0,016	-0,016	FR:10-9	0,926	-0,062	-0,085	-0,085
FA:10-11	4,245	0,108	0,470	0,470	FR:10-11	3,864	0,114	0,456	0,456
FA:11-6	0,893	0,035	0,047	0,047	FR:11-6	0,867	0,038	0,050	0,050
FA:12-13	3,200	-0,009	-0,031	-0,031	FR:12-13	3,336	-0,008	-0,028	-0,028
FA:13-6	0,449	0,001	0,001	0,001	FR:13-6	0,456	-0,003	-0,004	-0,004
FA:14-13	0,907	0,013	0,017	0,017	FR:14-13	1,227	0,009	0,015	0,015
IA:1	0,281	0,412	0,428	0,428	IR:1	1,401	0,276	0,475	0,475
IA:2	6,480	0,051	0,337	0,337	IR:2	0,663	0,449	0,539	0,539
IA:5	11,397	1,748	20,000	20,000	IR:5	9,418	-0,477	-4,519	-4,519
IA:7	-	0,000	0,000	0,000	IR:7	-	0,000	0,000	0,000
IA:8	-	0,000	0,000	0,000	IR:8	0,428	-0,012	-0,013	-0,013
IA:9	0,755	-0,025	-0,031	-0,031	IR:9	0,543	-0,260	-0,296	-0,296
IA:13	0,835	-0,004	-0,005	-0,005	IR:13	0,702	-0,012	-0,015	-0,015
IA:14	0,665	-0,009	-0,011	-0,011	IR:14	0,683	-0,033	-0,039	-0,039

Medidas de Tensão				
Medida	UI:	r^N :	e_σ	$\hat{b}$
V:1	0,149	0,109	0,110	0,110
V:2	0,150	0,106	0,107	0,107
V:3	0,155	0,109	0,110	0,110
V:6	0,156	0,098	0,100	0,100
V:8	0,149	0,095	0,096	0,096
V:12	0,160	0,101	0,103	0,103

4.3.1.2 Baixo UI

No próximo teste foi adicionado um erro grosseiro na medida de injeção de potência reativa na barra 8 ($IR : 8$), essa medida tem a característica de possuir um índice UI baixo (0,429), isso infere que a maior componente do erro é decomposto no seu resíduo. Nesse sistema ainda não há presença de ruídos gaussianos e a magnitude do erro foi de 10 vezes o valor de desvio padrão da respectiva medida ($10 \cdot \sigma$).

Nesse caso os testes do maior resíduo normalizado, o teste do $\hat{b}$, o teste do e_σ conseguem detectar e identificar o erro grosseiro, o teste do índice $J(x)$ iria detectar a presença do erro grosseiro, como mostra a tabela 4.3

Tabela 4.3: Medidas SCADA - IEEE 14 barras sem ruídos e erro grosseiro de $10 \cdot \sigma$ na medida IR:8

Medidas SCADA
Índice J(x)=84,337182

Continua...

Tabela 4.3: Medidas SCADA - IEEE 14 barras sem ruídos e erro grosseiro de $10 \cdot \sigma$ na medida IR:8

Medidas de Potência Ativa					Medida de Potência Reativa				
Medida	$UI :$	$r^N :$	$e_\sigma :$	$\hat{b} :$	Medida	$UI :$	$r^N :$	$e_\sigma :$	$\hat{b} :$
FA:1-2	0,289	-0,061	-0,064	-0,064	FR:1-2	0,581	0,013	0,015	0,015
FA:2-3	0,243	-0,053	-0,054	-0,054	FR:2-3	2,221	0,035	0,086	0,086
FA:3-4	1,277	0,038	0,062	0,062	FR:3-4	2,132	0,056	0,131	0,131
FA:4-2	0,321	0,069	0,073	0,073	FR:4-2	1,180	0,102	0,158	0,158
FA:4-5	0,488	0,133	0,148	0,148	FR:4-5	0,361	0,101	0,108	0,108
FA:5-2	0,292	0,050	0,052	0,052	FR:5-2	1,116	-0,073	-0,109	-0,109
FA:5-6	0,333	0,030	0,032	0,032	FR:5-6	0,451	0,116	0,127	0,127
FA:6-5	0,333	-0,030	-0,032	-0,032	FR:6-5	0,903	-0,076	-0,102	-0,102
FA:6-11	0,899	0,038	0,051	0,051	FR:6-11	0,837	0,060	0,078	0,078
FA:6-12	0,605	0,007	0,008	0,008	FR:6-12	0,831	-0,003	-0,003	-0,003
FA:6-13	0,454	0,008	0,008	0,008	FR:6-13	0,430	-0,003	-0,004	-0,004
FA:7-4	0,420	-0,063	-0,068	-0,068	FR:7-4	0,424	-1,216	-1,321	-1,321
FA:7-8	-	0,000	0,000	0,000	FR:7-8	0,417	1,651	1,789	1,789
FA:7-9	0,420	0,061	0,067	0,067	FR:7-9	1,215	-3,577	-5,628	-5,628
FA:8-7	-	0,000	0,000	0,000	FR:8-7	0,429	-1,695	-1,844	-1,844
FA:9-4	0,420	-0,078	-0,085	-0,085	FR:9-4	1,573	-1,916	-3,572	-3,572
FA:9-10	0,979	0,003	0,005	0,005	FR:9-10	0,925	-0,170	-0,231	-0,231
FA:9-14	0,756	-0,007	-0,008	-0,008	FR:9-14	0,725	-0,108	-0,133	-0,133
FA:10-9	0,973	-0,002	-0,003	-0,003	FR:10-9	0,926	0,172	0,235	0,235
FA:10-11	4,246	-0,106	-0,462	-0,462	FR:10-11	3,864	-0,152	-0,608	-0,608
FA:11-6	0,893	-0,037	-0,050	-0,050	FR:11-6	0,868	-0,052	-0,069	-0,069
FA:12-13	3,200	0,003	0,011	0,011	FR:12-13	3,336	0,005	0,016	0,016
FA:13-6	0,449	-0,006	-0,006	-0,006	FR:13-6	0,456	0,014	0,015	0,015
FA:14-13	0,907	-0,021	-0,028	-0,028	FR:14-13	1,227	0,008	0,012	0,012
IA:1	0,281	-0,060	-0,062	-0,062	IR:1	1,401	0,061	0,106	0,106
IA:2	6,479	-0,006	-0,042	-0,042	IR:2	0,664	0,058	0,069	0,069
IA:5	11,399	-0,027	-0,305	-0,305	IR:5	9,415	0,090	0,853	0,853
IA:7	-	0,000	0,000	0,000	IR:7	-	0,000	0,000	0,000
IA:8	-	0,000	0,000	0,000	IR:8	0,429	9,185	9,992	9,992
IA:9	0,755	-0,118	-0,148	-0,148	IR:9	0,543	0,932	1,061	1,061
IA:13	0,835	0,001	0,002	0,002	IR:13	0,702	0,020	0,024	0,024
IA:14	0,665	-0,002	-0,003	-0,003	IR:14	0,683	0,087	0,105	0,105
Medidas de Tensão									
Medida	UI:	$r^N :$	e_σ	$\hat{b}$					
V:1	0,149	-0,062	-0,062	-0,062					
V:2	0,150	-0,062	-0,062	-0,062					
V:3	0,155	-0,064	-0,064	-0,064					
V:6	0,156	-0,069	-0,070	-0,070					
V:8	0,149	-0,120	-0,122	-0,122					
V:12	0,160	-0,071	-0,072	-0,072					

Para finalizar os teste considerando sistema de medição convencional sem ruídos gaussianos foi adicionado erro grosseiro ainda na medida de injeção de potência reativa na barra 8 ($IR : 8$), dessa vez o erro grosseiro foi de 20 vezes o valor do seu respectivo desvio padrão ($20 \cdot \sigma$).

Na tabela 4.4 podemos analisar que todos os testes de detecção e identificação de erros

grosseiros iriam funcionar bem para esse caso, tanto o teste do maior resíduo normalizado como também o do e_σ , do índice $J(x)$ e o teste do $(\hat{b})$. O teste do maior resíduo normalizado funciona bem para esse caso pois a maior parte do erro esta no resíduo, pois o índice UI dessa medida é muito baixo.

Tabela 4.4: Medidas SCADA - IEEE 14 barras sem ruídos e erro grosseiro de $20 \cdot \sigma$ na medida IR:8

Medidas SCADA									
Índice J(x)=337,592555									
Medidas de Potência Ativa					Medida de Potência Reativa				
Medida	UI :	r^N :	e_σ :	$\hat{b}$:	Medida	UI :	r^N :	e_σ :	$\hat{b}$:
FA:1-2	0,289	-0,122	-0,127	-0,127	FR:1-2	0,581	0,025	0,029	0,029
FA:2-3	0,243	-0,105	-0,108	-0,108	FR:2-3	2,220	0,071	0,173	0,173
FA:3-4	1,278	0,077	0,124	0,124	FR:3-4	2,132	0,111	0,262	0,262
FA:4-2	0,321	0,139	0,146	0,146	FR:4-2	1,180	0,205	0,317	0,317
FA:4-5	0,488	0,267	0,297	0,297	FR:4-5	0,361	0,202	0,215	0,215
FA:5-2	0,292	0,100	0,104	0,104	FR:5-2	1,116	-0,147	-0,220	-0,220
FA:5-6	0,333	0,060	0,064	0,064	FR:5-6	0,451	0,232	0,255	0,255
FA:6-5	0,333	-0,060	-0,064	-0,064	FR:6-5	0,903	-0,153	-0,206	-0,206
FA:6-11	0,899	0,077	0,103	0,103	FR:6-11	0,837	0,120	0,156	0,156
FA:6-12	0,605	0,016	0,019	0,019	FR:6-12	0,831	-0,009	-0,012	-0,012
FA:6-13	0,454	0,015	0,016	0,016	FR:6-13	0,430	-0,006	-0,006	-0,006
FA:7-4	0,420	-0,125	-0,135	-0,135	FR:7-4	0,424	-2,436	-2,646	-2,646
FA:7-8	-	0,000	0,000	0,000	FR:7-8	0,417	3,294	3,569	3,569
FA:7-9	0,420	0,124	0,134	0,134	FR:7-9	1,215	-7,168	-11,277	-11,277
FA:8-7	-	0,000	0,000	0,000	FR:8-7	0,429	-3,385	-3,683	-3,683
FA:9-4	0,420	-0,157	-0,170	-0,170	FR:9-4	1,573	-3,840	-7,159	-7,159
FA:9-10	0,979	0,006	0,009	0,009	FR:9-10	0,925	-0,341	-0,464	-0,464
FA:9-14	0,756	-0,014	-0,017	-0,017	FR:9-14	0,725	-0,217	-0,267	-0,267
FA:10-9	0,973	-0,005	-0,007	-0,007	FR:10-9	0,926	0,345	0,470	0,470
FA:10-11	4,246	-0,212	-0,924	-0,924	FR:10-11	3,864	-0,307	-1,225	-1,225
FA:11-6	0,893	-0,074	-0,099	-0,099	FR:11-6	0,868	-0,106	-0,141	-0,141
FA:12-13	3,200	0,005	0,018	0,018	FR:12-13	3,336	0,006	0,020	0,020
FA:13-6	0,449	-0,011	-0,012	-0,012	FR:13-6	0,456	0,026	0,029	0,029
FA:14-13	0,907	-0,043	-0,058	-0,058	FR:14-13	1,227	0,016	0,026	0,026
IA:1	0,281	-0,119	-0,124	-0,124	IR:1	1,401	0,123	0,211	0,211
IA:2	6,480	-0,013	-0,086	-0,086	IR:2	0,664	0,115	0,137	0,137
IA:5	11,400	-0,054	-0,620	-0,620	IR:5	9,414	0,180	1,709	1,709
IA:7	-	0,000	0,000	0,000	IR:7	-	0,000	0,000	0,000
IA:8	-	0,000	0,000	0,000	IR:8	0,429	18,376	19,993	19,993
IA:9	0,755	-0,237	-0,297	-0,297	IR:9	0,544	1,868	2,126	2,126
IA:13	0,835	0,003	0,004	0,004	IR:13	0,702	0,038	0,046	0,046
IA:14	0,665	-0,005	-0,005	-0,005	IR:14	0,683	0,173	0,209	0,209
Medidas de Tensão									
Medida	UI:	r^N :	e_σ	$\hat{b}$					
V:1	0,149	-0,123	-0,125	-0,125					
V:2	0,150	-0,123	-0,125	-0,125					
V:3	0,155	-0,127	-0,129	-0,129					
V:6	0,156	-0,138	-0,140	-0,140					
V:8	0,149	-0,240	-0,243	-0,243					

Continua...

Tabela 4.4: Medidas SCADA - IEEE 14 barras sem ruídos e erro grosseiro de $20 \cdot \sigma$ na medida IR:8

V:12	0,160	-0,142	-0,144	-0,144
------	-------	--------	--------	--------

Conforme verificado nos testes já apresentados, a medida portadora de erro grosseiro era sempre aquela de maior resíduo normalizado, mesmo ele não estando acima do limiar de detecção pelo teste do maior resíduo normalizado. Isso ocorre porque nesses testes as medidas sem erro grosseiro foram simuladas sem ruídos gaussianos (MONTICELLI; GARCIA, 1983; ABUR; EXPOSITO, 2004). Dessa forma, mesmo para medidas com elevado índice UI os testes do $\hat{b}$ e do erro composto funcionaram na detecção, identificação e estimação do erro grosseiro (estimação em relação ao número de desvios padrão de erro).

4.3.2 Simulações com ruído gaussiano

Os próximos testes apresentados terão um sistema de medição com ruídos gaussianos e somente medidas SCADA, gerados de acordo com a seção 4.2, e também serão adicionados, erros grosseiros simples de 10 e 20 vezes o valor do desvio padrão das medidas em análise, ao valor de referência da medida (sem ruído).

4.3.2.1 Alto UI

O primeiro teste foi feito adicionando um erro grosseiro de $10 \cdot \sigma$ na medida de fluxo de potência ativa da barra 10 para a barra 11 ($FA : 10 - 11$), essa medida tem um índice UI alto igual a 4,2454, mostrando que o seu erro pode ser mascarado no resíduo.

Na tabela 4.5 podemos perceber que o teste do maior resíduo normalizado falha nesse caso, pois apesar de o resíduo normalizado dessa medida ser o maior de todos, ele não é maior que o limiar de detecção. O índice $J(x)$ também não detecta o erro grosseiro estando abaixo do limiar de detecção.

Por outro lado, os testes do $\hat{b}$ e do e_σ funcionam de forma adequada, pois a medida portadora de EG apresenta o maior resíduo normalizado e os valores de $\hat{b}$ e e_σ são maiores que o limiar pré-estabelecido para essas técnicas. Dessa forma, os erros estimados por essas técnicas ficaram próximos do valor simulado de EG.

Tabela 4.5: Medidas SCADA - IEEE 14 barras com ruídos e erro grosseiro de $10 \cdot \sigma$ na medida FA:10-11

Medidas SCADA									
Índice $J(x)=34,095315$									
Medidas de Potência Ativa					Medida de Potência Reativa				
Medida	$UI :$	$r^N :$	$e_\sigma :$	$\hat{b} :$	Medida	$UI :$	$r^N :$	$e_\sigma :$	$\hat{b} :$
FA:1-2	0,289	0,263	0,274	0,274	FR:1-2	0,581	1,328	1,536	1,536

Continua...

Tabela 4.5: Medidas SCADA - IEEE 14 barras com ruídos e erro grosseiro de $10 \cdot \sigma$ na medida FA:10-11

FA:2-3	0,243	1,080	1,111	1,111	FR:2-3	2,222	-1,154	-2,812	-2,812
FA:3-4	1,275	-0,382	-0,618	-0,618	FR:3-4	2,133	-1,164	-2,741	-2,741
FA:4-2	0,321	0,333	0,349	0,349	FR:4-2	1,180	-0,097	-0,150	-0,150
FA:4-5	0,488	-1,447	-1,610	-1,610	FR:4-5	0,361	0,187	0,199	0,199
FA:5-2	0,291	1,057	1,100	1,100	FR:5-2	1,116	-0,474	-0,710	-0,710
FA:5-6	0,333	-2,220	-2,339	-2,339	FR:5-6	0,451	-2,305	-2,529	-2,529
FA:6-5	0,333	0,314	0,331	0,331	FR:6-5	0,905	-0,377	-0,508	-0,508
FA:6-11	0,899	0,461	0,620	0,620	FR:6-11	0,837	-0,645	-0,841	-0,841
FA:6-12	0,605	0,728	0,851	0,851	FR:6-12	0,831	0,387	0,504	0,504
FA:6-13	0,454	-0,886	-0,973	-0,973	FR:6-13	0,430	0,695	0,757	0,757
FA:7-4	0,420	-0,515	-0,558	-0,558	FR:7-4	0,424	-0,183	-0,198	-0,198
FA:7-8	-	0,000	0,000	0,000	FR:7-8	0,417	-0,029	-0,032	-0,032
FA:7-9	0,420	0,899	0,975	0,975	FR:7-9	1,215	-1,185	-1,865	-1,865
FA:8-7	-	0,000	0,000	0,000	FR:8-7	0,428	1,362	1,481	1,481
FA:9-4	0,420	-0,143	-0,155	-0,155	FR:9-4	1,572	-0,968	-1,804	-1,804
FA:9-10	0,979	0,187	0,262	0,262	FR:9-10	0,925	0,440	0,600	0,600
FA:9-14	0,756	-0,449	-0,563	-0,563	FR:9-14	0,725	-0,202	-0,249	-0,249
FA:10-9	0,973	-0,565	-0,789	-0,789	FR:10-9	0,926	-0,322	-0,439	-0,439
FA:10-11	4,245	2,549	11,116	11,116	FR:10-11	3,864	1,349	5,385	5,385
FA:11-6	0,893	2,123	2,847	2,847	FR:11-6	0,867	0,343	0,454	0,454
FA:12-13	3,201	1,017	3,411	3,411	FR:12-13	3,336	0,390	1,358	1,358
FA:13-6	0,449	-2,192	-2,403	-2,403	FR:13-6	0,456	-0,233	-0,256	-0,256
FA:14-13	0,907	-0,801	-1,082	-1,082	FR:14-13	1,226	-1,020	-1,614	-1,614
IA:1	0,281	1,080	1,122	1,122	IR:1	1,402	-0,631	-1,086	-1,086
IA:2	6,474	1,498	9,814	9,814	IR:2	0,664	0,585	0,702	0,702
IA:5	11,392	-0,396	-4,530	-4,530	IR:5	9,418	0,655	6,202	6,202
IA:7	-	0,000	0,000	0,000	IR:7	-	0,000	0,000	0,000
IA:8	-	0,000	0,000	0,000	IR:8	0,428	-0,240	-0,261	-0,261
IA:9	0,755	-1,511	-1,893	-1,893	IR:9	0,543	-0,764	-0,869	-0,869
IA:13	0,835	1,062	1,383	1,383	IR:13	0,702	0,472	0,576	0,576
IA:14	0,665	0,442	0,530	0,530	IR:14	0,683	0,924	1,119	1,119

Medidas de Tensão				
Medida	UI:	r^N :	e_σ	$\hat{b}$
V:1	0,149	0,007	0,007	0,007
V:2	0,150	-0,485	-0,491	-0,491
V:3	0,155	0,094	0,095	0,095
V:6	0,156	-0,232	-0,235	-0,235
V:8	0,149	-0,291	-0,294	-0,294
V:12	0,160	-0,199	-0,202	-0,202

O segundo teste em medidas com ruído gaussiano utilizou a mesma medida do primeiro teste que é a medida de fluxo de potência ativa da barra 10 para a barra 11 ($FA : 10 - 11$), mas dessa vez o erro grosseiro utilizado foi de $20 \cdot \sigma$.

Nesse caso, além dos testes do $\hat{b}$ e do e_σ , o teste de maior resíduo normalizado também funciona, pois como o erro é muito grande, mesmo o índice UI sendo alto, o resíduo normalizado dessa medida é maior que o limiar de detecção. No entanto o teste do índice $J(x)$ não iria detectar esse erro grosseiro. Observe que são boas as estimativas do erro obtidas pelos testes do $\hat{b}$ e do e_σ .

Tabela 4.6: Medidas SCADA - IEEE 14 barras com ruídos e erro grosseiro de $20 \cdot \sigma$ na medida FA:10-11

Medidas SCADA									
Índice J(x)=51,035633									
Medidas de Potência Ativa					Medida de Potência Reativa				
Medida	UI :	r^N :	e_σ :	$\hat{b}$:	Medida	UI :	r^N :	e_σ :	$\hat{b}$:
FA:1-2	0,289	0,390	0,405	0,405	FR:1-2	0,581	1,305	1,509	1,509
FA:2-3	0,243	1,185	1,219	1,219	FR:2-3	2,222	-1,137	-2,772	-2,772
FA:3-4	1,275	-0,344	-0,558	-0,558	FR:3-4	2,134	-1,168	-2,753	-2,753
FA:4-2	0,321	0,166	0,174	0,174	FR:4-2	1,180	-0,315	-0,488	-0,488
FA:4-5	0,488	-1,923	-2,140	-2,140	FR:4-5	0,361	-0,113	-0,120	-0,120
FA:5-2	0,291	0,987	1,028	1,028	FR:5-2	1,116	-0,246	-0,369	-0,369
FA:5-6	0,333	-2,605	-2,745	-2,745	FR:5-6	0,451	-2,756	-3,023	-3,023
FA:6-5	0,333	0,699	0,737	0,737	FR:6-5	0,906	-0,242	-0,327	-0,327
FA:6-11	0,899	-0,257	-0,346	-0,346	FR:6-11	0,837	-0,693	-0,904	-0,904
FA:6-12	0,605	1,218	1,424	1,424	FR:6-12	0,831	0,359	0,466	0,466
FA:6-13	0,454	-0,479	-0,525	-0,525	FR:6-13	0,430	0,670	0,730	0,730
FA:7-4	0,420	-0,604	-0,655	-0,655	FR:7-4	0,424	-0,184	-0,200	-0,200
FA:7-8	-	0,000	0,000	0,000	FR:7-8	0,417	-0,009	-0,010	-0,010
FA:7-9	0,420	0,988	1,072	1,072	FR:7-9	1,215	-1,267	-1,994	-1,994
FA:8-7	-	0,000	0,000	0,000	FR:8-7	0,428	1,335	1,453	1,453
FA:9-4	0,420	-0,234	-0,254	-0,254	FR:9-4	1,572	-1,356	-2,527	-2,527
FA:9-10	0,979	0,459	0,643	0,643	FR:9-10	0,925	0,506	0,689	0,689
FA:9-14	0,756	-1,811	-2,270	-2,270	FR:9-14	0,725	-0,045	-0,055	-0,055
FA:10-9	0,973	-0,836	-1,167	-1,167	FR:10-9	0,926	-0,387	-0,528	-0,528
FA:10-11	4,246	4,840	21,114	21,114	FR:10-11	3,863	1,437	5,734	5,734
FA:11-6	0,893	2,834	3,799	3,799	FR:11-6	0,867	0,343	0,454	0,454
FA:12-13	3,201	1,281	4,297	4,297	FR:12-13	3,336	0,328	1,142	1,142
FA:13-6	0,449	-2,598	-2,849	-2,849	FR:13-6	0,456	-0,180	-0,198	-0,198
FA:14-13	0,907	-2,365	-3,194	-3,194	FR:14-13	1,226	-0,751	-1,189	-1,189
IA:1	0,281	1,199	1,245	1,245	IR:1	1,402	-0,765	-1,317	-1,317
IA:2	6,473	1,472	9,644	9,644	IR:2	0,664	0,513	0,616	0,616
IA:5	11,389	-0,252	-2,884	-2,884	IR:5	9,419	0,384	3,635	3,635
IA:7	-	0,000	0,000	0,000	IR:7	-	0,000	0,000	0,000
IA:8	-	0,000	0,000	0,000	IR:8	0,428	-0,267	-0,290	-0,290
IA:9	0,755	-2,058	-2,578	-2,578	IR:9	0,543	-1,035	-1,178	-1,178
IA:13	0,835	1,057	1,376	1,376	IR:13	0,702	0,527	0,644	0,644
IA:14	0,665	0,724	0,870	0,870	IR:14	0,683	0,753	0,912	0,912

Medidas de Tensão				
Medida	UI:	r^N :	e_σ	$\hat{b}$
V:1	0,149	0,118	0,119	0,119
V:2	0,150	-0,375	-0,379	-0,379
V:3	0,155	0,207	0,210	0,210
V:6	0,156	-0,104	-0,106	-0,106
V:8	0,149	-0,190	-0,192	-0,192
V:12	0,160	-0,071	-0,072	-0,072

4.3.2.2 Baixo UI

O próximo teste utilizará uma medida com índice UI baixo igual a 0,4511, a medida é a de fluxo de potência reativa da barra 5 para a barra 6 ($FR : 5 - 6$). Nesse caso, a medida de maior resíduo normalizado é a medida portadora de erro grosseiro. Dessa forma os testes do e_σ e o do $\hat{b}$ funcionam bem e conseguem obter boas estimativas para o erro. Como o valor do resíduo normalizado dessa medida é maior que o limiar do teste do maior resíduo normalizado, esse teste também funciona.

O teste do índice $J(x)$ iria detectar o erro grosseiro, sendo o valor calculado maior que o limiar que detecção.

Tabela 4.7: Medidas SCADA - IEEE 14 barras com ruídos e erro grosseiro de $10 \cdot \sigma$ na medida FR:5-6

Medidas SCADA									
Índice J(x)=106,87561									
Medidas de Potência Ativa					Medida de Potência Reativa				
Medida	UI :	r^N :	e_σ :	$\hat{b}$:	Medida	UI :	r^N :	e_σ :	$\hat{b}$:
FA:1-2	0,289	-0,341	-0,355	-0,355	FR:1-2	0,581	1,192	1,379	1,379
FA:2-3	0,243	0,525	0,541	0,541	FR:2-3	2,219	-0,375	-0,914	-0,914
FA:3-4	1,278	0,372	0,604	0,604	FR:3-4	2,130	-0,084	-0,198	-0,198
FA:4-2	0,322	0,973	1,022	1,022	FR:4-2	1,179	-0,390	-0,603	-0,603
FA:4-5	0,489	-0,497	-0,553	-0,553	FR:4-5	0,361	-0,451	-0,480	-0,480
FA:5-2	0,292	1,599	1,666	1,666	FR:5-2	1,116	0,979	1,467	1,467
FA:5-6	0,333	-2,498	-2,632	-2,632	FR:5-6	0,451	9,084	9,965	9,965
FA:6-5	0,333	0,592	0,624	0,624	FR:6-5	0,904	3,270	4,408	4,408
FA:6-11	0,899	1,976	2,657	2,657	FR:6-11	0,837	-0,129	-0,168	-0,168
FA:6-12	0,605	0,235	0,275	0,275	FR:6-12	0,831	0,516	0,670	0,670
FA:6-13	0,454	-1,291	-1,418	-1,418	FR:6-13	0,430	0,798	0,869	0,869
FA:7-4	0,420	0,208	0,225	0,225	FR:7-4	0,424	-0,134	-0,146	-0,146
FA:7-8	-	0,000	0,000	0,000	FR:7-8	0,417	-0,158	-0,171	-0,171
FA:7-9	0,420	0,177	0,192	0,192	FR:7-9	1,216	-0,766	-1,205	-1,205
FA:8-7	-	0,000	0,000	0,000	FR:8-7	0,428	1,528	1,662	1,662
FA:9-4	0,420	0,596	0,646	0,646	FR:9-4	1,573	1,245	2,320	2,320
FA:9-10	0,979	-0,400	-0,559	-0,559	FR:9-10	0,925	-0,053	-0,072	-0,072
FA:9-14	0,756	0,709	0,888	0,888	FR:9-14	0,725	-0,707	-0,873	-0,873
FA:10-9	0,973	0,021	0,030	0,030	FR:10-9	0,926	0,179	0,245	0,245
FA:10-11	4,246	-2,163	-9,436	-9,436	FR:10-11	3,864	0,073	0,291	0,291
FA:11-6	0,893	0,633	0,849	0,849	FR:11-6	0,867	-0,056	-0,074	-0,074
FA:12-13	3,201	0,834	2,796	2,796	FR:12-13	3,336	0,551	1,919	1,919
FA:13-6	0,449	-1,774	-1,945	-1,945	FR:13-6	0,456	-0,303	-0,333	-0,333
FA:14-13	0,907	0,743	1,003	1,003	FR:14-13	1,227	-1,521	-2,407	-2,407
IA:1	0,281	0,487	0,505	0,505	IR:1	1,401	-0,939	-1,616	-1,616
IA:2	6,482	0,676	4,433	4,433	IR:2	0,663	1,350	1,620	1,620
IA:5	11,400	-1,579	-18,074	-18,074	IR:5	9,414	-1,623	-15,369	-15,369
IA:7	-	0,000	0,000	0,000	IR:7	-	0,000	0,000	0,000
IA:8	-	0,000	0,000	0,000	IR:8	0,428	-0,074	-0,080	-0,080
IA:9	0,755	0,024	0,031	0,031	IR:9	0,544	0,815	0,928	0,928
IA:13	0,835	1,094	1,425	1,425	IR:13	0,702	0,465	0,569	0,569
IA:14	0,665	0,282	0,338	0,338	IR:14	0,683	1,321	1,600	1,600

Continua...

Tabela 4.7: Medidas SCADA - IEEE 14 barras com ruídos e erro grosseiro de $10 \cdot \sigma$ na medida FR:5-6

Medidas de Tensão				
Medida	UI:	r^N :	e_σ	$\hat{b}$
V:1	0,149	-0,604	-0,610	-0,610
V:2	0,149	-1,094	-1,106	-1,106
V:3	0,155	-0,535	-0,542	-0,542
V:6	0,155	-0,844	-0,854	-0,854
V:8	0,149	-0,859	-0,868	-0,868
V:12	0,160	-0,825	-0,836	-0,836

O próximo teste foi realizado adicionando um erro grosseiro de $20 \cdot \sigma$ na medida de fluxo de potência ativa da barra 5 para a barra 6. Nesse caso, assim como no teste anterior, todos os métodos funcionam de forma adequada, pois a medida portadora de EG apresenta o maior resíduo normalizado cujo valor é superior ao limiar do teste do maior resíduo normalizado.

Já o índice $J(x)$ funciona bem para esse caso detectando o erro grosseiro desse sistema.

Tabela 4.8: Medidas SCADA - IEEE 14 barras com ruídos e erro grosseiro de $20 \cdot \sigma$ na medida FR:5-6

Medidas SCADA									
Índice J(x)=355,542053									
Medidas de Potência Ativa					Medida de Potência Reativa				
Medida	UI :	r^N :	e_σ :	$\hat{b}$:	Medida	UI :	r^N :	e_σ :	$\hat{b}$:
FA:1-2	0,289	-0,727	-0,757	-0,757	FR:1-2	0,581	1,056	1,221	1,221
FA:2-3	0,243	0,160	0,165	0,165	FR:2-3	2,218	0,293	0,713	0,713
FA:3-4	1,279	1,039	1,687	1,687	FR:3-4	2,128	0,815	1,917	1,917
FA:4-2	0,322	1,351	1,420	1,420	FR:4-2	1,178	-0,843	-1,302	-1,302
FA:4-5	0,489	-0,149	-0,166	-0,166	FR:4-5	0,361	-1,270	-1,350	-1,350
FA:5-2	0,292	1,989	2,072	2,072	FR:5-2	1,115	2,413	3,614	3,614
FA:5-6	0,333	-3,093	-3,260	-3,260	FR:5-6	0,451	18,198	19,966	19,966
FA:6-5	0,333	1,187	1,251	1,251	FR:6-5	0,904	6,459	8,709	8,709
FA:6-11	0,899	2,565	3,448	3,448	FR:6-11	0,837	0,256	0,334	0,334
FA:6-12	0,605	0,286	0,334	0,334	FR:6-12	0,830	0,596	0,775	0,775
FA:6-13	0,454	-1,246	-1,368	-1,368	FR:6-13	0,430	0,861	0,937	0,937
FA:7-4	0,420	0,727	0,789	0,789	FR:7-4	0,424	-0,096	-0,104	-0,104
FA:7-8	-	0,000	0,000	0,000	FR:7-8	0,417	-0,247	-0,268	-0,268
FA:7-9	0,420	-0,342	-0,371	-0,371	FR:7-9	1,216	-0,489	-0,770	-0,770
FA:8-7	-	0,000	0,000	0,000	FR:8-7	0,428	1,642	1,786	1,786
FA:9-4	0,421	1,126	1,222	1,222	FR:9-4	1,573	2,730	5,089	5,089
FA:9-10	0,979	-0,633	-0,886	-0,886	FR:9-10	0,925	-0,405	-0,551	-0,551
FA:9-14	0,756	0,393	0,493	0,493	FR:9-14	0,725	-0,981	-1,212	-1,212
FA:10-9	0,973	0,256	0,357	0,357	FR:10-9	0,926	0,538	0,734	0,734
FA:10-11	4,246	-3,942	-17,197	-17,197	FR:10-11	3,865	-0,910	-3,635	-3,635
FA:11-6	0,893	0,057	0,076	0,076	FR:11-6	0,868	-0,389	-0,514	-0,514
FA:12-13	3,201	0,929	3,116	3,116	FR:12-13	3,337	0,627	2,183	2,183
FA:13-6	0,449	-1,809	-1,983	-1,983	FR:13-6	0,456	-0,312	-0,343	-0,343

Continua...

Tabela 4.8: Medidas SCADA - IEEE 14 barras com ruídos e erro grosseiro de $20 \cdot \sigma$ na medida FR:5-6

FA:14-13	0,907	0,560	0,756	0,756	FR:14-13	1,227	-1,688	-2,672	-2,672
IA:1	0,281	0,101	0,105	0,105	IR:1	1,401	-1,323	-2,277	-2,277
IA:2	6,487	-0,034	-0,226	-0,226	IR:2	0,663	1,923	2,307	2,307
IA:5	11,405	-2,432	-27,847	-27,847	IR:5	9,412	-3,788	-35,847	-35,847
IA:7	-	0,000	0,000	0,000	IR:7	-	0,000	0,000	0,000
IA:8	-	0,000	0,000	0,000	IR:8	0,428	0,040	0,044	0,044
IA:9	0,755	0,791	0,992	0,992	IR:9	0,544	1,884	2,145	2,145
IA:13	0,835	1,115	1,453	1,453	IR:13	0,702	0,512	0,626	0,626
IA:14	0,665	0,415	0,498	0,498	IR:14	0,683	1,493	1,807	1,807

Medidas de Tensão				
Medida	UI:	r^N :	e_σ	$\hat{b}$
V:1	0,148	-1,011	-1,022	-1,022
V:2	0,149	-1,499	-1,516	-1,516
V:3	0,155	-0,955	-0,966	-0,966
V:6	0,155	-1,235	-1,250	-1,250
V:8	0,149	-1,239	-1,253	-1,253
V:12	0,159	-1,229	-1,244	-1,244

As tabelas 4.9 e 4.10 apresentam os valores encontrados nas simulações considerando EGs simples, de 10σ e 20σ , na medida de magnitude de tensão na barra 12 (V:12). Tendo em vista ser uma medida com índice UI bastante baixo, igual a 0,16, conforme pode ser observado nessas tabelas, todos os métodos testados para processamento de EGs funcionaram adequadamente.

Tabela 4.9: Medidas SCADA - IEEE 14 barras com ruídos e EG de 10σ na medida V:12

Medidas SCADA									
Índice $J(x)=130,2$									
Medidas de Potência Ativa					Medida de Potência Reativa				
Medida	UI :	r^N :	e_σ :	$\hat{b}$:	Medida	UI :	r^N :	e_σ :	$\hat{b}$:
FA:1-2	0,2894	-0,2329	-0,2424	-0,2424	FR:1-2	0,5806	0,5276	0,6101	0,6101
FA:2-3	0,2435	-0,3045	-0,3134	-0,3134	FR:2-3	2,2197	-0,5356	-1,3038	-1,3038
FA:3-4	1,2785	-0,2057	-0,3339	-0,3339	FR:3-4	2,1291	-0,3466	-0,8152	-0,8152
FA:4-2	0,3223	0,3873	0,4069	0,4069	FR:4-2	1,1755	-0,4007	-0,6184	-0,6184
FA:4-5	0,4898	-0,5885	-0,6553	-0,6553	FR:4-5	0,3607	1,7380	1,8476	1,8476
FA:5-2	0,2923	1,0770	1,1220	1,1220	FR:5-2	1,1158	-0,2181	-0,3268	-0,3268
FA:5-6	0,3331	-0,1460	-0,1539	-0,1539	FR:5-6	0,4516	-2,1134	-2,3189	-2,3189
FA:6-5	0,3331	-0,1251	-0,1319	-0,1319	FR:6-5	0,9043	-0,1268	-0,1709	-0,1709
FA:6-11	0,8994	-0,4557	-0,6129	-0,6129	FR:6-11	0,8350	1,8947	2,4684	2,4684
FA:6-12	0,6049	-2,1232	-2,4815	-2,4815	FR:6-12	0,8324	-0,7970	-1,0370	-1,0370
FA:6-13	0,4538	-0,4081	-0,4482	-0,4482	FR:6-13	0,4299	-0,7060	-0,7684	-0,7684
FA:7-4	0,4202	-0,6799	-0,7375	-0,7375	FR:7-4	0,4252	-0,2085	-0,2266	-0,2266
FA:7-8	-	0,0000	0,0000	0,0000	FR:7-8	0,4175	-1,3254	-1,4363	-1,4363
FA:7-9	0,4202	-1,1329	-1,2288	-1,2288	FR:7-9	1,2166	1,6673	2,6257	2,6257
FA:8-7	-	0,0000	0,0000	0,0000	FR:8-7	0,4285	-1,2796	-1,3921	-1,3921
FA:9-4	0,4205	-0,8973	-0,9734	-0,9734	FR:9-4	1,5659	0,2629	0,4884	0,4884

Continua...

Tabela 4.9: Medidas SCADA - IEEE 14 barras com ruídos e EG de 10σ na medida V:12

FA:9-10	0,9769	-0,7238	-1,0119	-1,0119	FR:9-10	0,9239	-0,8708	-1,1856	-1,1856
FA:9-14	0,7550	0,2115	0,2650	0,2650	FR:9-14	0,7256	0,5449	0,6733	0,6733
FA:10-9	0,9756	-0,5827	-0,8141	-0,8141	FR:10-9	0,9275	-0,2057	-0,2806	-0,2806
FA:10-11	4,2392	-0,8474	-3,6910	-3,6910	FR:10-11	3,8799	-1,0300	-4,1269	-4,1269
FA:11-6	0,8922	-0,9647	-1,2928	-1,2928	FR:11-6	0,8697	1,1299	1,4975	1,4975
FA:12-13	3,2112	-2,3268	-7,8257	-7,8257	FR:12-13	3,3073	-0,9257	-3,1983	-3,1983
FA:13-6	0,4492	-0,1524	-0,1671	-0,1671	FR:13-6	0,4557	0,8224	0,9037	0,9037
FA:14-13	0,9094	1,5175	2,0511	2,0511	FR:14-13	1,2241	0,7762	1,2269	1,2269
IA:1	0,2817	0,0647	0,0672	0,0672	IR:1	1,4005	0,6241	1,0740	1,0740
IA:2	6,4959	1,1060	7,2694	7,2694	IR:2	0,6614	0,8458	1,0141	1,0141
IA:5	11,4206	-0,5198	-5,9586	-5,9586	IR:5	9,4611	1,4667	13,9537	13,9537
IA:7	-	0,0000	0,0000	0,0000	IR:7	-	0,0000	0,0000	0,0000
IA:8	-	0,0000	0,0000	0,0000	IR:8	0,4285	-1,5326	-1,6674	-1,6674
IA:9	0,7554	0,0443	0,0555	0,0555	IR:9	0,5443	0,8832	1,0055	1,0055
IA:13	0,8344	-1,4466	-1,8840	-1,8840	IR:13	0,7035	-1,3967	-1,7076	-1,7076
IA:14	0,6648	-1,9636	-2,3579	-2,3579	IR:14	0,6826	-0,7386	-0,8943	-0,8943

Medidas de Tensão

V:1	0,1483	0,2841	0,2872	0,2872
V:2	0,1491	-1,3294	-1,3441	-1,3441
V:3	0,1547	-1,7623	-1,7832	-1,7832
V:6	0,1551	0,1353	0,1369	0,1369
V:8	0,1486	-0,0323	-0,0326	-0,0326
V:12	0,1594	9,6218	9,7432	9,7432

Tabela 4.10: Medidas SCADA - IEEE 14 barras com ruídos e EG de 20σ na medida V:12

Medidas SCADA									
Índice J(x)=417,7									
Medidas de Potência Ativa					Medida de Potência Reativa				
Medida	UI :	r^N :	e_σ :	$\hat{b}$:	Medida	UI :	r^N :	e_σ :	$\hat{b}$:
FA:1-2	0,2897	-0,3660	-0,3811	-0,3811	FR:1-2	0,5806	0,5520	0,6383	0,6383
FA:2-3	0,2437	-0,4780	-0,4920	-0,4920	FR:2-3	2,2178	-0,1005	-0,2444	-0,2444
FA:3-4	1,2808	0,3737	0,6072	0,6072	FR:3-4	2,1266	0,2411	0,5665	0,5665
FA:4-2	0,3228	0,5027	0,5283	0,5283	FR:4-2	1,1739	-0,3479	-0,5365	-0,5365
FA:4-5	0,4905	-0,4001	-0,4457	-0,4457	FR:4-5	0,3604	1,6351	1,7381	1,7381
FA:5-2	0,2927	1,1690	1,2181	1,2181	FR:5-2	1,1154	-0,0268	-0,0402	-0,0402
FA:5-6	0,3333	-0,1934	-0,2038	-0,2038	FR:5-6	0,4519	-2,5484	-2,7966	-2,7966
FA:6-5	0,3333	-0,0777	-0,0819	-0,0819	FR:6-5	0,9038	0,9501	1,2807	1,2807
FA:6-11	0,8994	-0,6418	-0,8632	-0,8632	FR:6-11	0,8350	1,7139	2,2329	2,2329
FA:6-12	0,6048	-2,1228	-2,4809	-2,4809	FR:6-12	0,8323	-0,8095	-1,0532	-1,0532
FA:6-13	0,4538	-0,4142	-0,4549	-0,4549	FR:6-13	0,4299	-0,7171	-0,7805	-0,7805
FA:7-4	0,4203	-0,6537	-0,7091	-0,7091	FR:7-4	0,4251	-0,5497	-0,5973	-0,5973
FA:7-8	-	0,0000	0,0000	0,0000	FR:7-8	0,4176	-1,2376	-1,3412	-1,3412
FA:7-9	0,4203	-1,1591	-1,2574	-1,2574	FR:7-9	1,2168	2,2619	3,5626	3,5626
FA:8-7	-	0,0000	0,0000	0,0000	FR:8-7	0,4284	-1,3566	-1,4759	-1,4759
FA:9-4	0,4207	-0,8664	-0,9400	-0,9400	FR:9-4	1,5669	-0,4780	-0,8885	-0,8885
FA:9-10	0,9769	-0,6849	-0,9574	-0,9574	FR:9-10	0,9238	-0,8536	-1,1620	-1,1620
FA:9-14	0,7550	0,2837	0,3555	0,3555	FR:9-14	0,7255	0,6421	0,7932	0,7932
FA:10-9	0,9756	-0,6199	-0,8661	-0,8661	FR:10-9	0,9275	-0,2173	-0,2963	-0,2963

Continua...

Tabela 4.10: Medidas SCADA - IEEE 14 barras com ruídos e EG de 20σ na medida V:12

FA:10-11	4,2402	-0,2966	-1,2922	-1,2922	FR:10-11	3,8807	-0,5127	-2,0546	-2,0546
FA:11-6	0,8923	-0,7758	-1,0398	-1,0398	FR:11-6	0,8697	1,3290	1,7613	1,7613
FA:12-13	3,2115	-2,4434	-8,2186	-8,2186	FR:12-13	3,3074	-0,9703	-3,3528	-3,3528
FA:13-6	0,4493	-0,1401	-0,1536	-0,1536	FR:13-6	0,4557	0,8653	0,9509	0,9509
FA:14-13	0,9095	1,6249	2,1965	2,1965	FR:14-13	1,2242	0,9518	1,5045	1,5045
IA:1	0,2821	-0,0626	-0,0650	-0,0650	IR:1	1,3994	0,9018	1,5510	1,5510
IA:2	6,5056	1,0064	6,6239	6,6239	IR:2	0,6602	1,2633	1,5137	1,5137
IA:5	11,4316	0,0442	0,5073	0,5073	IR:5	9,4558	1,5544	14,7804	14,7804
IA:7	-	0,0000	0,0000	0,0000	IR:7	-	0,0000	0,0000	0,0000
IA:8	-	0,0000	0,0000	0,0000	IR:8	0,4284	-1,6096	-1,7511	-1,7511
IA:9	0,7556	0,1218	0,1526	0,1526	IR:9	0,5447	1,4489	1,6499	1,6499
IA:13	0,8345	-1,4631	-1,9056	-1,9056	IR:13	0,7035	-1,3687	-1,6734	-1,6734
IA:14	0,6649	-1,9661	-2,3611	-2,3611	IR:14	0,6827	-0,7276	-0,8810	-0,8810

Medidas de Tensão				
V:1	0,1480	0,0536	0,0541	0,0541
V:2	0,1487	-1,5617	-1,5789	-1,5789
V:3	0,1544	-2,0033	-2,0270	-2,0270
V:6	0,1547	-0,1073	-0,1086	-0,1086
V:8	0,1483	-0,2636	-0,2665	-0,2665
V:12	0,1590	19,4974	19,7422	19,7422

4.4 Falha no teste do $\hat{b}$

Os próximos dois testes considerando apenas medidas SCADA com ruído gaussiano simularam EGs de $10 \cdot \sigma$ e de $20 \cdot \sigma$ na medida de injeção de potência ativa na barra 5 ($IA : 5$), que apresenta um índice UI muito alto (11, 39).

Conforme apresentado nas próximas duas tabelas 4.11 e 4.12, para esse teste todos os métodos avaliados para processamento de EGs falham. Observe que a medida com EG não apresenta o maior resíduo normalizado. Até mesmo as estimativas dos erros obtidos pelos teste $\hat{b}$ e do e_σ não foram precisas.

Tabela 4.11: Medidas SCADA - IEEE 14 barras com ruídos e erro grosseiro de $10 \cdot \sigma$ na medida IA:5, com precisão do medidor igual a 2%

Medidas SCADA									
Índice J(x)=49,125									
Medidas de Potência Ativa					Medida de Potência Reativa				
Medida	UI :	r^N :	e_σ :	$\hat{b}$:	Medida	UI :	r^N :	e_σ :	$\hat{b}$:
FP:1-2	0,289	1,682	1,751	1,751	FR:1-2	0,581	-0,169	-0,196	-0,196
FP:2-3	0,243	0,885	0,910	0,910	FR:2-3	2,221	-1,008	-2,455	-2,455
FP:3-4	1,277	-0,486	-0,787	-0,787	FR:3-4	2,132	-1,239	-2,918	-2,918
FP:4-2	0,321	1,922	2,018	2,018	FR:4-2	1,181	0,834	1,291	1,291
FP:4-5	0,488	0,846	0,941	0,941	FR:4-5	0,361	0,173	0,184	0,184
FP:5-2	0,291	-0,419	-0,437	-0,437	FR:5-2	1,116	-1,352	-2,026	-2,026
FP:5-6	0,333	1,802	1,900	1,900	FR:5-6	0,451	-0,256	-0,280	-0,280

Continua...

Tabela 4.11: Medidas SCADA - IEEE 14 barras com ruídos e erro grosseiro de $10 \cdot \sigma$ na medida IA:5, com precisão do medidor igual a 2%

FP:6-5	0,333	1,546	1,630	1,630	FR:6-5	0,904	-0,152	-0,205	-0,205
FP:6-11	0,899	0,704	0,946	0,946	FR:6-11	0,837	0,483	0,630	0,630
FP:6-12	0,605	0,201	0,235	0,235	FR:6-12	0,831	0,174	0,227	0,227
FP:6-13	0,454	-0,193	-0,212	-0,212	FR:6-13	0,430	-0,517	-0,563	-0,563
FP:7-4	0,420	0,675	0,732	0,732	FR:7-4	0,424	0,342	0,371	0,371
FP:7-8	-	0,000	0,000	0,000	FR:7-8	0,417	0,847	0,917	0,917
FP:7-9	0,420	0,205	0,222	0,222	FR:7-9	1,215	1,161	1,827	1,827
FP:8-7	-	0,000	0,000	0,000	FR:8-7	0,428	0,381	0,415	0,415
FP:9-4	0,420	1,848	2,005	2,005	FR:9-4	1,572	1,084	2,019	2,019
FP:9-10	0,979	-0,158	-0,222	-0,222	FR:9-10	0,925	0,302	0,411	0,411
FP:9-14	0,756	-0,141	-0,176	-0,176	FR:9-14	0,725	1,451	1,792	1,792
FP:10-9	0,973	-0,364	-0,508	-0,508	FR:10-9	0,926	0,529	0,721	0,721
FP:10-11	4,245	-0,113	-0,494	-0,494	FR:10-11	3,864	-0,653	-2,605	-2,605
FP:11-6	0,893	0,607	0,814	0,814	FR:11-6	0,867	0,001	0,001	0,001
FP:12-13	3,200	0,375	1,256	1,256	FR:12-13	3,336	0,054	0,188	0,188
FP:13-6	0,449	-0,748	-0,820	-0,820	FR:13-6	0,456	0,169	0,186	0,186
FP:14-13	0,907	-0,172	-0,233	-0,233	FR:14-13	1,227	-0,419	-0,663	-0,663
IA:1	0,281	0,527	0,547	0,547	IR:1	1,402	0,414	0,713	0,713
IA:2	6,476	1,758	11,522	11,522	IR:2	0,664	-0,347	-0,417	-0,417
IA:5	11,393	0,304	3,475	3,475	IR:5	9,418	1,098	10,398	10,398
IA:7	-	0,000	0,000	0,000	IR:7	-	0,000	0,000	0,000
IA:8	-	0,000	0,000	0,000	IR:8	0,428	-1,273	-1,385	-1,385
IA:9	0,755	-1,090	-1,366	-1,366	IR:9	0,543	-0,072	-0,082	-0,082
IA:13	0,835	0,437	0,570	0,570	IR:13	0,702	-0,161	-0,197	-0,197
IA:14	0,665	0,104	0,125	0,125	IR:14	0,683	1,484	1,796	1,796

Medidas de Tensão				
Medida	UI:	r^N :	e_σ	$\hat{b}$
V:1	0,149078	-1,797703	-1,81757	-1,81757
V:2	0,149757	-0,65048	-0,657734	-0,657734
V:3	0,155429	0,020894	0,021145	0,021145
V:6	0,155808	0,498332	0,504344	0,504344
V:8	0,149259	-0,513933	-0,519626	-0,519626
V:12	0,16012	-0,21008	-0,212756	-0,212756

Tabela 4.12: Medidas SCADA - IEEE 14 barras com ruídos e erro grosseiro de $20 \cdot \sigma$ na medida IA:5, com precisão do medidor igual a 2%

Medidas SCADA									
Índice J(x)=49,125									
Medidas de Potência Ativa					Medida de Potência Reativa				
Medida	UI :	r^N :	e_σ :	$\hat{b}$:	Medida	UI :	r^N :	e_σ :	$\hat{b}$:
FP:1-2	0,289	1,859	1,935	1,935	FR:1-2	0,581	-0,268	-0,310	-0,310
FP:2-3	0,243	0,941	0,968	0,968	FR:2-3	2,221	-0,971	-2,365	-2,365
FP:3-4	1,276	-0,340	-0,551	-0,551	FR:3-4	2,132	-1,145	-2,697	-2,697
FP:4-2	0,321	1,801	1,891	1,891	FR:4-2	1,181	0,670	1,036	1,036
FP:4-5	0,488	1,490	1,658	1,658	FR:4-5	0,361	0,078	0,083	0,083
FP:5-2	0,291	-0,798	-0,831	-0,831	FR:5-2	1,116	-1,070	-1,604	-1,604

Continua...

Tabela 4.12: Medidas SCADA - IEEE 14 barras com ruídos e erro grosseiro de $20 \cdot \sigma$ na medida IA:5, com precisão do medidor igual a 2%

FP:5-6	0,333	1,647	1,736	1,736	FR:5-6	0,451	-0,338	-0,370	-0,370
FP:6-5	0,333	1,702	1,794	1,794	FR:6-5	0,905	-0,277	-0,373	-0,373
FP:6-11	0,899	0,685	0,920	0,920	FR:6-11	0,837	0,460	0,600	0,600
FP:6-12	0,605	0,199	0,233	0,233	FR:6-12	0,831	0,170	0,221	0,221
FP:6-13	0,454	-0,195	-0,214	-0,214	FR:6-13	0,430	-0,522	-0,568	-0,568
FP:7-4	0,420	0,666	0,722	0,722	FR:7-4	0,424	0,366	0,398	0,398
FP:7-8	-	0,000	0,000	0,000	FR:7-8	0,417	0,846	0,917	0,917
FP:7-9	0,420	0,215	0,233	0,233	FR:7-9	1,215	1,092	1,719	1,719
FP:8-7	-	0,000	0,000	0,000	FR:8-7	0,428	0,379	0,412	0,412
FP:9-4	0,420	1,837	1,993	1,993	FR:9-4	1,572	1,003	1,870	1,870
FP:9-10	0,979	-0,153	-0,213	-0,213	FR:9-10	0,925	0,332	0,452	0,452
FP:9-14	0,756	-0,132	-0,165	-0,165	FR:9-14	0,725	1,469	1,815	1,815
FP:10-9	0,973	-0,370	-0,517	-0,517	FR:10-9	0,926	0,498	0,679	0,679
FP:10-11	4,245	-0,059	-0,256	-0,256	FR:10-11	3,864	-0,597	-2,381	-2,381
FP:11-6	0,893	0,625	0,838	0,838	FR:11-6	0,867	0,019	0,026	0,026
FP:12-13	3,200	0,369	1,238	1,238	FR:12-13	3,336	0,048	0,168	0,168
FP:13-6	0,449	-0,747	-0,819	-0,819	FR:13-6	0,456	0,167	0,184	0,184
FP:14-13	0,907	-0,166	-0,225	-0,225	FR:14-13	1,226	-0,413	-0,654	-0,654
IA:1	0,281	0,733	0,761	0,761	IR:1	1,402	0,552	0,951	0,951
IA:2	6,477	1,783	11,686	11,686	IR:2	0,663	-0,122	-0,147	-0,147
IA:5	11,392	1,178	13,473	13,473	IR:5	9,420	0,859	8,133	8,133
IA:7	-	0,000	0,000	0,000	IR:7	-	0,000	0,000	0,000
IA:8	-	0,000	0,000	0,000	IR:8	0,428	-1,276	-1,388	-1,388
IA:9	0,755	-1,103	-1,383	-1,383	IR:9	0,543	-0,201	-0,228	-0,228
IA:13	0,835	0,436	0,567	0,567	IR:13	0,702	-0,168	-0,205	-0,205
IA:14	0,665	0,100	0,120	0,120	IR:14	0,683	1,467	1,776	1,776

Medidas de Tensão				
Medida	UI:	r^N :	e_σ	$\hat{b}$
V:1	0,149127	-1,743154	-1,762431	-1,762431
V:2	0,149806	-0,597444	-0,60411	-0,60411
V:3	0,15548	0,0753	0,076205	0,076205
V:6	0,155854	0,54756	0,55417	0,55417
V:8	0,149302	-0,466454	-0,471624	-0,471624
V:12	0,160169	-0,159415	-0,161447	-0,161447

Tendo em vista os resultados dos últimos dois testes, realizou-se outros dois testes, nas mesmas condições, mas agora considerando uma precisão de 5% para as medidas SCADA. Recordando que nos testes anteriores essa precisão era de 2%.

Conforme os resultados apresentados nas próximas duas tabelas 4.13 e 4.14, assim como aconteceu para os dois testes anteriores, todos os métodos avaliados para processamento de EGs falham. Observe que a medida com EG não apresenta o maior resíduo normalizado. Entretanto, as estimativas dos erros obtidos pelos teste $\hat{b}$ e do e_σ foram mais precisas.

Tabela 4.13: Medidas SCADA - IEEE 14 barras com ruídos e erro grosseiro de $10 \cdot \sigma$ na medida IA:5, com precisão do medidor igual a 5%

Medidas SCADA				
---------------	--	--	--	--

Continua...

Tabela 4.13: Medidas SCADA - IEEE 14 barras com ruídos e erro grosseiro de $10 \cdot \sigma$ na medida IA:5, com precisão do medidor igual a 5%

Índice J(x)=46,381									
Medidas de Potência Ativa					Medida de Potência Reativa				
Medida	UI :	r^N :	e_σ :	$\hat{b}$:	Medida	UI :	r^N :	e_σ :	$\hat{b}$:
FP:1-2	0,289	-1,478	-1,539	-1,539	FR:1-2	-0,181	0,580	-0,210	-0,210
FP:2-3	0,243	-0,882	-0,908	-0,908	FR:2-3	0,613	2,225	1,494	1,494
FP:3-4	1,276	0,487	0,789	0,789	FR:3-4	0,897	2,135	2,114	2,114
FP:4-2	0,322	0,978	1,028	1,028	FR:4-2	-0,482	1,177	-0,744	-0,744
FP:4-5	0,489	-0,793	-0,883	-0,883	FR:4-5	1,208	0,361	1,284	1,284
FP:5-2	0,292	0,628	0,654	0,654	FR:5-2	0,730	1,116	1,095	1,095
FP:5-6	0,333	0,387	0,408	0,408	FR:5-6	-0,053	0,451	-0,058	-0,058
FP:6-5	0,333	-0,827	-0,872	-0,872	FR:6-5	-0,978	0,902	-1,317	-1,317
FP:6-11	0,899	-0,896	-1,206	-1,206	FR:6-11	0,063	0,835	0,082	0,082
FP:6-12	0,605	-0,275	-0,322	-0,322	FR:6-12	1,136	0,833	1,478	1,478
FP:6-13	0,454	1,034	1,135	1,135	FR:6-13	0,240	0,430	0,262	0,262
FP:7-4	0,420	-0,973	-1,055	-1,055	FR:7-4	-1,176	0,425	-1,278	-1,278
FP:7-8	-	0,000	0,000	0,000	FR:7-8	0,410	0,417	0,444	0,444
FP:7-9	0,420	0,338	0,367	0,367	FR:7-9	0,422	1,216	0,665	0,665
FP:8-7	-	0,000	0,000	0,000	FR:8-7	-2,137	0,429	-2,325	-2,325
FP:9-4	0,421	0,576	0,625	0,625	FR:9-4	2,363	1,565	4,389	4,389
FP:9-10	0,977	0,484	0,677	0,677	FR:9-10	0,738	0,924	1,004	1,004
FP:9-14	0,755	1,271	1,593	1,593	FR:9-14	-0,713	0,726	-0,881	-0,881
FP:10-9	0,976	0,825	1,153	1,153	FR:10-9	-0,434	0,927	-0,592	-0,592
FP:10-11	4,239	-0,473	-2,060	-2,060	FR:10-11	1,425	3,880	5,708	5,708
FP:11-6	0,892	-1,070	-1,434	-1,434	FR:11-6	1,118	0,870	1,482	1,482
FP:12-13	3,211	1,223	4,112	4,112	FR:12-13	1,427	3,307	4,929	4,929
FP:13-6	0,449	-1,539	-1,688	-1,688	FR:13-6	-1,321	0,456	-1,451	-1,451
FP:14-13	0,909	-0,615	-0,831	-0,831	FR:14-13	-1,287	1,224	-2,035	-2,035
IA:1	0,281	-0,450	-0,467	-0,467	IR:1	0,753	1,402	1,296	1,296
IA:2	6,484	-0,430	-2,819	-2,819	IR:2	0,842	0,664	1,011	1,011
IA:5	11,413	-1,136	-13,019	-13,019	IR:5	0,085	9,462	0,804	0,804
IA:7	-	0,000	0,000	0,000	IR:7	-	0,000	0,000	0,000
IA:8	-	0,000	0,000	0,000	IR:8	1,306	0,429	1,421	1,421
IA:9	0,755	1,103	1,382	1,382	IR:9	-2,082	0,544	-2,370	-2,370
IA:13	0,834	1,940	2,526	2,526	IR:13	1,351	0,703	1,651	1,651
IA:14	0,665	2,808	3,372	3,372	IR:14	0,886	0,683	1,073	1,073

Medidas de Tensão				
Medida	UI:	r^N :	e_σ	$\hat{b}$
V:1	0,149	-1,265	-1,279	-1,279
V:2	0,149	-0,329	-0,333	-0,333
V:3	0,155	0,870	0,881	0,881
V:6	0,155	-0,224	-0,227	-0,227
V:8	0,149	-0,353	-0,357	-0,357
V:12	0,160	-1,299	-1,315	-1,315

Tabela 4.14: Medidas SCADA - IEEE 14 barras com ruídos e erro grosseiro de $20 \cdot \sigma$ na medida IA:5, com precisão do medidor igual a 5%

Medidas SCADA

Continua...

Tabela 4.14: Medidas SCADA - IEEE 14 barras com ruídos e erro grosseiro de $20 \cdot \sigma$ na medida IA:5, com precisão do medidor igual a 5%

Índice J(x)=49,125									
Medidas de Potência Ativa					Medida de Potência Reativa				
Medida	UI :	r^N :	e_σ :	$\hat{b}$:	Medida	UI :	r^N :	e_σ :	$\hat{b}$:
FP:1-2	-1,655	0,289	-1,723	-1,723	FR:1-2	-0,083	0,581	-0,096	-0,096
FP:2-3	-0,938	0,243	-0,966	-0,966	FR:2-3	0,577	2,223	1,407	1,407
FP:3-4	0,342	1,277	0,555	0,555	FR:3-4	0,804	2,134	1,896	1,896
FP:4-2	1,099	0,322	1,155	1,155	FR:4-2	-0,317	1,176	-0,490	-0,490
FP:4-5	-1,437	0,489	-1,600	-1,600	FR:4-5	1,298	0,361	1,380	1,380
FP:5-2	1,006	0,292	1,048	1,048	FR:5-2	0,452	1,116	0,677	0,677
FP:5-6	0,543	0,333	0,572	0,572	FR:5-6	0,028	0,452	0,031	0,031
FP:6-5	-0,983	0,333	-1,036	-1,036	FR:6-5	-0,856	0,901	-1,152	-1,152
FP:6-11	-0,877	0,899	-1,180	-1,180	FR:6-11	0,085	0,835	0,111	0,111
FP:6-12	-0,273	0,605	-0,319	-0,319	FR:6-12	1,140	0,833	1,484	1,484
FP:6-13	1,036	0,454	1,137	1,137	FR:6-13	0,245	0,430	0,266	0,266
FP:7-4	-0,963	0,420	-1,045	-1,045	FR:7-4	-1,200	0,425	-1,304	-1,304
FP:7-8	-	0,000	0,000	0,000	FR:7-8	0,410	0,417	0,444	0,444
FP:7-9	0,329	0,420	0,357	0,357	FR:7-9	0,491	1,216	0,774	0,774
FP:8-7	-	0,000	0,000	0,000	FR:8-7	-2,135	0,429	-2,323	-2,323
FP:9-4	0,586	0,421	0,636	0,636	FR:9-4	2,443	1,565	4,537	4,537
FP:9-10	0,479	0,977	0,669	0,669	FR:9-10	0,708	0,924	0,964	0,964
FP:9-14	1,262	0,755	1,582	1,582	FR:9-14	-0,731	0,726	-0,903	-0,903
FP:10-9	0,831	0,976	1,162	1,162	FR:10-9	-0,403	0,927	-0,550	-0,550
FP:10-11	-0,527	4,239	-2,293	-2,293	FR:10-11	1,369	3,880	5,485	5,485
FP:11-6	-1,088	0,892	-1,458	-1,458	FR:11-6	1,100	0,870	1,457	1,457
FP:12-13	1,228	3,211	4,130	4,130	FR:12-13	1,433	3,307	4,950	4,950
FP:13-6	-1,540	0,449	-1,688	-1,688	FR:13-6	-1,318	0,456	-1,449	-1,449
FP:14-13	-0,620	0,909	-0,839	-0,839	FR:14-13	-1,292	1,224	-2,043	-2,043
IA:1	-0,655	0,281	-0,681	-0,681	IR:1	0,614	1,402	1,057	1,057
IA:2	-0,456	6,481	-2,991	-2,991	IR:2	0,619	0,665	0,743	0,743
IA:5	-2,007	11,414	-23,000	-23,000	IR:5	0,319	9,459	3,032	3,032
IA:7	-	0,000	0,000	0,000	IR:7	-	0,000	0,000	0,000
IA:8	-	0,000	0,000	0,000	IR:8	1,309	0,429	1,424	1,424
IA:9	1,116	0,756	1,399	1,399	IR:9	-1,953	0,544	-2,223	-2,223
IA:13	1,942	0,834	2,529	2,529	IR:13	1,357	0,703	1,659	1,659
IA:14	2,813	0,665	3,377	3,377	IR:14	0,903	0,683	1,093	1,093
Medidas de Tensão									
Medida	UI:	r^N :	e_σ	$\hat{b}$					
V:1	-1,319	0,149	-1,334	-1,334					
V:2	-0,382	0,149	-0,387	-0,387					
V:3	0,816	0,155	0,826	0,826					
V:6	-0,273	0,155	-0,276	-0,276					
V:8	-0,400	0,149	-0,405	-0,405					
V:12	-1,349	0,160	-1,366	-1,366					

4.5 Influência de EGs em medidas com alto e baixo índices UI s nos erros das estimativas das variáveis de estado

As simulações que serão apresentadas a seguir visam comprovar que, apesar de os EGs simples em medidas com alto índice UI não afetarem de forma significativa os resíduos das medidas, eles afetam as estimativas do estimador WLS tanto quanto, ou, até mesmo, de forma mais significativa, que os EGs em medidas com baixo índice UI .

Para realizar as simulações foi selecionada, aleatoriamente, uma das diversas amostras com ruídos gaussianos geradas neste trabalho. Para avaliar as estimativas calcular-se-ão, para cada caso simulado, os erros médios das estimativas das variáveis de estado, em valores percentuais, considerando planos de medição contendo EGs simples em medidas de alto e baixo UI s, conforme apresentado na equação 4.3:

$$e\% = \left| \frac{x^{ref} - \hat{x}}{x^{ref}} \right| \cdot 100 \quad (4.3)$$

4.5.1 Sistema do IEEE de 14 barras

Nesta seção serão apresentadas e analisadas duas simulações, considerando o sistema do IEEE de 14 barras. As duas simulações foram realizadas a partir da mesma amostra de 70 medidas com ruído. A diferença entre as duas simulações é a seguinte:

- Na primeira simulação foi inserido um EG de 20σ na medida de injeção de potência ativa na barra 5 (IA:5), que possui um índice UI bastante elevado (11,39). Vale destacar que não é possível detectar a presença desse EG através dos métodos baseados na análise dos resíduos (teste do maior resíduo normalizado, teste- $\hat{b}$ e do índice $J(\underline{x})$). Desta forma esse EG afetaria a precisão das estimativas;
- Na segunda simulação foi inserido um EG de 4σ para medida de injeção de potência ativa na barra 1 (IA:1), que possui um índice UI pequeno (0,281). Importa mencionar que esse EG é detectável através dos métodos baseados na análise dos resíduos (teste do maior resíduo normalizado, teste- $\hat{b}$ e do índice $J(\underline{x})$). Porém, para analisar o efeito desse EG nas estimativas, serão consideradas as variáveis de estado estimadas considerando a presença desse EG.

A tabela 4.15 apresenta os erros das estimativas das variáveis de estado para essas duas simulações.

Analisando os resultados apresentados na tabela 4.15 conclui-se que o EG não detectável na medida de alto UI IA:5 afeta a precisão das estimativas de forma bem mais significativa que o EG detectável na medida de baixo UI IA:1. Logo, justifica-se, mais uma vez,

Tabela 4.15: Comparação dos Erros nas Estimativas das variáveis de estado considerando: (1) EG não detectável de 20σ em uma medida de alto UI (IA:5); e (2) EG detectável de 4σ em uma medida de baixo UI (IA:1).

	Com EG IA:5 (20σ)		Com EG IA:1 (4σ)	
	$\theta\%$	V%	$\theta\%$	V%
1		0,1156		0,0455
2	0,1955	0,1155	0,0107	0,0393
3	0,0416	0,1173	0,0068	0,0394
4	0,1798	0,1095	0,0049	0,0387
5	0,3193	0,1038	0,0118	0,0399
6	0,0663	0,1037	0,0141	0,0441
7	0,0960	0,1028	0,0198	0,0446
8	0,0969	0,0918	0,0206	0,0487
9	0,0644	0,1060	0,0272	0,0448
10	0,0592	0,1054	0,0258	0,0467
11	0,0347	0,1044	0,0055	0,0466
12	0,0643	0,0999	0,0318	0,0519
13	0,0764	0,1004	0,0456	0,0528
14	0,0989	0,1008	0,0854	0,0561
Maior	0,3193	0,1173	0,0854	0,0561
Menor	0,0347	0,0918	0,0049	0,0387
Média	0,1072	0,1055	0,0238	0,0456
DP	0,0799	0,0070	0,0219	0,0054

a necessidade de pesquisas para desenvolvimento de metodologias que possibilitem o processamento de EGs em medidas de alto UI .

4.5.2 Sistema do IEEE de 30 barras

Nesta seção serão apresentadas e analisadas três simulações, considerando o sistema do IEEE de 30 barras. As três simulações foram realizadas a partir da mesma amostra de 122 medidas com ruído, nos mesmos moldes das duas simulações realizadas para o sistema de 14 barras do IEEE apresentadas na seção anterior. Ou seja, considerando: (1) EG detectável em uma medida com baixo UI (neste caso um EG de 5σ na medida de fluxo de potência reativa da barra 9 para barra 11 (FR:9-11) que possui $UI = 0,47$); e (2) EG não detectável em uma medida com alto UI (neste caso um EG de 5σ na medida de fluxo de potência reativa da barra 3 para barra 4 (FR:3-4) que possui $UI = 9,75$).

A tabela 4.16 apresenta os erros das estimativas das variáveis de estado para essas duas simulações.

Analisando os resultados apresentados na tabela 4.16 conclui-se, da mesma forma que na seção anterior, que o EG não detectável na medida de alto UI (FR:3-4 neste caso) afeta a precisão das estimativas de forma bem mais significativa que o EG detectável na

Tabela 4.16: Comparação dos Erros nas Estimativas das variáveis de estado considerando: (1) EG detectável de 5σ em uma medida de baixo UI (FR:9-11); e (2) EG não detectável de 5σ em uma medida de alto UI (FR:3-4).

	Com EG na medida FR:9-11		Com EG na medida FR:3-4	
	$\theta\%$	V%	$\theta\%$	V%
1		0,2832		0,2991
2	0,2615	0,2812	0,3258	0,2994
3	0,2839	0,2893	0,3918	0,3063
4	0,2312	0,2889	0,3034	0,3097
5	0,3780	0,2852	0,4369	0,3045
6	0,2910	0,2898	0,3620	0,3094
7	0,2955	0,2888	0,3594	0,3086
8	0,3142	0,2910	0,3840	0,3109
9	0,3250	0,2804	0,4001	0,2895
10	0,3358	0,2742	0,4116	0,2910
11	0,3250	0,2837	0,4003	0,2650
12	0,3398	0,2720	0,4146	0,2899
13	0,3390	0,2589	0,4139	0,2758
14	0,4189	0,2580	0,5024	0,2757
15	0,3616	0,2791	0,4370	0,2972
16	0,3224	0,2764	0,3969	0,2943
17	0,3237	0,2795	0,3984	0,2969
18	0,3772	0,2861	0,4510	0,3046
19	0,3777	0,2881	0,4511	0,3067
20	0,3705	0,2852	0,4443	0,3037
21	0,3590	0,2880	0,4334	0,3057
22	0,3589	0,2875	0,4333	0,3051
23	0,3700	0,2915	0,4439	0,3100
24	0,3761	0,3004	0,4492	0,3190
25	0,3753	0,3005	0,4478	0,3200
26	0,3986	0,3155	0,4705	0,3358
27	0,3475	0,2952	0,4198	0,3149
28	0,3055	0,2915	0,3764	0,3113
29	0,3275	0,3002	0,4022	0,3210
30	0,3452	0,3085	0,4180	0,3300
Maior	0,4189	0,3155	0,5024	0,3358
Menor	0,2312	0,2580	0,3034	0,2650
Média	0,3392	0,2866	0,4131	0,3037
DP	0,0415	0,0122	0,0420	0,0153

medida de baixo UI (FR:9-11 neste caso).

A última simulação desse capítulo foi realizada para analisar o erro provocado, por EGs simples em medidas com alto e baixo UI , nas estimativas das variáveis de estado calculado em relação às estimativas obtidas através de medidas com ruído, de acordo com a equação 4.4. Observe que nas simulações apresentadas anteriormente, o erro das

estimativas foi calculado em relação aos valores de referência das variáveis de estado.

$$e\% = \left| \frac{\hat{x}^{ruídos} - \hat{x}}{\hat{x}^{ruídos}} \right| \cdot 100 \quad (4.4)$$

Essa simulação foi realizada para demonstrar que mesmo considerando as variáveis de estado estimadas a partir de medidas com ruído, o erro não-detectável (em uma medida de alto índice UI) pode afetar mais os erros das estimativas das variáveis de estado que um erro detectável (em uma medida de baixo índice UI). Os resultados encontrados são apresentados na tabela 4.17

Esses resultados destacam, mais uma vez, a importância de pesquisas para desenvolvimento de metodologias que possibilitem o processamento de EGs em medidas de alto UI .

4.6 Considerações finais

Com base nos resultados de diversas simulações computacionais, alguns dos quais apresentados e analisados neste capítulo, pode-se concluir:

- ❑ O índice UI realmente qualifica as medidas de acordo com as suas características de não refletirem grande parcela de seus erros nos resíduos do processo de estimação de estado por WLS;
- ❑ As medidas com maiores UI são aquelas cujos EGs são mais difíceis de serem detectados através de métodos que fazem uso da análise dos resíduos do estimador WLS. Isto porque os erros dessas medidas são, de certa forma, *maskados*, isto é, não são refletidos nos resíduos das mesmas;
- ❑ Os valores de $\hat{b}$ e do e_σ calculados foram os mesmos em todos os casos, comprovando o que foi mostrado na seção 3.6;
- ❑ Para simular o efeito de EGs simples, as primeiras simulações realizadas não consideravam ruído algum nas demais medidas do sistema de medição analisado. Ou seja, com exceção da medida simulada como portadora de EG, para as demais medidas foram considerados os respectivos valores de referência obtidos pelo ANAREDE. Para essas simulações, a medida portadora de EG foi sempre aquela que apresentou o maior resíduo normalizado. Porém, dependendo do índice UI da medida portadora de EG, o valor do respectivo resíduo normalizado pode ser ou não menor que o limiar de detecção pelo teste do maior resíduo normalizado. Dessa forma, para medidas com elevados índices UI o teste do resíduo normalizado falhou e os testes $\hat{b}$ e do erro composto funcionaram na detecção, identificação e estimação do erro grosseiro (estimação em relação ao número de desvios padrão de erro). Já para medidas com baixo índice UI , isto é, com $UI \leq 1,2$, todas as técnicas de processamento testadas

Tabela 4.17: Comparação dos Erros nas Estimativas das variáveis de estado em relação a amostra com ruídos das medidas considerando: (1) EG não-detectável de 5σ em uma medida de alto UI (FR:3-4); e (2) EG detectável de 5σ em uma medida de baixo UI (FR:9-11).

	Com EG na medida FR:3-4		Com EG na medida FR:9-11	
1		0,0074		0,0236
2	0,0126	0,0054	0,0510	0,0240
3	0,0629	0,0074	0,0420	0,0248
4	0,0253	0,0042	0,0457	0,0253
5	0,0064	0,0053	0,0520	0,0249
6	0,0152	0,0047	0,0550	0,0245
7	0,0095	0,0049	0,0538	0,0251
8	0,0136	0,0047	0,0554	0,0248
9	0,0099	0,0047	0,0645	0,0139
10	0,0079	0,0048	0,0673	0,0218
11	0,0099	0,0045	0,0648	0,0141
12	0,0094	0,0046	0,0647	0,0227
13	0,0094	0,0044	0,0647	0,0216
14	0,0070	0,0049	0,0758	0,0228
15	0,0078	0,0048	0,0669	0,0231
16	0,0085	0,0047	0,0654	0,0228
17	0,0079	0,0048	0,0662	0,0224
18	0,0072	0,0049	0,0660	0,0236
19	0,0070	0,0049	0,0658	0,0237
20	0,0072	0,0048	0,0660	0,0235
21	0,0075	0,0049	0,0663	0,0228
22	0,0075	0,0049	0,0663	0,0228
23	0,0074	0,0049	0,0660	0,0236
24	0,0071	0,0050	0,0654	0,0238
25	0,0075	0,0050	0,0644	0,0247
26	0,0070	0,0051	0,0643	0,0257
27	0,0080	0,0049	0,0638	0,0248
28	0,0139	0,0047	0,0562	0,0249
29	0,0067	0,0050	0,0674	0,0262
30	0,0059	0,0052	0,0664	0,0269
Maior	0,0629	0,0074	0,0758	0,0269
Menor	0,0059	0,0042	0,0420	0,0139
Média	0,0111	0,0050	0,0620	0,0233
DP	0,0107	0,0007	0,0075	0,0028

funcionaram quando não foi considerado ruído algum nas medidas simuladas sem EG;

- Conforme observado em Monticelli e Garcia (1983), o método do índice $J(\underline{x})$ apresentou os piores resultados. Falhando até mesmo em algumas situações em que os EGs foram simulados em medidas com índice UI relativamente baixos;

- Nas simulações de EGs simples, nas quais foram inseridos ruídos gaussianos nas demais medidas do sistema em teste, além do EG em uma das medidas, em dois casos simulados, considerando EGs em medidas com elevado índice UI , o maior resíduo normalizado não foi o da medida portadora de EG. Dessa forma, todos os métodos para processamento de EGs testados falharam nessas simulações. Mesmo os testes $\hat{b}$ e do erro composto. Isso já demonstra a necessidade de melhorias no processamento de EGs. Observe que isso ocorre porque uma medida com elevado índice UI vai mascarar grande parte do seu erro e seu resíduo normalizado será baixo, mesmo quando portadora de EG. E, por outro lado, uma medida com baixo UI vai refletir grande parte de qualquer ruído que ela possua no respectivo resíduo. Dessa forma, um ruído em uma medida com UI baixo pode proporcionar um resíduo normalizado maior que o resíduo normalizado de uma medida com elevado UI com EG;
- Medidas de alto índice UI , com EGs não detectáveis, podem apresentar estimativas das variáveis de estado menos precisas do que medidas de índice UI baixo com EG detectáveis. Isso também infere a necessidade de desenvolvimento de técnicas de processamento de EGs que consigam detectar EGs em medidas com elevados índices UI s.

Como foi mostrado em (BENEDITO, 2011), um dos fatores que mais influenciam, no valor do índice UI , é a ponderação das medidas. Dessa maneira, vislumbrou-se a necessidade de um estudo para analisar a influência da ponderação das medidas no índice UI e na exatidão das estimativas das variáveis de estado. Esse estudo será realizado no próximo capítulo e configura em uma das contribuições desta dissertação de mestrado.

Influência da Ponderação das Medidas no índice UI e na exatidão das estimativas

5.1 Introdução

As simulações apresentadas no capítulo anterior, inserindo ruído nas medidas, foram realizadas para comprovar os aspectos teóricos do índice UI e para demonstrar a necessidade de pesquisas no sentido de desenvolvimento de métodos que possibilitem o processamento de EGs em medidas com alto UI . Dessa forma, as medidas foram ponderadas com base nos desvios padrão utilizados para geração dos ruídos. Entretanto, na prática, não conhecemos os desvios padrão das medidas. Na verdade não podemos nem mesmo afirmar que o ruído das medidas apresenta uma distribuição gaussiana. Dessa forma, os resultados e as análises apresentados no capítulo anterior comprovam os aspectos teóricos do índice UI , considerando a hipótese de que na ausência de EGs os ruídos das medidas são gaussianos, com média nula e desvio padrão conhecido.

Este capítulo tem um foco mais prático, no sentido de verificar a maneira mais adequada para definição da ponderação das medidas, fazendo uso apenas de informações que estão disponíveis na prática. Entretanto, considerar-se-á, ainda, a hipótese de os ruídos das medidas apresentarem distribuição gaussiana de média zero na ausência de EGs. Porém, para definição dos desvios padrão das medidas, que serão utilizados para ponderação no processo de estimação de estado, não serão considerados os utilizados para geração de ruídos, pois essa informação não está disponível na prática.

Neste capítulo considerar-se-á como adequada a ponderação que: (i) proporcionará um valor menor de UI para as medidas; (ii) permitirá a obtenção de estimativas de melhor exatidão; e (iii) Melhorar a eficiência das técnicas de processamento de EGs, baseadas na análise dos resíduos do estimador WLS, na ocorrência de EGs simples.

De acordo com a literatura diversas pesquisas já foram realizadas para definição da

ponderação das medidas no processo de estimação de estado WLS.

Em (ABUR, 1990; ABUR; CELIK, 1991; CELIK; ABUR, 1992; BALDICK et al., 1997; HANDSCHIN et al., 1975; GÓMEZ-EXPÓSITO et al., 2011; HANDSCHIN; KLIOKYS, 1995; MILI; CUTSEM; RIBBENS-PAVELLA, 1984; CUTSEM; QUINTANA, 1988; KORRES; MANOUSAKIS, 2011) foram definidos valores constantes para ponderação de medidas do mesmo tipo (injeção de potência, fluxo de potência, amplitude de tensão, etc.), independente do valor medido e da precisão do medidor envolvido.

Em (XIAOLI et al., 2015) verificou-se que não se deve utilizar valores constantes para ponderação de medidas, mesmo para medidas do mesmo tipo.

Para salientar a importância do problema tratado neste capítulo, importa ressaltar que uma sessão técnica do IEEE Power and Energy Society General Meeting realizado em julho de 2017, na cidade de Chicago, Estados Unidos, dedicou-se exclusivamente ao problema de ponderação de medidas para efeito de estimação de estado.

Em estudos realizados no grupo de pesquisa do LACO-SEP, no qual este trabalho está inserido, após a análise de diversos trabalhos da literatura determinaram-se dois procedimentos para definição da ponderação das medidas com base em informações disponíveis na prática, bem como na hipótese de os ruídos das medidas apresentarem distribuição normal de média zero. Esses procedimentos propõem a ponderação das medidas com base em um desvio padrão, calculado de acordo com a equação apresentada no capítulo 4 (equação 4.1). Porém, ao invés de utilizar o valor de referência da medida (obtido por um programa de fluxo de carga), utiliza-se, no primeiro procedimento, o valor medido e, no segundo, o valor de fundo de escala do medidor (obtido em função do valor medido), conforme utilizado em (BENEDITO, 2011; CASTILLO, 2010).

Face ao exposto, serão avaliados então três procedimentos para ponderação de medidas:

1. **Sigma Com Base no Valor Medido (σ^{VM})**- as medidas serão ponderadas com base no valor de desvio padrão (inverso do quadrado do desvio padrão) calculado através da seguinte equação:

$$\sigma_i^{VM} = \frac{pr \cdot z_i^m}{3} \quad (5.1)$$

Onde:

σ_i^{VM} : valor do desvio padrão da medida i com base no valor medido;

pr : precisão do medidor conforme definido no capítulo anterior (2% para medidas SCADA);

z_i^m : valor medido da medida i .

2. **Sigma Com Base no Valor de Fundo de Escala (σ^{FE})**- as medidas serão ponderadas com base no valor de desvio padrão (inverso do quadrado do desvio padrão) calculado através da seguinte equação:

$$\sigma_i^{FE} = \frac{pr \cdot FE}{3} \quad (5.2)$$

Onde:

- σ_i^{FE} : valor do desvio padrão da medida i com base no valor do fundo de escala;
- pr : precisão do medidor conforme definido no capítulo anterior (2% para medidas SCADA);
- FE : valor do fundo de escala de cada medidor definido a partir do valor medido (neste trabalho a relação entre o valor medido e o correspondente valor de fundo de escala utilizada para realização das simulações é apresentada na tabela 5.1).

Tabela 5.1: Fundo de Escala

Faixa de Valores	FE
$2,00 \leq z^m $	2,80
$1,00 \leq z^m < 2,00$	2,00
$0,65 \leq z^m < 1,00$	1,00
$0,35 \leq z^m < 0,65$	0,65
$0,20 \leq z^m < 0,35$	0,35
$0,10 \leq z^m < 0,20$	0,20
$0,05 \leq z^m < 0,10$	0,10
$0,00 \leq z^m < 0,05$	0,05

3. **Sigma Com Valor Constante para cada Tipo de medida (σ^{ct})**- os valores para sigma constante utilizados neste trabalho para ponderação das medidas SCADA são aqueles apresentados na Tabela 5.2. Vale destacar que esses valores foram propostos em (GÓMEZ-EXPÓSITO et al., 2011).

Tabela 5.2: Valores de σ^{ct} Constante

Medidas	σ
SCADA	
Fluxo de Potência	0,02
Injeção de Potência	0,015
Magnitude de Tensão	0,01

A geração de ruído nas medidas será realizada de acordo com o algoritmo apresentado no capítulo 4, seção 4.2.

5.2 Simulações Computacionais

Para possibilitar as análises computacionais propostas neste capítulo, foram utilizados os sistemas de 14 e de 30 barras do IEEE. A partir dos resultados de um programa de fluxo de carga (ANERED), foi construído um plano de medição com 70 e 122 medidas (as tabelas 5.3 e 5.4 mostram os valores de referência), respectivamente, para esses sistemas.

Destaca-se que esses dois planos de medição não possuem medidas críticas e conjuntos críticos de medidas.

Tabela 5.3: Medidas SCADA sem ruídos e seus respectivos desvios Padrão 14 barras

Medidas de Potência Ativa			Medidas de Potência Reativa		
Medida	Valor(pu)	σ (pu)	Medida	Valor(pu)	σ (pu)
FA:1-2	1,568824	0,010459	FR:1-2	-0,20407	0,00136
FA:2-3	0,732379	0,004883	FR:2-3	0,035591	0,000237
FA:3-4	-0,232869	0,001552	FR:3-4	0,044738	0,000298
FA:4-2	-0,544543	0,00363	FR:4-2	0,030189	0,000201
FA:4-5	-0,611578	0,004077	FR:4-5	0,158232	0,001055
FA:5-2	-0,40612	0,002707	FR:5-2	-0,02101	0,00014
FA:5-6	0,440874	0,002939	FR:5-6	0,124753	0,000832
FA:6-5	-0,440874	0,002939	FR:6-5	-0,08055	0,000537
FA:6-11	0,073509	0,00049	FR:6-11	0,035602	0,000237
FA:6-12	0,077872	0,000519	FR:6-12	0,025048	0,000167
FA:6-13	0,177497	0,001183	FR:6-13	0,072184	0,000481
FA:7-4	-0,28073	0,001872	FR:7-4	0,113831	0,000759
FA:7-8	0	0,000028	FR:7-8	-0,1716	0,001144
FA:7-9	0,280728	0,001872	FR:7-9	0,05778	0,000385
FA:8-7	0	0,000028	FR:8-7	0,1762	0,001175
FA:9-4	-0,160791	0,001072	FR:9-4	0,017316	0,000115
FA:9-10	0,05227	0,000348	FR:9-10	0,042189	0,000281
FA:9-14	0,094267	0,000628	FR:9-14	0,036099	0,000241
FA:10-9	-0,052141	0,000348	FR:10-9	-0,04185	0,000279
FA:10-11	-0,037853	0,000252	FR:10-11	-0,01616	0,000108
FA:11-6	-0,072956	0,000486	FR:11-6	-0,03444	0,00023
FA:12-13	0,016138	0,000108	FR:12-13	0,007538	0,00005
FA:13-6	-0,175376	0,001169	FR:13-6	-0,06801	0,000453
FA:14-13	-0,055882	0,000373	FR:14-13	-0,01637	0,000109
IA:1	2,32392	0,015493	IR:1	-0,16553	0,001104
IA:2	0,182985	0,00122	IR:2	0,308557	0,002057
IA:5	-0,075998	0,000507	IR:5	-0,01599	0,000107
IA:7	0	0,000028	IR:7	0	0,000028
IA:8	0	0,000028	IR:8	0,1762	0,001175
IA:9	-0,294981	0,001967	IR:9	-0,16604	0,001107
IA:13	-0,135028	0,0009	IR:13	-0,05802	0,000387
IA:14	-0,148988	0,000993	IR:14	-0,04999	0,000333
Medidas de tensão					
Medida	Valor(pu)	σ (pu)			
V:1	1,060088	0,007067			
V:2	1,04509	0,006967			
V:3	1,010093	0,006734			
V:6	1,070089	0,007134			
V:8	1,090082	0,007267			
V:12	1,055274	0,007035			

Tabela 5.4: Medidas SCADA sem ruídos e seus respectivos desvios Padrão 30 barras

Medidas de Potência Ativa			Medidas de Potência Reativa		
Medida	Valor(pu)	σ (pu)	Medida	Valor(pu)	σ (pu)

Continua...

Tabela 5.4: Medidas SCADA sem ruídos e seus respectivos desvios Padrão 30 barras

FA:1-2	1,730352	0,013333	FR:1-2	-0,21079	0,002333
FA:1-3	0,876158	0,006667	FR:1-3	0,046572	0,000333
FA:2-5	0,823615	0,006667	FR:2-5	0,01814	0,000333
FA:2-4	0,435906	0,004333	FR:2-4	0,039882	0,000333
FA:2-6	0,602987	0,004333	FR:2-6	0,005295	0,000333
FA:3-4	0,822102	0,006667	FR:3-4	-0,03584	0,000333
FA:4-2	-0,42577	0,004333	FR:4-2	-0,04784	0,000333
FA:4-6	0,721161	0,006667	FR:4-6	-0,16351	0,001333
FA:4-12	0,44283	0,004333	FR:4-12	0,142972	0,001333
FA:5-7	-0,14778	0,001333	FR:5-7	0,117221	0,001333
FA:6-28	0,18482	0,001333	FR:6-28	0	0,000333
FA:6-9	0,278235	0,002333	FR:6-9	-0,08119	0,000667
FA:6-7	0,3812	0,004333	FR:6-7	-0,02964	0,000333
FA:6-8	0,295468	0,002333	FR:6-8	-0,08156	0,000667
FA:8-28	-0,00592	0,000333	FR:8-28	-0,00394	0,000333
FA:9-11	0	0,000333	FR:9-11	-0,15712	0,001333
FA:9-10	0,277908	0,002333	FR:9-10	0,059283	0,000667
FA:12-13	0	0,000333	FR:12-13	-0,10475	0,001333
FA:12-15	0,17945	0,001333	FR:12-15	0,067917	0,000667
FA:12-16	0,072715	0,000667	FR:12-16	0,033529	0,000333
FA:15-18	0,060203	0,000667	FR:15-18	0,015977	0,000333
FA:15-23	0,051136	0,000667	FR:15-23	0,028896	0,000333
FA:18-15	-0,05982	0,000667	FR:18-15	-0,01519	0,000333
FA:18-19	0,027852	0,000333	FR:18-19	0,006167	0,000333
FA:19-20	-0,06719	0,000667	FR:19-20	-0,02795	0,000333
FA:21-22	-0,01763	0,000333	FR:21-22	-0,0145	0,000333
FA:22-24	0,059224	0,000667	FR:22-24	0,029936	0,000333
FA:23-24	0,019175	0,000333	FR:23-24	0,012152	0,000333
FA:24-25	-0,00828	0,000333	FR:24-25	0,018887	0,000333
FA:25-26	0,03552	0,000333	FR:25-26	0,023434	0,000333
FA:25-27	-0,04434	0,000333	FR:25-27	-0,00423	0,000333
FA:27-29	0,061698	0,000667	FR:27-29	0,016302	0,000333
FA:27-30	0,070747	0,000667	FR:27-30	0,016312	0,000333
FA:28-27	0,176598	0,001333	FR:28-27	0,049477	0,000333
FA:29-30	0,036997	0,000333	FR:29-30	0,005994	0,000333
IA:1	2,60651	0,018667	IR:1	-0,16422	0,001333
IA:2	0,183862	0,001333	IR:2	0,370547	0,004333
IA:5	-0,9419	0,006667	IR:5	0,178921	0,001333
IA:6	0	0,000333	IR:6	0	0,000333
IA:7	-0,22789	0,002333	IR:7	-0,10941	0,001333
IA:8	-0,30029	0,002333	IR:8	0,072264	0,000667
IA:9	0	0,000333	IR:9	0	0,000333
IA:11	0	0,000333	IR:11	0,161768	0,001333
IA:12	-0,11198	0,001333	IR:12	-0,07521	0,000667
IA:13	0	0,000333	IR:13	0,106126	0,001333
IA:15	-0,08183	0,000667	IR:15	-0,02508	0,000333
IA:16	-0,03503	0,000333	IR:16	-0,01805	0,000333
IA:17	-0,09013	0,000667	IR:17	-0,05805	0,000667
IA:19	-0,095	0,000667	IR:19	-0,03402	0,000333
IA:21	-0,17512	0,001333	IR:21	-0,11209	0,001333
IA:22	0	0,000333	IR:22	0	0,000333
IA:23	-0,03164	0,000333	IR:23	-0,0161	0,000333
IA:24	-0,08614	0,000667	IR:24	-0,06719	0,000667

Continua...

Tabela 5.4: Medidas SCADA sem ruídos e seus respectivos desvios Padrão 30 barras

IA:25	0	0,000333	IR:25	0	0,000333
IA:27	0	0,000333	IR:27	0	0,000333
IA:28	0	0,000333	IR:28	0	0,000333
IA:30	-0,1058	0,001333	IR:30	-0,01864	0,000333

Medidas de tensão		
Medida	Valor(pu)	σ (pu)
V:1	1,060187	0,013333
V:2	1,043205	0,013333
V:5	1,010087	0,013333
V:8	1,010073	0,013333
V:11	1,081965	0,013333
V:13	1,07094	0,013333
V:20	1,029659	0,013333
V:28	1,006906	0,013333

A partir dos valores obtidos pelo fluxo de carga, considerados aqui como valores de referência, foram obtidas 100 amostras de medidas, para cada um dos sistemas de medição, inserindo ruídos gaussianos de médias zero e desvios padrão calculados de acordo com a equação 4.1. Esse procedimento de geração de valores de medidas com ruído é apresentado detalhadamente na seção 4.2 do capítulo 4.

Depois de gerar todas as 100 amostras de medidas, para cada um dos planos de medição (um relativo ao sistema de 14 barras e outro ao sistema de 30 barras), o estimador de estado WLS foi executado considerando as três formas de ponderação apresentadas anteriormente. Ou seja, para cada um dos dois sistemas do IEEE o estimador de estado foi executado 300 vezes, sendo 100 vezes para cada uma das 3 formas de ponderação de medidas em análise neste capítulo.

Destaca-se que além dessas 600 simulações com ruídos gaussianos (300 para cada sistema), foram realizadas ainda simulações considerando os valores de referência para as medidas, ou seja, sem a inserção de ruídos, bem como simulações considerando EGs simples em determinadas medidas do sistema em análise. As variáveis de interesse nessas simulações, isto é, as variáveis monitoradas nas simulações, foram os índices UI das medidas e os erros das estimativas. Nas simulações considerando a presença de EGs simples, analisou-se, também, os valores do $\hat{b}$, e^σ e r^N . Para cada uma dessas grandezas foram calculados os valores médios e desvio padrão considerando as diversas amostras de medidas simuladas.

As próximas seções descreverão e apresentarão os resultados de cada uma das simulações realizadas conforme supracitado.

5.2.1 Influência da ponderação das medidas no índice UI

O objetivo das simulações discutidas nesta subseção é analisar o comportamento dos índices UI s das medidas para os três tipos de ponderações apresentadas na seção 5.1. Para isso serão utilizados os indicadores estatísticos média e desvio padrão (conforme equações 5.3 e 5.4, onde n_A representa a quantidade de amostras analisadas), aplicados aos valores de UI obtidos para as 100 amostras de medidas para cada sistema testado e para cada forma de ponderação em análise.

$$\overline{UI}_{z_i} = \frac{\sum_{j=1}^{n_A} UI_{z_i}^j}{n_A} \quad (5.3)$$

$$\sigma_{UI_{z_i}} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n_A} (UI_{z_i}^j - \overline{UI}_{z_i})^2}{n_A - 1}} \quad (5.4)$$

A partir da média do índice UI para cada medida z_i ($\overline{UI}_{z_i}$), identificaram-se as maiores e menores médias para cada tipo de ponderação e, em seguida, os indicadores estatísticos foram aplicados também para todos os valores médios de UI , de cada medida. Dessa forma, foram obtidos a média ($\overline{UI}_{\overline{UI}_z}$) e o desvio padrão ($\sigma_{\overline{UI}_z}$) dos valores médios dos índices UI das medidas, para cada um dos tipos de ponderação analisados, conforme apresentado nas equações 5.5 e 5.6, sendo m o número de medidas consideradas em cada amostra (ou seja, em cada um dos dois planos de medição considerados).

$$\overline{UI}_{\overline{UI}_z} = \frac{\sum_{i=1}^m \overline{UI}_{z_i}}{m} \quad (5.5)$$

$$\sigma_{\overline{UI}_z} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (\overline{UI}_{z_i} - \overline{UI}_{\overline{UI}_z})^2}{m - 1}} \quad (5.6)$$

Importa informar que os valores de $\sigma_{\overline{UI}_z}$, calculados pela equação 5.6, foram muito pequenos. Dessa forma, os valores apresentados nas próximas tabelas, para essas grandezas, são, na verdade, os valores calculados multiplicados por 1.000.

Analisando os indicadores estatísticos apresentados na tabela 5.5, referentes às simulações realizadas para as amostras obtidas para o sistema de 14 barras do IEEE, verifica-se que fazendo uso da ponderação com base no sigma constante (σ_i^{ct}) foram obtidos os menores valores de UI . A única exceção foram os valores dos UI s das medidas de magnitude de tensão. Observa-se, ainda, que os valores dos UI s calculados fazendo uso da ponderação com sigma baseado no valor medido (σ_i^{VM}) são próximos daqueles utilizando a ponderação com sigma baseado no valor de fundo de escala (σ_i^{FE}).

Aplicando a mesma sistemática de teste para o sistema de 30 barras do IEEE, obtém-se os resultados ilustrados na Tabela 5.6.

Tabela 5.5: Influência da ponderação das medidas no índice UI - Sistema de 14 barras do IEEE.

Ponderação	σ_i^{VM}	σ_i^{ct}	σ_i^{FE}
Potência Ativa			
Maior $\overline{UI}_{z_i}$	5,689	1,482	6,055
Menor $\overline{UI}_{z_i}$	0,141	0,161	0,137
$\overline{UI}_{\overline{UI}_z}$	0,586	0,556	0,643
$\sigma_{\overline{UI}_z}$	0,892	0,404	1,02
Potência Reativa			
Maior $\overline{UI}_{z_i}$	3,593	1,489	2,613
Menor $\overline{UI}_{z_i}$	0,161	0,16	0,21
$\overline{UI}_{\overline{UI}_z}$	0,665	0,554	0,641
$\sigma_{\overline{UI}_z}$	0,573	0,388	0,449
Tensão			
Maior $\overline{UI}_{z_i}$	0,085	0,369	0,08
Menor $\overline{UI}_{z_i}$	0,077	0,289	0,07
$\overline{UI}_{\overline{UI}_z}$	0,082	0,318	0,074
$\sigma_{\overline{UI}_z}$	0,002	0,025	0,002

Tabela 5.6: Influência da ponderação das medidas no índice UI - Sistema de 30 barras do IEEE.

Ponderação	σ_i^{VM}	σ_i^{ct}	σ_i^{FE}
Potência Ativa			
Maior $\overline{UI}_{z_i}$	13,301	1,744	9,482
Menor $\overline{UI}_{z_i}$	0,009	0,002	0,006
$\overline{UI}_{\overline{UI}_z}$	0,601	0,553	0,638
$\sigma_{\overline{UI}_z}$	1,432	0,372	1,168
Potência Reativa			
Maior $\overline{UI}_{z_i}$	3,201	1,709	2,52
Menor $\overline{UI}_{z_i}$	0,006	0,001	0,003
$\overline{UI}_{\overline{UI}_z}$	0,458	0,501	0,538
$\sigma_{\overline{UI}_z}$	0,53	0,381	0,404
Tensão			
Maior $\overline{UI}_{z_i}$	0,057	0,609	0,13
Menor $\overline{UI}_{z_i}$	0,05	0,213	0,058
$\overline{UI}_{\overline{UI}_z}$	0,054	0,282	0,066
$\sigma_{\overline{UI}_z}$	0,001	0,099	0,017

Os indicadores estatísticos referentes às simulações com o sistema de 30 barras do IEEE propiciam uma verificação muito semelhante àquela realizada para o sistema de 14 barras do IEEE. Ou seja, indica, também, que em termos de redução do valor médio do índice UI , a ponderação mais indicada é aquela baseada no sigma de valor constante para cada tipo de medida.

Em relação aos outros dois tipos de ponderação, conforme as simulações anteriores para o sistema de 14 barras do IEEE, a que faz uso do sigma baseado no valor de fundo de escala foi ligeiramente melhor do que aquela baseada simplesmente no valor medido.

5.2.2 Influência da ponderação das medidas na exatidão das estimativas

As simulações apresentadas nesta subseção têm por objetivo analisar a exatidão das estimativas obtidas a partir dos três tipos de ponderações analisadas neste capítulo. Para isso os indicadores estatísticos de média e desvio padrão dos erros das estimativas de cada uma das variáveis de estado x_i^{est} serão calculados, conforme equações 5.7 e 5.8, com base nas estimativas obtidas para as 100 amostras de medidas para cada sistema testado e para cada forma de ponderação em análise.

$$\bar{E}_{x_i} = \frac{\sum_{j=1}^{n_A} |x_{(i)j}^{est} - x_i^{referência}|}{n_A} \quad (5.7)$$

$$\sigma_{E_{x_i}} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n_A} (|x_{(i)j}^{est} - x_i^{referência}| - \bar{E}_{x_i})^2}{n_A - 1}} \quad (5.8)$$

De posse das médias dos erros de estimativas de cada uma das variáveis de estado x_i^{est} ($\bar{E}_{x_i}$), identificaram-se as maiores e menores médias, para cada tipo de ponderação, e, em seguida, os indicadores estatísticos foram aplicados também para todos os valores médios, do erro de cada variável de estado. Dessa forma, foram obtidos a média ($\bar{E}_{\bar{E}_{x_i}}$) e o desvio padrão ($\sigma_{\bar{E}_{x_i}}$) dos valores médios dos erros das estimativas, para cada um dos tipos de ponderação analisados, conforme apresentado nas equações 5.9 e 5.10, sendo n_{va} o número de variáveis de estado a serem estimadas para cada sistema testado.

$$\bar{E}_{\bar{E}_{x_i}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{va}} \bar{E}_{x_i}}{n_{va}} \quad (5.9)$$

$$\sigma_{\bar{E}_{x_i}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_{va}} (\bar{E}_{x_i} - \bar{E}_{\bar{E}_{x_i}})^2}{n_{va}}} \quad (5.10)$$

Analisando os indicadores estatísticos apresentados na Tabela 5.7, referentes às simulações realizadas com base no sistema de 14 barras do IEEE, verifica-se que as estimativas menos exatas foram obtidas através da ponderação baseada no sigma de valor constante para cada tipo de medida (σ_i^{ct}). As estimativas obtidas pelas outras duas formas de ponderação, ou seja, com sigma calculado com base no valor medido (σ_i^{VM}) e com base no fundo de escala (σ_i^{FE}), foram próximas em termos de exatidão.

Por outro lado, os indicadores estatísticos ilustrados na Tabela 5.8, referentes às simulações realizadas com base no sistema de 30 barras do IEEE, indicam que as piores estimativas, em termos de exatidão, foram obtidas através da ponderação que faz uso do sigma calculado com base no valor medido. E as estimativas mais exatas foram obtidas através da ponderação com base no sigma calculado em função do valor de fundo de escala.

Tabela 5.7: Valores estatísticos referentes aos erros das estimativas de diferentes amostras geradas e ponderadas de maneiras diferentes para o sistema de 14 barras do IEEE.

Ponderação	σ_i^{VM}	σ_i^{ct}	σ_i^{FE}
	Ângulos		
Maior $\bar{E}_{x_i}$	0,00016	0,00078	0,0002
Menor $\bar{E}_{x_i}$	0,00005	0,00028	0,00006
$\bar{E}_{\bar{E}x}$	0,00012	0,00065	0,00015
$\sigma_{\bar{E}x_i}$	0,00003	0,00015	0,00004
	Tensão		
Maior $\bar{E}_{x_i}$	0,00041	0,00132	0,00046
Menor $\bar{E}_{x_i}$	0,00039	0,00112	0,00043
$\bar{E}_{\bar{E}x}$	0,0004	0,00119	0,00044
$\sigma_{\bar{E}x_i}$	0,00001	0,00006	0,00001

Tabela 5.8: Valores estatísticos referentes aos erros das estimativas de diferentes amostras geradas e ponderadas de maneiras diferentes para o sistema de 30 barras do IEEE.

Ponderação	σ_i^{VM}	σ_i^{ct}	σ_i^{FE}
	Ângulo		
Maior $\bar{E}_{x_i}$	0,0214	0,0023	0,0024
Menor $\bar{E}_{x_i}$	0,003	0,0007	0,0002
$\bar{E}_{\bar{E}x}$	0,0108	0,0017	0,0008
$\sigma_{\bar{E}x_i}$	0,0042	0,0003	0,0005
	Tensão		
Maior $\bar{E}_{x_i}$	0,0333	0,0047	0,0014
Menor $\bar{E}_{x_i}$	0,0289	0,0022	0,0011
$\bar{E}_{\bar{E}x}$	0,0302	0,0026	0,0012
$\sigma_{\bar{E}x_i}$	0,001	0,0006	0,0001

Os resultados das simulações realizadas nesta subseção indicam que a melhor forma de ponderação em termos de exatidão das estimativas na presença de ruídos gaussianos de média zero e sem a ocorrência de EGS, dentre as três aqui comparadas, é aquela que faz uso do sigma calculado a partir do valor de Fundo de Escala. Acreditamos que esse tipo de ponderação tenha obtido resultados melhores do que os obtidos através da ponderação baseada em sigma constante em função de ela ponderar as medidas de uma forma mais adequada. Ou seja, considerando não apenas a precisão de cada medidor, mas também o valor medido, fazendo uso, para isso, do valor de fundo de escala. Lembrando que a ponderação com base em sigma constante atribui a mesma ponderação para todas as medidas de um mesmo tipo, sem considerar o valor medido. Em relação à ponderação com base no sigma calculado em função do valor medido, a ponderação baseada no sigma calculado via fundo de escala possibilitou melhores estimativas em função de a mesma não apresentar valores muito diferentes de sigma para as medidas. Isso melhora o condicionamento numérico da matriz ganho.

Para servir apenas como uma base para validação dos valores de erros das estimativas apresentados nesta subseção, na Tabela 5.9 são apresentados os maiores erros absolutos encontrados e divulgados em Zhao, Zhang e Scala (2016) e os encontrados por cada uma

das formas de ponderação analisadas neste capítulo. Em ambos os casos os resultados referem-se ao sistema de 30 barras do IEEE. Entretanto, em Zhao, Zhang e Scala (2016) foi considerado um conjunto de medidas SCADA e PMUs com ruídos gaussianos de 1% e 0,1% respectivamente, sem EGs.

Tabela 5.9: Comparação do maior erro absoluto - Sistema de 30 barras do IEEE (sem EGs e com ruídos).

	(ZHAO; ZHANG; SCALA, 2016)	
	V	θ
	0,0034	0,23
	Esse trabalho	
Ponderação	V	θ
σ_i^{VM}	0,0333	0,0214
σ_i^{ct}	0,0047	0,0023
σ_i^{FE}	0,0014	0,0024

5.2.3 Influência da ponderação das medidas, no processamento de EGs, na presença de medidas com ruído e com EGs

O objetivo das simulações realizadas nesta subseção é verificar a influência, dos três procedimentos para ponderação de medidas em análise, no processamento de EGs através de técnicas baseadas na análise dos resíduos do estimador WLS.

Para isso os indicadores estatísticos de média e desvio padrão serão aplicados para as variáveis de interesse (índice UI , r^N , $\hat{b}$ e e_σ), com base nas estimativas obtidas para as 100 amostras de medidas geradas para o sistema de 14 barras do IEEE, considerando EGs em medidas com baixo e alto índice UI . Inicialmente serão identificadas e selecionadas as medidas com os maiores e menores índices UI para cada tipo de ponderação. Em seguida, realizar-se-ão simulações computacionais, com base nas 100 amostras de medidas com ruído já geradas, mas substituindo os valores das medidas selecionadas por valores com EGs de 10σ . Se os métodos em análise não conseguirem detectar esses erros, EGs de maior magnitude serão inseridos até que os métodos sejam capazes de detectá-los.

5.2.3.1 EGs simples em medidas com altos índices UI s

A Tabela 5.10 apresenta os indicadores estatísticos calculados para as simulações realizadas considerando EGs simples em uma medida com índice UI alto para cada um dos três tipos de ponderação analisados neste capítulo. A medida com índice UI alto selecionada é a medida de injeção de potência ativa na barra 5 ($IA5$).

O primeiro caso analisou a ponderação σ^{VM} . De acordo com a Tabela 5.10 EG simples de 10σ nessa medida não foi identificado pelo teste do maior resíduo normalizado. Quando foram inseridos EGs de 18σ o teste detectou o EG, pois a medida *IA5* apresentou resíduo normalizado maior do que 3. Uma observação interessante, que representa uma vantagem dessa forma de ponderação, é que independente do valor de EG considerado, os valores estimados pelas técnicas do $\hat{b}$ e e_{σ_i} foram bem próximos da magnitude do EG considerado. Isso em função de essa forma de ponderação considerar a precisão de cada medidor e o respectivo valor medido.

Os indicadores estatísticos referentes aos resultados obtidos para ponderação com σ_i^{ct} indicam que, apesar de essa forma de ponderação gerar medidas com baixos índices *UIs* (conforma simulações realizadas anteriormente neste capítulo), essa redução não contribuiu para efetividade do processamento de EGs a partir das técnicas que fazem uso dos resíduos do estimador WLS. Observe que não foi possível detectar EG na medida de maior *UI* para essa forma de ponderação até mesmo para um EG de 30σ . Além disso, para essa forma de ponderação as estimativas de erros obtidas pelas técnicas do $\hat{b}$ e do e_{σ_i} estiveram bem distantes das magnitudes dos quatro EGs simulados. Justifica-se esse desempenho ruim, para ponderação com σ_i^{ct} , o fato de ela não considerar a relação entre as precisões dos medidores e os valores medidos.

Para a ponderação com base no σ_i^{FE} de acordo com a Tabela 5.10, não foi possível detectar a presença de EGs através da técnica do maior resíduo normalizado quando foram simulados erros de 10σ até 24σ na medida *IA5*. Quando foram inseridos EGs de 25σ o teste detectou o EG, pois a medida *IA5* apresentou resíduo normalizado maior do que 3. Observa-se, ainda, que as estimativas de erros obtidas pelas técnicas do $\hat{b}$ e do e_{σ_i} , para essa forma de ponderação, foram bem mais próximas dos EGs simulados do que as obtidas através da ponderação σ^{ct} . Porém, não foram tão próximas quanto as obtidas através da ponderação com σ^{VM} . Isto em razão de essa forma de ponderação considerar a relação entre precisão dos medidores e valores medidos (a ponderação com base no σ^{ct} não considera tal relação), mas não de uma forma direta, pois faz uso dos valores de fundo de escala (a ponderação com base no σ^{VM} considera essa relação de uma forma direta, ou seja, fazendo uso diretamente do valor medido).

Importa destacar ainda que os indicadores estatísticos apresentados na Tabela 5.10 indicam, conforma demonstrado em (BENEDITO, 2011), que os valores dos índices *UIs* praticamente não alteram com a presença de EGs nas medidas, mas alteram de forma significativa em relação à ponderação utilizada.

5.2.3.2 EGs simples em medidas com baixos índices *UIs*

A Tabela 5.11 apresenta os indicadores estatísticos calculados para as simulações realizadas considerando EGs simples nas medidas com os baixos índices *UIs*, para cada um dos três tipos de ponderação analisados neste capítulo.

Tabela 5.10: Indicadores estatísticos calculados para as simulações realizadas considerando EGs simples nas medidas com altos índices UIs para cada um dos três tipos de ponderação analisados neste capítulo

	MEDIDA	MAGNITUDE		UI_i	r_i^N	$\hat{b}_i$	e_{σ_i}
σ^{VM}	IA:5	10 σ	Média	5,348	1,883	10,238	10,238
			DP	0,036	0,940	5,114	5,114
		18 σ	Média	5,0960	3,2271	16,7407	16,7407
			DP	0,0615	1,0070	5,2265	5,2265
σ^{CT}	IA:5	10 σ	Média	1,387	0,245	0,419	0,419
			DP	0,000	0,182	0,312	0,312
	IA:5	25 σ	Média	1,387	0,503	0,859	0,859
			DP	0,000	0,228	0,390	0,390
	IA:5	30 σ	Média	1,387	0,600	1,027	1,027
			DP	0,000	0,230	0,394	0,394
σ^{FE}	IA:5	10 σ	Média	6,032	1,319	8,063	8,063
			DP	0,003	0,682	4,169	4,169
	IA:5	25 σ	Média	6,032	3,141	19,205	19,205
			DP	0,003	0,784	4,793	4,793

Os indicadores estatísticos apresentados nessa tabela possibilitam as mesmas conclusões da subseção anterior, ou seja, em termos de processamento de EGs a melhor forma de ponderação, das três analisadas neste capítulo, é a partir da ponderação com base no σ^{VM} . A pior é a ponderação que faz uso do σ^{ct} .

Tabela 5.11: Indicadores estatísticos calculados para as simulações realizadas considerando EGs simples nas medidas com baixos índices UIs para cada um dos três tipos de ponderação analisados neste capítulo

	MEDIDA	MAGNITUDE		UI_i	r_i^N	$\hat{b}_i$	e_{σ_i}
σ^{VM}	FA:5-1	10 σ	Média	0,132	9,220	9,300	9,300
			DP	0,001	0,939	0,947	0,947
σ^{CT}	FA:5-1	10 σ	Média	0,198	2,364	2,410	2,410
			DP	0,000	0,263	0,269	0,269
	FA:5-1	20 σ	Média	0,198	4,719	4,811	4,811
			DP	0,000	0,490	0,499	0,499
σ^{FE}	FA:5-1	10 σ	Média	0,149	7,132	7,211	7,211
			DP	0,001	0,727	0,735	0,735

5.3 Considerações Finais

O foco deste capítulo foi verificar a maneira mais adequada para ponderação das medidas processadas pelo estimador WLS, considerando os três seguintes procedimentos:

1. **Sigma Com Base no Valor Medido (σ^{VM})**- conforme apresentado na equação 5.1, essa forma de ponderação considera a relação entre a precisão dos medidores e os respectivos valores medidos de uma forma bem direta;
2. **Sigma Com Base no Valor de Fundo de Escala (σ^{VM})**- conforme apresentado na equação 5.2, essa forma de ponderação considera a relação entre a precisão dos medidores e os respectivos valores medidos, mas não de uma forma direta, pois faz uso do valor de fundo de escala que é definido em função do valor medido. Dessa forma as ponderações geradas por esse procedimento são mais uniformes, ou seja, com valores menos discrepantes que os valores gerados pela ponderação com base no σ^{VM} ;
3. **Sigma Com Valor Constante para cada Tipo de medida (σ^{ct})**- este tipo de ponderação não considera a relação entre a precisão do medidor e o respectivo valor medido.

As diversas simulações realizadas e discutidas neste capítulo analisaram a influência da ponderação das medidas nos valores dos índices *UIs*, na exatidão das estimativas obtidas e no processamento de EGs simples.

Para destacar as conclusões obtidas a partir das simulações realizadas, importa lembrar que para geração das 100 amostras de medidas, para cada um dos sistemas teste de 14 e 30 barras do IEEE, foi considerada a hipótese de que na ausência de EGs os ruídos das medidas apresentam distribuição gaussiana de média zero e desvio padrão calculado pela equação 4.1, apresentada no capítulo 4. Essa forma de geração de ruído foi considerada em função de os autores do trabalho acreditarem ser bem aderente às hipóteses assumidas para o modelo de medição.

Em relação ao efeito da ponderação nos valores dos índices *UIs* das medidas, a ponderação com base no σ^{ct} foi a que gerou os menores valores de índices *UIs*. As outras duas formas de ponderação, com base no σ^{VM} e σ^{FE} , geraram valores maiores de índices *UIs*. Entretanto, vale destacar que essa geração de medidas com valores menores de índices *UIs* não proporcionou uma melhoria no processamento de EGs. Pois a ponderação com σ^{ct} foi a que apresentou os piores resultados em termos de efetividade das técnicas de processamento de EGs consideradas neste capítulo para o caso de EGs simples.

Em termos de exatidão das estimativas, na presença apenas de ruídos nas medidas processadas, de uma forma geral, considerando os resultados dos dois sistemas do IEEE avaliados, a ponderação baseada no σ^{FE} foi a que obteve o melhor desempenho. Atribui-se o baixo desempenho da ponderação com base no σ^{VM} para o sistema de 30 barras do IEEE o fato de ela proporcionar valores muito discrepantes para as ponderações das medidas, resultando em matrizes ganho mal condicionadas. Fazendo uso da ponderação baseada no σ^{FE} , que considera o valor de fundo de escala e não diretamente o valor medido, conseguiu-se uma diminuição da discrepância das ponderações das medidas.

Com base nos resultados das análises da influência da ponderação no processamento de EGs, a ponderação com base no σ^{VM} foi a que obteve o melhor desempenho, acompanhada de perto da ponderação com base no σ^{FE} .

Por fim, de uma forma geral, com base em todos os resultados obtidos fica evidente a importância de estudos no sentido de definir a forma mais adequada para ponderar as medidas, uma vez que as ponderações influenciam na exatidão das estimativas, no valor do índice UI e no processamento de EGs. Dentre as ponderações analisadas, as ponderações com base no σ^{VM} e no σ^{FE} obtiveram claramente um desempenho melhor que a ponderação com base no σ^{ct} . Isso se deve pelo fato de as mesmas se aproximarem mais das hipóteses de que na ausência de EGs os ruídos das medidas apresentam distribuição gaussiana de média zero e desvio padrão calculado pela equação 4.1. Pelos resultados obtidos foi possível aferir ainda que em função dos problemas de mau condicionamento numérico que pode ser gerado pelo uso da ponderação com base no σ^{VM} , a ponderação com base σ^{FE} se mostrou a mais adequada entre os três procedimentos de ponderação analisados neste capítulo, mesmo considerando o desempenho um pouco inferior no quesito de processamento de EGs. Vale destacar ainda que para garantir uma melhor robustez numérica, o estimador de estado desenvolvido empregou o processo de reflexão ortogonal de Householder para solução da equação normal, conforme apresentado detalhadamente no anexo A.

No próximo capítulo será apresentada mais uma contribuição muito importante desta dissertação, que é a extensão da visão geométrica dos resíduos do estimador de estado WLS, baseada na obtenção e análise do índice UI (BENEDITO et al., 2013), para sistemas de medição híbridos, isto é, sistemas formados por medidas convencionais, obtidas via sistema SCADA, e por medidas fasoriais sincronizadas, obtidas pelas PMUs.

Índice UI em Sistemas de Medição Híbridos

6.1 Introdução

Neste capítulo a visão geométrica dos resíduos do estimador de estado WLS, baseada na obtenção e análise do índice UI , desenvolvida para sistemas de medição SCADA em (BENEDITO, 2011), será estendida para sistemas de medição híbridos. Ou seja, sistemas de medição contendo medidas SCADA e medidas fasoriais sincronizadas, obtidas pelas PMUs. Isto para verificar o efeito da inclusão de medidas fasoriais no valor do índice UI e no processamento de EGs. Vale lembrar que outros trabalhos já investigaram os benefícios da utilização de medidas fasoriais, juntamente com medidas SCADA, para processamento de EGs, como, por exemplo, o trabalho apresentado em Filho, Souza e Guimaraens (2014).

A próxima seção deste capítulo dedicar-se-á ao processo de estimação de estado considerando medidas convencionais SCADA e fasoriais sincronizadas, destacando, em especial, a extensão necessária, na formulação do estimador de estado WLS, para acomodação das medidas fasoriais. Em seguida, resultados de diversas simulações computacionais serão analisados para verificar a influência dessas medidas nos valores dos índices UIs e no processamento de EGs.

6.2 Medição Fasorial Sincronizada no Processo de EE SEP

Estudos para utilização de medidas fasoriais sincronizadas, no processo de estimação de estado em SEP, vêm crescendo muito nos últimos anos. Isso se deve ao fato de essas medidas apresentarem uma qualidade e precisão muito maior que as medidas convencionais SCADA. Além disso, pelo fato da existência de variáveis, cuja medição era antes impossível,

passarem a ser monitoradas através das medidas fasoriais, como é o caso dos ângulos de fase das tensões nodais e dos fasores de corrente nos ramos da rede elétrica.

Os equipamentos responsáveis pela obtenção das medidas fasoriais sincronizadas de tensão e corrente são as Phasor Measurements Units (PMUs), que foram desenvolvidas em meados da década de 80 (THORP; PHADKE; KARIMI, 1985; G; THORP; J., 1986). Esses equipamentos permitem a sincronização das medidas através do sinal de relógio do Sistema de Geoposicionamento por Satélite. A figura 6.1 ilustra a estrutura básica de uma PMUs.

Figura 6.1: Estrutura Básica de um PMU

Fonte: (EHRENSPERGER, 2004)

Pesquisas demonstram que a utilização de medidas de PMUs, no processo de EE em SEP, melhora grandemente a robustez do estimador (ZHU; ABUR, 2007; ZHOU et al., 2006; KORRES; MANOUSAKIS, 2011). É interessante observar que a utilização exclusivamente de medidas fasoriais podem tornar o problema de EE linear, uma vez que essas medidas relacionam diretamente as variáveis de estado a serem estimados (tensões complexas nodais), ao contrário das medidas convencionais SCADA de potência, as quais relacionam medidas e variáveis de estado, através de funções não lineares. Entretanto, isso só seria possível se houvessem medidas de PMUs em todas as barras do sistema e o custo de implementação desses equipamentos é muito alto.

Uma das dificuldades encontradas para utilizar medidas fasoriais sincronizadas no processo de EE é a determinação do ângulo de referência de fase para as tensões. No processo de EE convencional, fazendo uso apenas de medidas SCADA, uma das barras do sistema é adotada como referência angular, atribuindo-lhe o valor zero para o ângulo de fase de tensão dessa barra, e o ângulo de fase das demais barras é estimado em relação

àquela referência. Tendo em vista que não é usual a monitoração direta dos ângulos de fase de tensão, via sistema SCADA convencional, essa prática é apropriada, uma vez que é irrelevante, para o processo de EE, o valor absoluto do ângulo de fase de tensão da barra de referência. Todavia, quando estão presentes medidas convencionais e medidas de PMU, aquela prática não é adequada. Isto porque as medidas de ângulo de fase de tensão, fornecidas pelas PMUs, são obtidas a partir de outro referencial, que é determinado pelo instante de tempo fornecido pela recepção do sinal emitido pelo sistema GPS.

Dentre as diversas soluções propostas para contornar o problema da escolha da referência de ângulo de fase de tensão, no processo de EE em SEP por WLS através de medidas convencionais SCADA e PMUs, destaca-se, a nosso ver, a apresentada em Korres e Manousakis (2011), em razão das seguintes vantagens: não exige muitas mudanças na formulação convencional do processo de EE, por WLS; não requer a escolha de uma barra como referência angular, nem mesmo a criação de uma barra de referência virtual; possibilitando ainda o processamento de EGs em medidas de PMU, desde que a redundância seja adequada.

Face ao exposto, para possibilitar a extensão da visão geométrica dos resíduos do estimador de estado WLS convencional, via o índice UI , para o estimador de estado híbrido, este trabalho fará uso da formulação do estimador de estado híbrido WLS proposto por Korres e Manousakis (2011). Esse estimador é formulado da mesma maneira que o estimador de estado WLS convencional, a única diferença é que agora vão existir novas medidas de ângulo de tensão e correntes complexas. Isso implica a formulação de novas equações, tanto na montagem do vetor $h(x)$ como na matriz Jacobiana.

A estrutura do vetor $h(x)$ será a seguinte:

$$h(x) = \begin{bmatrix} P_{km} \\ Q_{km} \\ P_k \\ Q_k \\ V_k^{SCADA} \\ V_k^{PMU} \\ \theta_k^{PMU} \\ I_{km}^{PMU} \\ \delta_{km}^{PMU} \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

A estrutura da matriz Jacobiana será a seguinte:

$$H = \begin{bmatrix} \partial P_{km}/\partial\theta & \partial P_{km}/\partial V \\ \partial Q_{km}/\partial\theta & \partial Q_{km}/\partial V \\ \partial P_k/\partial\theta & \partial P_k/\partial V \\ \partial Q_k/\partial\theta & \partial Q_k/\partial V \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ \partial I_{km}^{PMU}/\partial\theta & \partial I_{km}^{PMU}/\partial V \\ \partial \delta_{km}^{PMU}/\partial\theta & \partial \delta_{km}^{PMU}/\partial V \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

Onde:

P_{km} representa a medida SCADA de fluxo de potência ativa da barra k para barra m .

Q_{km} representa a medida SCADA de fluxo de potência reativa da barra k para barra m .

P_k representa a medida SCADA de injeção de potência ativa na barra k .

Q_k representa a medida SCADA de injeção de potência reativa na barra k .

V_k^{SCADA} representa a medida de magnitude de tensão na barra k obtida pelo sistema SCADA.

V_k^{PMU} representa a medida de magnitude de tensão na barra k obtida por uma PMU.

θ_k^{PMU} representa a medida de ângulo de fase de tensão na barra k obtida por uma PMU.

I_{km}^{PMU} representa a medida de magnitude de corrente da barra k para barra m obtida por uma PMU.

δ_{km}^{PMU} representa a medida de ângulo de fase de corrente da barra k para barra m obtida por uma PMU.

$\mathbf{V}$ e $\boldsymbol{\theta}$ representam as variáveis de estado a serem estimadas.

As expressões e derivadas relacionadas com as medidas V_k^{PMU} são as mesmas relacionadas com as medidas V_k^{SCADA} . As medidas de PMUs de θ_k^{PMU} são tratadas da mesma forma que as medidas V_k^{SCADA} , pois essas quantidades referem-se às variáveis de estado a serem estimadas.

O algoritmo proposto por Korres e Manousakis (2011) utiliza o modelo de equações em coordenadas retangulares. No entanto, nesta dissertação será utilizado o modelo usual através de coordenadas polares. Essa alteração torna problemática a inicialização do algoritmo na presença de medidas de correntes, pois a derivada dessas medidas pode apresentar problemas numéricos de soluções, como uma divisão pelo número zero. Uma solução simples para esse problema é a inclusão das medidas fasoriais de corrente somente após a primeira iteração do algoritmo.

Vale destacar que alguns pesquisadores não concordam com a ideia de as medidas SCADA e de PMU serem processadas simultaneamente, conforme proposto por Korres e Manousakis (2011). Esses pesquisadores propuseram estimadores de estado híbridos

que processam essas medidas em etapas distintas, a primeira processa apenas as medidas SCADA e a segunda medidas de PMU (ZHOU et al., 2006; ZHU; ABUR, 2007; ALBUQUERQUE; SIMÕES-COSTA, 2012). Justifica-se o processamento em duas etapas pelo fato de os canais de medição, as taxas de amostragem e a precisão das medições obtidas pelo sistema SCADA serem muito diferentes das obtidas pelas PMUs. Por outro lado, os proponentes do processamento simultâneo defendem sua filosofia pela facilidade de implementação de seus estimadores, pois não é necessário uma segunda etapa para combinar as estimativas obtidas pelas medidas convencionais com as obtidas pelas PMUs. Muitas vezes esse processo exige um cuidado especial para colocar as estimativas na mesma referência angular, bem como para definir a forma mais correta para ponderar as medidas utilizadas no processo.

6.3 Simulações Computacionais considerando Sistemas de Medição Híbridos

6.3.1 Preparação dos Dados

As simulações que serão apresentadas neste capítulo foram realizadas considerando o sistema de 14 barras do IEEE. Foram então gerados, para esse sistema, vários cenários de medidas SCADA e PMU, com e sem ruídos Gaussianos e EGs simples. Para isso foi utilizado o programa computacional para geração de valores de medidas com ruído, desenvolvido neste trabalho e apresentado na seção 4.1, do capítulo 4, que faz uso dos resultados obtidos pelo programa de cálculo de fluxo de carga ANAREDE (valores considerados como de referência, ou seja, assumidos como "verdadeiros") e das equações (4.1) e (4.2). Vale destacar que para geração dos valores das medidas de PMU utilizou-se, para definição dos desvios padrão na equação (4.1), uma precisão de 0.5%, ao invés de 2% (valor utilizado para precisão das medidas SCADA). Além disso, para considerar o fato de a referência das medidas de PMU ser fornecida pelo sinal de GPS, realizou-se um ajuste, em todos os valores de ângulos de fase de tensão obtidos pelo ANAREDE, para obtenção dos valores de referência das medidas de PMU.

6.3.2 Algoritmos Implementados

Para possibilitar as análises propostas neste capítulo, os seguintes algoritmos foram implantados em computador:

- Algoritmo do Estimador de Estado WLS híbrido, com base no estimador desenvolvido em (KORRES; MANOUSAKIS, 2011), conforme apresentado na seção anterior;
- Algoritmo pra cálculo do índice UI das medidas;

- Algoritmos para detecção de EGs: teste do índice $J(x)$, do maior resíduo normalizado, do $\hat{b}$ e do e^σ .

Os limiares utilizados para processamento de EGs através dos algoritmos supracitados foram exatamente os mesmos empregados no capítulo 4, para as simulações envolvendo apenas medidas SCADA. Ou seja, $\beta = 3$ para o teste do maior resíduo normalizado (ABUR; EXPOSITO, 2004), $c = 4$ para o teste do $\hat{b}$ e do e^σ , e, para o teste do índice $J(x)$, o limiar para detecção de EGs foi calculado considerando uma distribuição qui-quadrado, para uma probabilidade de falso alarme $\alpha = 5\%$ e grau de liberdade $m - n$, sendo n o número de variáveis de estado a serem estimadas e m o número de medidas disponíveis.

Para executar o estimador de estado híbrido as medidas foram ponderadas com base nos desvios padrão calculados pela equação (4.1). Ou seja, as medidas foram ponderadas exatamente com os desvios padrão utilizados para geração dos respectivos ruídos. Para ponderar as medidas virtuais, utilizou-se a maior ponderação calculada para as medidas disponíveis.

Vale destacar, mais uma vez, que não é necessário calcular o índice UI para medidas virtuais, uma vez que essas medidas não estão sujeitas a erros.

6.3.3 Processamento de EGs

Os testes apresentados nesta subseção foram realizados para sistemas de medição híbridos foram desenvolvidos considerando a disponibilidade de todas as medidas possíveis no sistema de 14 barras do IEEE. Situação difícil de ocorrer na prática em função do alto custo para aquisição e instalação de medidores. Porém, tal situação foi utilizada aqui para verificar se para sistemas híbridos redundantes os valores dos índices UIs das medidas ficariam realmente menores do que para sistemas convencionais redundantes.

Nesse sentido importa lembrar que em (BENEDITO, 2011; BENEDITO et al., 2013) verificou-se que mesmo considerando todas as medidas SCADA possíveis, no sistema de 14 barras do IEEE, foram encontradas diversas medidas com elevados índices UIs (maior que 3).

A primeira simulação realizada considerou a existência de um EG simples de $10 \cdot \sigma$ na medida fasorial sincronizada de ângulo de corrente da barra 4 para barra 9 ($\delta^{PMU} : 4 - 9$). Nessa simulação não foi acrescentado ruído algum nas demais medidas disponíveis. Ou seja, o estimador de estado foi executado considerando os valores de referência para as demais medidas consideradas na simulação.

A segunda simulação foi realizada nos mesmos moldes da primeira. A única diferença foi a consideração de um EG de magnitude maior na medida $\delta^{PMU} : 4 - 9$, de $20 \cdot \sigma$.

Importa destacar, conforme apresentado na Tabela 6.1, que essa medida apresenta um índice UI relativamente grande para o sistema de medição analisado, no valor de 1,93.

Lembrando que para uma medida com UI igual a 1 são iguais as parcelas detectáveis e não detectáveis do erro.

Analisando as variáveis de interesse obtidas nas duas simulações, destacadas na Tabela 6.1, as seguintes observações podem ser destacadas:

- ❑ O teste do índice $J(x)$ falhou para as duas situações analisadas. Importa destacar que para as duas simulações realizadas o limiar de detecção pelo índice $J(x)$ é $\lambda = \chi_{189;(1-0,05)} \cong 222$;
- ❑ Para ambas as simulações a medida $\delta^{PMU} : 4 - 9$ apresentou o maior resíduo normalizado;
- ❑ Os testes para processamento de EG do maior resíduo normalizado, do $\hat{b}$ e do e^σ funcionaram de forma adequada, possibilitando a detecção e identificação de EG na medida $\delta^{PMU} : 4 - 9$, pois os valores obtidos para aqueles parâmetros foram maiores que os respectivos limiares para detecção de EGs;
- ❑ Para ambas as simulações os valores de $\hat{b}$ e do e^σ calculados para medida $\delta^{PMU} : 4 - 9$ foram iguais e muito próximos da quantidade de desvios padrão do erro simulado ($10,027 \cdot \sigma$ e $20,026 \cdot \sigma$);
- ❑ Os valores de UI não variam com a magnitude do EG. Observe que para as duas simulações realizadas todas as medidas apresentaram o mesmo valor de UI , até mesmo a medida que foi simulado com EGs de distintas magnitudes;
- ❑ A inclusão das medidas de PMU possibilitou uma grande redução nos valores dos UIs das medidas, contribuindo, dessa forma, para o processamento de EGs através de técnicas baseadas na análise dos resíduos do estimador WLS. Observe que para ambas as simulações considerando todas as medidas SCADA e de PMU, apresentadas nesta seção, o maior valor de UI obtido foi o da medida $\delta^{PMU} : 12 - 13$ que é de 2,22. É bom lembrar que essa melhora não foi observada nas análises apresentadas em (BENEDITO, 2011; BENEDITO et al., 2013), considerando planos de medições SCADA redundantes (possuindo todas as medidas SCADA possíveis). Pois, esses planos apresentaram medidas com índices UIs maiores que 2,2.

Tabela 6.1: Sistema Híbrido sem ruído gaussiano com EG simples na medida de ângulo de corrente da barra 4 para barra 9.

Medidas	Medida com erro de $10 \cdot \sigma$ Índice $J(x) = 21,190058$				Medida com erro de $20 \cdot \sigma$ Índice $J(x) = 84,473275$			
	UI:	r^N :	e_σ :	$\hat{b}$:	UI:	r^N :	e_σ :	$\hat{b}$:
FA:1-2	0,114	-0,050	-0,050	-0,050	0,114	-0,100	-0,101	-0,101
FA:1-5	0,094	-0,050	-0,051	-0,051	0,094	-0,102	-0,102	-0,102

Continua...

Tabela 6.1: Sistema Híbrido sem ruído gaussiano com EG simples na medida de ângulo de corrente da barra 4 para barra 9.

	Medida com erro de $10 \cdot \sigma$ Índice $J(x) = 21,190058$				Medida com erro de $20 \cdot \sigma$ Índice $J(x) = 84,473275$			
Medidas	UI:	r^N :	e_σ :	$\hat{b}$:	UI:	r^N :	e_σ :	$\hat{b}$:
FA:2-1	0,113	0,050	0,050	0,050	0,113	0,100	0,101	0,101
FA:2-3	0,089	-0,033	-0,033	-0,033	0,089	-0,067	-0,067	-0,067
FA:2-4	0,096	-0,052	-0,052	-0,052	0,096	-0,105	-0,106	-0,106
FA:2-5	0,100	-0,050	-0,050	-0,050	0,100	-0,102	-0,102	-0,102
FA:3-2	0,089	0,033	0,033	0,033	0,089	0,068	0,068	0,068
FA:3-4	0,153	-0,009	-0,009	-0,009	0,153	-0,016	-0,016	-0,016
FA:4-2	0,096	0,051	0,051	0,051	0,096	0,105	0,105	0,105
FA:4-3	0,155	0,009	0,009	0,009	0,155	0,017	0,018	0,018
FA:4-5	0,120	0,058	0,058	0,058	0,120	0,117	0,118	0,118
FA:4-7	0,107	-0,013	-0,013	-0,013	0,107	-0,036	-0,036	-0,036
FA:4-9	0,104	-0,012	-0,012	-0,012	0,104	-0,028	-0,028	-0,028
FA:5-1	0,094	0,050	0,051	0,051	0,094	0,102	0,102	0,102
FA:5-2	0,100	0,050	0,050	0,050	0,100	0,102	0,102	0,102
FA:5-4	0,121	-0,058	-0,058	-0,058	0,121	-0,117	-0,118	-0,118
FA:5-6	0,098	-0,032	-0,032	-0,032	0,098	-0,067	-0,068	-0,068
FA:6-5	0,098	0,032	0,032	0,032	0,098	0,067	0,068	0,068
FA:6-11	0,167	0,049	0,049	0,049	0,167	0,096	0,097	0,097
FA:6-12	0,135	-0,017	-0,017	-0,017	0,135	-0,036	-0,037	-0,037
FA:6-13	0,119	-0,009	-0,009	-0,009	0,119	-0,020	-0,021	-0,021
FA:7-4	0,107	0,013	0,013	0,013	0,107	0,036	0,036	0,036
FA:7-8	-	0,000	0,000	0,000	-	0,000	0,000	0,000
FA:7-9	0,110	-0,008	-0,008	-0,008	0,110	-0,010	-0,010	-0,010
FA:8-7	-	0,000	0,000	0,000	-	0,000	0,000	0,000
FA:9-4	0,104	0,012	0,012	0,012	0,104	0,028	0,028	0,028
FA:9-7	0,110	0,008	0,008	0,008	0,110	0,010	0,010	0,010
FA:9-10	0,232	-0,048	-0,049	-0,049	0,233	-0,099	-0,102	-0,102
FA:9-14	0,147	-0,063	-0,064	-0,064	0,147	-0,129	-0,130	-0,130
FA:10-9	0,233	0,050	0,051	0,051	0,233	0,101	0,104	0,104
FA:10-11	0,246	-0,079	-0,081	-0,081	0,246	-0,154	-0,159	-0,159
FA:11-6	0,166	-0,047	-0,048	-0,048	0,166	-0,093	-0,094	-0,094
FA:11-10	0,248	0,080	0,082	0,082	0,248	0,156	0,161	0,161
FA:12-6	0,135	0,018	0,018	0,018	0,135	0,038	0,038	0,038
FA:12-13	0,421	0,039	0,042	0,042	0,421	0,076	0,083	0,083
FA:13-6	0,118	0,010	0,010	0,010	0,119	0,022	0,022	0,022
FA:13-12	0,422	-0,040	-0,044	-0,044	0,422	-0,077	-0,084	-0,084
FA:13-14	0,172	0,008	0,008	0,008	0,172	0,014	0,015	0,015
FA:14-9	0,146	0,063	0,063	0,063	0,146	0,128	0,129	0,129
FA:14-13	0,171	-0,008	-0,008	-0,008	0,171	-0,013	-0,014	-0,014
FR:1-2	0,201	0,069	0,070	0,070	0,201	0,144	0,147	0,147
FR:1-5	0,333	0,037	0,040	0,040	0,333	0,087	0,092	0,092
FR:2-1	0,157	-0,068	-0,069	-0,069	0,157	-0,137	-0,138	-0,138
FR:2-3	0,248	-0,069	-0,072	-0,072	0,248	-0,132	-0,136	-0,136
FR:2-4	0,440	0,053	0,058	0,058	0,440	0,126	0,138	0,138
FR:2-5	0,335	0,175	0,184	0,184	0,335	0,355	0,374	0,374
FR:3-2	0,699	0,183	0,223	0,223	0,699	0,376	0,459	0,459
FR:3-4	0,221	0,060	0,062	0,062	0,221	0,120	0,123	0,123
FR:4-2	0,235	-0,075	-0,077	-0,077	0,235	-0,149	-0,153	-0,153
FR:4-3	0,172	-0,030	-0,030	-0,030	0,172	-0,057	-0,058	-0,058

Continua...

Tabela 6.1: Sistema Híbrido sem ruído gaussiano com EG simples na medida de ângulo de corrente da barra 4 para barra 9.

	Medida com erro de $10 \cdot \sigma$ Índice J(x) = 21,190058				Medida com erro de $20 \cdot \sigma$ Índice J(x) = 84,473275			
Medidas	UI:	r^N :	e_σ :	$\hat{b}$:	UI:	r^N :	e_σ :	$\hat{b}$:
FR:4-5	0,122	0,025	0,025	0,025	0,122	0,047	0,047	0,047
FR:4-7	0,119	0,398	0,401	0,401	0,120	0,809	0,815	0,815
FR:4-9	0,171	1,354	1,374	1,374	0,171	2,719	2,758	2,758
FR:5-1	0,491	-0,266	-0,297	-0,297	0,491	-0,525	-0,585	-0,585
FR:5-2	0,290	-0,114	-0,119	-0,119	0,290	-0,228	-0,237	-0,237
FR:5-4	0,126	-0,035	-0,035	-0,035	0,126	-0,066	-0,067	-0,067
FR:5-6	0,160	0,210	0,212	0,212	0,160	0,414	0,420	0,420
FR:6-5	0,232	-0,319	-0,327	-0,327	0,232	-0,632	-0,648	-0,648
FR:6-11	0,249	0,158	0,163	0,163	0,249	0,313	0,323	0,323
FR:6-12	0,253	0,035	0,036	0,036	0,253	0,067	0,069	0,069
FR:6-13	0,188	0,037	0,038	0,038	0,188	0,074	0,075	0,075
FR:7-4	0,111	-0,348	-0,350	-0,350	0,112	-0,709	-0,713	-0,713
FR:7-8	0,140	0,053	0,054	0,054	0,140	0,090	0,091	0,091
FR:7-9	0,258	0,641	0,662	0,662	0,258	1,254	1,295	1,295
FR:8-7	0,142	-0,053	-0,054	-0,054	0,142	-0,089	-0,090	-0,090
FR:9-4	0,198	-1,227	-1,251	-1,251	0,199	-2,460	-2,508	-2,508
FR:9-7	0,298	-0,734	-0,765	-0,765	0,298	-1,434	-1,497	-1,497
FR:9-10	0,279	-0,094	-0,098	-0,098	0,280	-0,191	-0,198	-0,198
FR:9-14	0,259	-0,119	-0,123	-0,123	0,259	-0,239	-0,247	-0,247
FR:10-9	0,280	0,094	0,098	0,098	0,280	0,191	0,198	0,198
FR:10-11	0,356	-0,139	-0,147	-0,147	0,355	-0,278	-0,295	-0,295
FR:11-6	0,253	-0,156	-0,161	-0,161	0,253	-0,309	-0,318	-0,318
FR:11-10	0,353	0,142	0,151	0,151	0,353	0,283	0,300	0,300
FR:12-6	0,264	-0,034	-0,035	-0,035	0,264	-0,066	-0,069	-0,069
FR:12-13	0,229	0,017	0,017	0,017	0,229	0,035	0,036	0,036
FR:13-6	0,195	-0,037	-0,037	-0,037	0,195	-0,072	-0,073	-0,073
FR:13-12	0,226	-0,018	-0,018	-0,018	0,226	-0,036	-0,037	-0,037
FR:13-14	0,339	0,057	0,060	0,060	0,339	0,110	0,116	0,116
FR:14-9	0,272	0,120	0,125	0,125	0,272	0,245	0,254	0,254
FR:14-13	0,358	-0,056	-0,059	-0,059	0,358	-0,106	-0,113	-0,113
IA:1	0,106	-0,050	-0,050	-0,050	0,106	-0,101	-0,101	-0,101
IA:2	1,310	0,022	0,037	0,037	1,310	0,015	0,025	0,025
IA:3	0,097	0,023	0,023	0,023	0,097	0,047	0,048	0,048
IA:4	0,236	0,128	0,131	0,131	0,236	0,252	0,259	0,259
IA:5	1,758	0,190	0,385	0,385	1,759	0,364	0,737	0,737
IA:6	0,429	0,142	0,155	0,155	0,429	0,293	0,319	0,319
IA:7	-	0,000	0,000	0,000	-	0,000	0,000	0,000
IA:8	-	0,000	0,000	0,000	-	0,000	0,000	0,000
IA:9	0,158	-0,015	-0,015	-0,015	0,158	-0,034	-0,034	-0,034
IA:10	0,175	-0,004	-0,004	-0,004	0,175	-0,006	-0,006	-0,006
IA:11	0,467	-0,020	-0,022	-0,022	0,467	-0,034	-0,038	-0,038
IA:12	0,219	0,033	0,034	0,034	0,219	0,068	0,069	0,069
IA:13	0,194	0,012	0,012	0,012	0,194	0,026	0,027	0,027
IA:14	0,137	0,036	0,036	0,036	0,137	0,075	0,076	0,076
IR:1	0,311	0,096	0,101	0,101	0,311	0,202	0,212	0,212
IR:2	0,151	-0,058	-0,059	-0,059	0,152	-0,114	-0,116	-0,116
IR:3	0,296	0,084	0,088	0,088	0,296	0,172	0,180	0,180
IR:4	0,705	1,867	2,284	2,284	0,705	3,765	4,607	4,607

Continua...

Tabela 6.1: Sistema Híbrido sem ruído gaussiano com EG simples na medida de ângulo de corrente da barra 4 para barra 9.

Medidas	Medida com erro de $10 \cdot \sigma$ Índice J(x) = 21,190058				Medida com erro de $20 \cdot \sigma$ Índice J(x) = 84,473275			
	UI:	r^N :	e_σ :	$\hat{b}$:	UI:	r^N :	e_σ :	$\hat{b}$:
IR:5	1,772	1,696	3,450	3,450	1,772	3,398	6,914	6,914
IR:6	0,542	-0,350	-0,398	-0,398	0,542	-0,695	-0,790	-0,790
IR:7	-	0,000	0,000	0,000	-	0,000	0,000	0,000
IR:8	0,142	-0,053	-0,054	-0,054	0,142	-0,089	-0,090	-0,090
IR:9	0,190	-0,307	-0,313	-0,313	0,190	-0,599	-0,610	-0,610
IR:10	0,230	0,030	0,030	0,030	0,230	0,061	0,063	0,063
IR:11	0,651	-0,199	-0,237	-0,237	0,651	-0,392	-0,468	-0,468
IR:12	0,550	-0,038	-0,043	-0,043	0,550	-0,070	-0,080	-0,080
IR:13	0,301	-0,034	-0,036	-0,036	0,301	-0,066	-0,069	-0,069
IR:14	0,253	0,066	0,068	0,068	0,253	0,133	0,137	0,137
$V^{PMU}:1$	0,057	-0,022	-0,022	-0,022	0,057	-0,047	-0,047	-0,047
$V^{PMU}:2$	0,057	-0,022	-0,022	-0,022	0,057	-0,047	-0,047	-0,047
$V^{PMU}:3$	0,059	-0,022	-0,022	-0,022	0,059	-0,047	-0,047	-0,047
$V^{PMU}:4$	0,059	-0,022	-0,022	-0,022	0,059	-0,047	-0,047	-0,047
$V^{PMU}:5$	0,058	-0,023	-0,023	-0,023	0,058	-0,048	-0,048	-0,048
$V^{PMU}:6$	0,058	-0,029	-0,029	-0,029	0,058	-0,061	-0,061	-0,061
$V^{PMU}:7$	0,058	-0,028	-0,028	-0,028	0,058	-0,060	-0,060	-0,060
$V^{PMU}:8$	0,056	-0,028	-0,028	-0,028	0,056	-0,059	-0,059	-0,059
$V^{PMU}:9$	0,058	-0,032	-0,032	-0,032	0,058	-0,067	-0,067	-0,067
$V^{PMU}:10$	0,059	-0,032	-0,032	-0,032	0,059	-0,067	-0,067	-0,067
$V^{PMU}:11$	0,058	-0,031	-0,031	-0,031	0,058	-0,065	-0,065	-0,065
$V^{PMU}:12$	0,059	-0,030	-0,030	-0,030	0,059	-0,063	-0,063	-0,063
$V^{PMU}:13$	0,059	-0,031	-0,031	-0,031	0,059	-0,064	-0,064	-0,064
$V^{PMU}:14$	0,060	-0,032	-0,032	-0,032	0,060	-0,066	-0,066	-0,066
$\theta^{PMU}:1$	0,667	0,072	0,087	0,087	0,667	0,035	0,042	0,042
$\theta^{PMU}:2$	0,618	-0,069	-0,081	-0,081	0,618	-0,109	-0,128	-0,128
$\theta^{PMU}:3$	0,274	-0,081	-0,084	-0,084	0,274	-0,163	-0,169	-0,169
$\theta^{PMU}:4$	0,326	-0,011	-0,012	-0,012	0,326	-0,018	-0,019	-0,019
$\theta^{PMU}:5$	0,459	-0,036	-0,039	-0,039	0,459	-0,051	-0,056	-0,056
$\theta^{PMU}:6$	0,233	-0,060	-0,061	-0,061	0,233	-0,118	-0,122	-0,122
$\theta^{PMU}:7$	0,229	-0,063	-0,065	-0,065	0,229	-0,118	-0,121	-0,121
$\theta^{PMU}:8$	0,233	-0,061	-0,063	-0,063	0,233	-0,109	-0,112	-0,112
$\theta^{PMU}:9$	0,222	-0,089	-0,091	-0,091	0,222	-0,176	-0,180	-0,180
$\theta^{PMU}:10$	0,222	-0,090	-0,093	-0,093	0,222	-0,178	-0,183	-0,183
$\theta^{PMU}:11$	0,226	-0,075	-0,077	-0,077	0,226	-0,149	-0,153	-0,153
$\theta^{PMU}:12$	0,228	-0,068	-0,070	-0,070	0,228	-0,134	-0,137	-0,137
$\theta^{PMU}:13$	0,229	-0,070	-0,072	-0,072	0,229	-0,139	-0,142	-0,142
$\theta^{PMU}:14$	0,224	-0,085	-0,088	-0,088	0,224	-0,170	-0,174	-0,174
$I^{PMU}:1-2$	0,356	-0,119	-0,126	-0,126	0,356	-0,228	-0,242	-0,242
$I^{PMU}:1-5$	0,237	-0,115	-0,118	-0,118	0,237	-0,224	-0,230	-0,230
$I^{PMU}:2-5$	0,286	-0,114	-0,119	-0,119	0,286	-0,226	-0,235	-0,235
$I^{PMU}:2-4$	0,258	-0,120	-0,124	-0,124	0,258	-0,238	-0,246	-0,246
$I^{PMU}:2-3$	0,226	-0,042	-0,043	-0,043	0,226	-0,082	-0,084	-0,084
$I^{PMU}:2-1$	0,359	-0,119	-0,126	-0,126	0,359	-0,228	-0,242	-0,242
$I^{PMU}:3-4$	0,667	0,159	0,191	0,191	0,667	0,320	0,385	0,385
$I^{PMU}:3-2$	0,225	-0,043	-0,044	-0,044	0,225	-0,084	-0,086	-0,086
$I^{PMU}:4-3$	0,658	0,156	0,187	0,187	0,658	0,316	0,378	0,378
$I^{PMU}:4-9$	0,318	0,027	0,028	0,028	0,318	0,048	0,051	0,051

Continua...

Tabela 6.1: Sistema Híbrido sem ruído gaussiano com EG simples na medida de ângulo de corrente da barra 4 para barra 9.

	Medida com erro de $10 \cdot \sigma$ Índice J(x) = 21,190058				Medida com erro de $20 \cdot \sigma$ Índice J(x) = 84,473275			
Medidas	UI:	r^N :	e_σ :	$\hat{b}$:	UI:	r^N :	e_σ :	$\hat{b}$:
$I^{PMU}:4-7$	0,308	-0,139	-0,145	-0,145	0,308	-0,302	-0,316	-0,316
$I^{PMU}:4-5$	0,393	-0,130	-0,140	-0,140	0,393	-0,254	-0,273	-0,273
$I^{PMU}:4-2$	0,258	-0,120	-0,124	-0,124	0,258	-0,238	-0,246	-0,246
$I^{PMU}:5-4$	0,393	-0,130	-0,140	-0,140	0,393	-0,254	-0,273	-0,273
$I^{PMU}:5-2$	0,284	-0,111	-0,115	-0,115	0,284	-0,220	-0,228	-0,228
$I^{PMU}:5-1$	0,237	-0,114	-0,117	-0,117	0,237	-0,221	-0,227	-0,227
$I^{PMU}:5-6$	0,259	0,034	0,035	0,035	0,259	0,064	0,067	0,067
$I^{PMU}:6-12$	0,530	0,079	0,089	0,089	0,530	0,158	0,179	0,179
$I^{PMU}:6-13$	0,427	0,118	0,129	0,129	0,427	0,237	0,258	0,258
$I^{PMU}:6-11$	0,628	0,462	0,545	0,545	0,628	0,923	1,091	1,091
$I^{PMU}:6-5$	0,259	0,034	0,036	0,036	0,259	0,065	0,067	0,067
$I^{PMU}:7-4$	0,308	-0,140	-0,147	-0,147	0,308	-0,303	-0,317	-0,317
$I^{PMU}:7-9$	0,347	0,200	0,212	0,212	0,347	0,424	0,449	0,449
$I^{PMU}:7-8$	0,580	-0,086	-0,100	-0,100	0,580	-0,109	-0,126	-0,126
$I^{PMU}:8-7$	0,580	-0,086	-0,100	-0,100	0,580	-0,109	-0,126	-0,126
$I^{PMU}:9-14$	0,606	-0,174	-0,203	-0,203	0,606	-0,345	-0,404	-0,404
$I^{PMU}:9-4$	0,318	0,025	0,026	0,026	0,318	0,046	0,048	0,048
$I^{PMU}:9-7$	0,347	0,200	0,212	0,212	0,347	0,424	0,449	0,449
$I^{PMU}:9-10$	0,856	-0,171	-0,226	-0,226	0,856	-0,341	-0,448	-0,448
$I^{PMU}:10-11$	0,652	0,354	0,423	0,423	0,652	0,706	0,843	0,843
$I^{PMU}:10-9$	0,856	-0,171	-0,226	-0,226	0,856	-0,341	-0,448	-0,448
$I^{PMU}:11-10$	0,652	0,354	0,423	0,423	0,652	0,706	0,843	0,843
$I^{PMU}:11-6$	0,628	0,462	0,545	0,545	0,628	0,923	1,091	1,091
$I^{PMU}:12-13$	0,442	0,081	0,088	0,088	0,442	0,161	0,176	0,176
$I^{PMU}:12-6$	0,530	0,079	0,089	0,089	0,530	0,158	0,179	0,179
$I^{PMU}:13-6$	0,427	0,118	0,129	0,129	0,427	0,237	0,258	0,258
$I^{PMU}:13-14$	0,669	0,185	0,223	0,223	0,668	0,372	0,447	0,447
$I^{PMU}:13-12$	0,442	0,081	0,088	0,088	0,442	0,161	0,176	0,176
$I^{PMU}:14-9$	0,606	-0,174	-0,203	-0,203	0,606	-0,345	-0,404	-0,404
$I^{PMU}:14-13$	0,669	0,185	0,223	0,223	0,668	0,372	0,447	0,447
$\delta^{PMU}:1-2$	0,472	-0,077	-0,085	-0,085	0,472	-0,152	-0,169	-0,169
$\delta^{PMU}:1-5$	1,073	-0,540	-0,793	-0,793	1,072	-1,074	-1,575	-1,575
$\delta^{PMU}:2-5$	0,885	-0,724	-0,966	-0,966	0,885	-1,444	-1,928	-1,928
$\delta^{PMU}:2-4$	0,642	-0,068	-0,081	-0,081	0,642	-0,139	-0,165	-0,165
$\delta^{PMU}:2-3$	0,614	0,057	0,067	0,067	0,614	0,114	0,134	0,134
$\delta^{PMU}:2-1$	0,031	-0,005	-0,005	-0,005	0,031	-0,010	-0,010	-0,010
$\delta^{PMU}:3-4$	0,030	0,008	0,008	0,008	0,030	0,017	0,017	0,017
$\delta^{PMU}:3-2$	0,011	0,002	0,002	0,002	0,011	0,004	0,004	0,004
$\delta^{PMU}:4-3$	1,583	0,241	0,452	0,452	1,584	0,487	0,912	0,912
$\delta^{PMU}:4-9$	1,930	4,613	10,027	10,027	1,930	9,213	20,026	20,026
$\delta^{PMU}:4-7$	0,613	-2,315	-2,715	-2,715	0,613	-4,644	-5,446	-5,446
$\delta^{PMU}:4-5$	0,031	0,026	0,026	0,026	0,031	0,052	0,052	0,052
$\delta^{PMU}:4-2$	0,012	-0,002	-0,002	-0,002	0,012	-0,003	-0,003	-0,003
$\delta^{PMU}:5-4$	0,700	0,600	0,732	0,732	0,700	1,190	1,453	1,453
$\delta^{PMU}:5-2$	0,017	-0,012	-0,012	-0,012	0,017	-0,023	-0,023	-0,023
$\delta^{PMU}:5-1$	0,016	-0,008	-0,008	-0,008	0,016	-0,015	-0,015	-0,015
$\delta^{PMU}:5-6$	0,376	-0,791	-0,845	-0,845	0,377	-1,572	-1,680	-1,680
$\delta^{PMU}:6-12$	0,745	-0,177	-0,220	-0,220	0,745	-0,356	-0,444	-0,444

Continua...

Tabela 6.1: Sistema Híbrido sem ruído gaussiano com EG simples na medida de ângulo de corrente da barra 4 para barra 9.

	Medida com erro de $10 \cdot \sigma$ Índice $J(x) = 21,190058$				Medida com erro de $20 \cdot \sigma$ Índice $J(x) = 84,473275$			
Medidas	UI:	r^N :	e_σ :	$\hat{b}$:	UI:	r^N :	e_σ :	$\hat{b}$:
$\delta^{PMU}:6-13$	0,524	-0,155	-0,174	-0,174	0,524	-0,309	-0,349	-0,349
$\delta^{PMU}:6-11$	0,950	-0,385	-0,530	-0,530	0,950	-0,774	-1,067	-1,067
$\delta^{PMU}:6-5$	0,043	-0,090	-0,090	-0,090	0,043	-0,179	-0,180	-0,180
$\delta^{PMU}:7-4$	0,043	-0,163	-0,163	-0,163	0,043	-0,327	-0,327	-0,327
$\delta^{PMU}:7-9$	0,722	-1,770	-2,183	-2,183	0,722	-3,460	-4,269	-4,269
$\delta^{PMU}:7-8$	0,147	0,000	0,000	0,000	0,147	0,018	0,018	0,018
$\delta^{PMU}:8-7$	0,122	0,000	0,000	0,000	0,122	0,015	0,015	0,015
$\delta^{PMU}:9-14$	0,852	0,133	0,175	0,175	0,851	0,265	0,348	0,348
$\delta^{PMU}:9-4$	0,019	-0,169	-0,169	-0,169	0,019	-0,338	-0,338	-0,338
$\delta^{PMU}:9-7$	0,073	-0,180	-0,180	-0,180	0,073	-0,352	-0,353	-0,353
$\delta^{PMU}:9-10$	1,484	0,144	0,257	0,257	1,484	0,289	0,517	0,517
$\delta^{PMU}:10-11$	0,191	-0,040	-0,040	-0,040	0,192	-0,079	-0,081	-0,081
$\delta^{PMU}:10-9$	0,325	0,032	0,033	0,033	0,325	0,063	0,067	0,067
$\delta^{PMU}:11-10$	1,495	-0,311	-0,559	-0,559	1,496	-0,619	-1,114	-1,114
$\delta^{PMU}:11-6$	0,169	-0,069	-0,070	-0,070	0,169	-0,138	-0,140	-0,140
$\delta^{PMU}:12-13$	2,232	-0,066	-0,162	-0,162	2,232	-0,130	-0,317	-0,317
$\delta^{PMU}:12-6$	0,106	-0,025	-0,025	-0,025	0,106	-0,051	-0,051	-0,051
$\delta^{PMU}:13-6$	0,098	-0,029	-0,029	-0,029	0,098	-0,058	-0,058	-0,058
$\delta^{PMU}:13-14$	1,168	-0,193	-0,297	-0,297	1,168	-0,391	-0,601	-0,601
$\delta^{PMU}:13-12$	0,227	-0,007	-0,007	-0,007	0,227	-0,013	-0,013	-0,013
$\delta^{PMU}:14-9$	0,136	0,021	0,022	0,022	0,136	0,042	0,043	0,043
$\delta^{PMU}:14-13$	0,137	-0,023	-0,023	-0,023	0,137	-0,046	-0,046	-0,046

Na terceira simulação realizada foi inserido um EG simples de $10 \cdot \sigma$ na medida fasorial sincronizada de ângulo de fase de corrente da barra 12 para barra 13 ($\delta^{PMU} : 12 - 13$). Essa medida tem UI relativamente alto, de 2,22. Entretanto, nesta simulação foram acrescentados ruídos aleatórios nas demais medidas disponíveis, da forma mencionada na seção anterior.

A quarta simulação foi executada nos mesmos moldes da terceira geração. A única diferença foi a consideração de um EG de magnitude maior na medida $\delta^{PMU} : 12 - 13$. Nesta simulação o EG considerado foi de $20 \cdot \sigma$.

Analisando as variáveis de interesse obtidas nas duas simulações, destacadas na Tabela 6.2, praticamente as mesmas observações das duas simulações anteriores podem ser destacadas. Ou seja:

- ❑ O teste do índice $J(x)$ falhou para as duas situações analisadas;
- ❑ Para ambas as simulações a medida $\delta^{PMU} : 12 - 13$ apresentou o maior resíduo normalizado;
- ❑ Os testes para processamento de EG do maior resíduo normalizado, do $\hat{b}$ e do e^σ funcionaram de forma adequada, possibilitando a detecção e identificação de EG na

medida δ^{PMU} : 12 – 13;

- Para ambas as simulações os valores de $\hat{b}$ e do e^σ calculados para medida δ^{PMU} : 12–13 foram iguais e muito próximos da quantidade de desvios padrão do erro simulado ($10,122 \cdot \sigma$ e $20,068 \cdot \sigma$). Vale destacar que as estimativas de EG obtidas nas duas primeiras simulações estão ligeiramente mais próximas dos valores de desvio padrão dos EGs simulados. Isto em razão de estas duas últimas simulações terem sido executadas considerado ruído nas demais medidas processadas;
- Os valores de UI não variam com a magnitude do EG. Observe que para as duas simulações realizadas todas as medidas apresentaram o mesmo valor de UI , até mesmo a medida que foi simulado com EGs de distintas magnitudes;
- A inclusão das medidas de PMU possibilitou uma grande redução nos valores dos UIs das medidas, contribuindo, dessa forma, para o processamento de EGs através de técnicas baseadas na análise dos resíduos do estimador WLS.

Por fim, comparando os valores de UIs obtidos nas quatro simulações realizadas, apresentados nas Tabelas 6.1 e 6.2, verifica-se, mais uma vez, que esses valores não variaram com a presença de ruído e de EGs. Em todas as simulações o valor do índice UI de uma determinada medida se manteve o mesmo.

Tabela 6.2: Sistema Híbrido com ruído gaussiano com EG simples na medida de ângulo de corrente da barra 12 para barra 13.

Medidas	Medida com erro de $10 \cdot \sigma$ Índice $J(x) = 151,527221$				Medida com erro de $20 \cdot \sigma$ Índice $J(x) = 202,526941$			
	UI:	r^N :	e_σ :	$\hat{b}$:	UI:	r^N :	e_σ :	$\hat{b}$:
FA:1-2	0,114	-0,688	-0,692	-0,692	0,114	-0,682	-0,686	-0,686
FA:1-5	0,094	0,849	0,852	0,852	0,094	0,855	0,859	0,859
FA:2-1	0,113	-0,147	-0,148	-0,148	0,113	-0,153	-0,154	-0,154
FA:2-3	0,089	-0,382	-0,384	-0,384	0,089	-0,376	-0,378	-0,378
FA:2-4	0,096	-0,112	-0,112	-0,112	0,096	-0,106	-0,106	-0,106
FA:2-5	0,100	0,246	0,247	0,247	0,100	0,253	0,254	0,254
FA:3-2	0,089	1,191	1,195	1,195	0,089	1,185	1,190	1,190
FA:3-4	0,153	-0,876	-0,887	-0,887	0,153	-0,882	-0,892	-0,892
FA:4-2	0,096	0,214	0,215	0,215	0,096	0,208	0,209	0,209
FA:4-3	0,155	0,288	0,291	0,291	0,155	0,293	0,297	0,297
FA:4-5	0,120	0,283	0,285	0,285	0,120	0,279	0,281	0,281
FA:4-7	0,107	0,516	0,519	0,519	0,107	0,516	0,519	0,519
FA:4-9	0,104	1,792	1,802	1,802	0,104	1,792	1,802	1,802
FA:5-1	0,094	0,833	0,837	0,837	0,094	0,827	0,830	0,830
FA:5-2	0,100	-0,364	-0,366	-0,366	0,100	-0,370	-0,372	-0,372
FA:5-4	0,121	-0,702	-0,707	-0,707	0,121	-0,697	-0,702	-0,702
FA:5-6	0,098	-0,156	-0,157	-0,157	0,098	-0,146	-0,147	-0,147
FA:6-5	0,098	1,626	1,634	1,634	0,098	1,616	1,624	1,624
FA:6-11	0,167	-0,454	-0,460	-0,460	0,167	-0,481	-0,487	-0,487
FA:6-12	0,135	-0,124	-0,125	-0,125	0,135	0,026	0,026	0,026

Continua...

Tabela 6.2: Sistema Híbrido com ruído gaussiano com EG simples na medida de ângulo de corrente da barra 12 para barra 13.

	Medida com erro de $10 \cdot \sigma$ Índice $J(x) = 151,527221$				Medida com erro de $20 \cdot \sigma$ Índice $J(x) = 202,526941$			
Medidas	UI:	r^N :	e_σ :	$\hat{b}$:	UI:	r^N :	e_σ :	$\hat{b}$:
FA:6-13	0,119	-1,206	-1,215	-1,215	0,119	-1,317	-1,327	-1,327
FA:7-4	0,107	-0,581	-0,585	-0,585	0,107	-0,581	-0,585	-0,585
FA:7-8	-	0,000	0,000	0,000	-	0,000	0,000	0,000
FA:7-9	0,110	-0,553	-0,556	-0,556	0,110	-0,553	-0,556	-0,556
FA:8-7	-	0,000	0,000	0,000	-	0,000	0,000	0,000
FA:9-4	0,104	-0,492	-0,495	-0,495	0,104	-0,492	-0,495	-0,495
FA:9-7	0,110	-0,964	-0,970	-0,970	0,110	-0,964	-0,970	-0,970
FA:9-10	0,232	0,911	0,935	0,935	0,232	0,938	0,963	0,963
FA:9-14	0,147	-0,527	-0,533	-0,533	0,147	-0,571	-0,578	-0,578
FA:10-9	0,233	0,208	0,214	0,214	0,233	0,182	0,186	0,186
FA:10-11	0,247	-1,468	-1,512	-1,512	0,247	-1,444	-1,487	-1,487
FA:11-6	0,166	-0,785	-0,796	-0,796	0,166	-0,759	-0,769	-0,769
FA:11-10	0,248	-1,268	-1,307	-1,307	0,248	-1,293	-1,332	-1,332
FA:12-6	0,135	0,033	0,033	0,033	0,135	-0,116	-0,118	-0,118
FA:12-13	0,423	-2,272	-2,468	-2,468	0,426	-3,244	-3,525	-3,525
FA:13-6	0,119	0,090	0,091	0,091	0,119	0,201	0,203	0,203
FA:13-12	0,424	0,331	0,359	0,359	0,427	1,307	1,421	1,421
FA:13-14	0,172	-0,611	-0,620	-0,620	0,172	-0,570	-0,578	-0,578
FA:14-9	0,146	0,840	0,849	0,849	0,146	0,884	0,893	0,893
FA:14-13	0,171	2,002	2,031	2,031	0,171	1,961	1,989	1,989
FR:1-2	0,201	-1,046	-1,067	-1,067	0,201	-1,055	-1,076	-1,076
FR:1-5	0,333	0,034	0,035	0,035	0,333	0,031	0,033	0,033
FR:2-1	0,157	0,334	0,338	0,338	0,157	0,339	0,344	0,344
FR:2-3	0,248	1,047	1,079	1,079	0,248	1,046	1,077	1,077
FR:2-4	0,439	0,681	0,744	0,744	0,439	0,663	0,725	0,725
FR:2-5	0,335	0,360	0,380	0,380	0,335	0,355	0,375	0,375
FR:3-2	0,699	0,151	0,184	0,184	0,699	0,136	0,165	0,165
FR:3-4	0,222	1,332	1,364	1,364	0,222	1,336	1,369	1,369
FR:4-2	0,235	0,644	0,661	0,661	0,235	0,645	0,662	0,662
FR:4-3	0,172	-0,682	-0,692	-0,692	0,172	-0,688	-0,698	-0,698
FR:4-5	0,122	-1,030	-1,038	-1,038	0,122	-1,026	-1,034	-1,034
FR:4-7	0,119	0,148	0,150	0,150	0,119	0,145	0,146	0,146
FR:4-9	0,171	0,273	0,277	0,277	0,171	0,277	0,281	0,281
FR:5-1	0,491	0,219	0,244	0,244	0,491	0,217	0,242	0,242
FR:5-2	0,290	0,868	0,904	0,904	0,290	0,860	0,895	0,895
FR:5-4	0,126	-0,716	-0,722	-0,722	0,126	-0,721	-0,727	-0,727
FR:5-6	0,160	-1,348	-1,365	-1,365	0,160	-1,338	-1,355	-1,355
FR:6-5	0,232	-0,308	-0,316	-0,316	0,232	-0,317	-0,326	-0,326
FR:6-11	0,249	-0,474	-0,489	-0,489	0,249	-0,424	-0,437	-0,437
FR:6-12	0,253	0,016	0,017	0,017	0,252	-0,104	-0,107	-0,107
FR:6-13	0,188	-0,682	-0,694	-0,694	0,187	-0,426	-0,433	-0,433
FR:7-4	0,111	0,530	0,534	0,534	0,111	0,532	0,535	0,535
FR:7-8	0,140	-0,314	-0,317	-0,317	0,140	-0,317	-0,320	-0,320
FR:7-9	0,258	0,048	0,050	0,050	0,258	0,052	0,054	0,054
FR:8-7	0,142	-0,038	-0,038	-0,038	0,142	-0,035	-0,036	-0,036
FR:9-4	0,198	-1,408	-1,435	-1,435	0,198	-1,419	-1,446	-1,446
FR:9-7	0,298	-1,018	-1,062	-1,062	0,298	-1,024	-1,068	-1,068
FR:9-10	0,280	0,621	0,644	0,644	0,280	0,591	0,614	0,614

Continua...

Tabela 6.2: Sistema Híbrido com ruído gaussiano com EG simples na medida de ângulo de corrente da barra 12 para barra 13.

	Medida com erro de $10 \cdot \sigma$ Índice $J(x) = 151,527221$				Medida com erro de $20 \cdot \sigma$ Índice $J(x) = 202,526941$			
Medidas	UI:	r^N :	e_σ :	$\hat{b}$:	UI:	r^N :	e_σ :	$\hat{b}$:
FR:9-14	0,259	-0,224	-0,232	-0,232	0,259	-0,082	-0,084	-0,084
FR:10-9	0,280	0,562	0,584	0,584	0,280	0,592	0,615	0,615
FR:10-11	0,356	-0,423	-0,449	-0,449	0,356	-0,463	-0,492	-0,492
FR:11-6	0,253	-0,168	-0,174	-0,174	0,253	-0,221	-0,228	-0,228
FR:11-10	0,353	1,590	1,686	1,686	0,353	1,629	1,727	1,727
FR:12-6	0,264	-0,199	-0,206	-0,206	0,264	-0,055	-0,057	-0,057
FR:12-13	0,227	0,170	0,175	0,175	0,225	1,379	1,414	1,414
FR:13-6	0,194	-0,348	-0,355	-0,355	0,194	-0,628	-0,640	-0,640
FR:13-12	0,225	-0,775	-0,795	-0,795	0,223	-1,986	-2,034	-2,034
FR:13-14	0,339	-0,774	-0,818	-0,818	0,339	-0,839	-0,886	-0,886
FR:14-9	0,272	-0,466	-0,483	-0,483	0,272	-0,623	-0,646	-0,646
FR:14-13	0,358	0,882	0,937	0,937	0,358	0,956	1,016	1,016
IA:1	0,106	0,064	0,065	0,065	0,106	0,071	0,071	0,071
IA:2	1,310	-0,381	-0,627	-0,627	1,310	-0,374	-0,617	-0,617
IA:3	0,097	0,540	0,543	0,543	0,097	0,534	0,537	0,537
IA:4	0,236	1,172	1,204	1,204	0,236	1,162	1,194	1,194
IA:5	1,757	0,676	1,366	1,366	1,757	0,672	1,358	1,358
IA:6	0,429	-0,932	-1,014	-1,014	0,429	-1,072	-1,166	-1,166
IA:7	-	0,000	0,000	0,000	-	0,000	0,000	0,000
IA:8	-	0,000	0,000	0,000	-	0,000	0,000	0,000
IA:9	0,158	0,314	0,318	0,318	0,158	0,304	0,308	0,308
IA:10	0,175	0,743	0,754	0,754	0,175	0,737	0,749	0,749
IA:11	0,467	0,574	0,634	0,634	0,467	0,606	0,669	0,669
IA:12	0,219	-1,589	-1,627	-1,627	0,220	-2,024	-2,072	-2,072
IA:13	0,194	1,585	1,614	1,614	0,194	1,856	1,891	1,891
IA:14	0,137	-1,461	-1,474	-1,474	0,137	-1,448	-1,462	-1,462
IR:1	0,311	0,419	0,439	0,439	0,311	0,407	0,427	0,427
IR:2	0,151	-0,999	-1,011	-1,011	0,151	-0,996	-1,007	-1,007
IR:3	0,296	-0,575	-0,600	-0,600	0,296	-0,575	-0,600	-0,600
IR:4	0,705	0,661	0,809	0,809	0,705	0,666	0,815	0,815
IR:5	1,771	0,063	0,128	0,128	1,771	0,094	0,192	0,192
IR:6	0,541	-0,911	-1,036	-1,036	0,541	-0,558	-0,634	-0,634
IR:7	-	0,000	0,000	0,000	-	0,000	0,000	0,000
IR:8	0,142	-0,005	-0,005	-0,005	0,142	-0,003	-0,003	-0,003
IR:9	0,190	-0,299	-0,305	-0,305	0,190	-0,291	-0,296	-0,296
IR:10	0,230	-1,462	-1,500	-1,500	0,230	-1,452	-1,490	-1,490
IR:11	0,651	0,978	1,167	1,167	0,651	0,902	1,076	1,076
IR:12	0,548	1,582	1,804	1,804	0,545	3,133	3,569	3,569
IR:13	0,300	-2,213	-2,311	-2,311	0,300	-2,901	-3,029	-3,029
IR:14	0,253	0,330	0,340	0,340	0,253	0,248	0,256	0,256
$V^{PMU}:1$	0,057	0,221	0,222	0,222	0,057	0,226	0,226	0,226
$V^{PMU}:2$	0,057	-0,047	-0,047	-0,047	0,057	-0,042	-0,042	-0,042
$V^{PMU}:3$	0,059	1,175	1,177	1,177	0,059	1,180	1,182	1,182
$V^{PMU}:4$	0,059	0,156	0,156	0,156	0,059	0,160	0,161	0,161
$V^{PMU}:5$	0,058	-1,159	-1,161	-1,161	0,058	-1,155	-1,157	-1,157
$V^{PMU}:6$	0,058	-0,555	-0,556	-0,556	0,058	-0,550	-0,551	-0,551
$V^{PMU}:7$	0,058	0,029	0,029	0,029	0,058	0,033	0,033	0,033
$V^{PMU}:8$	0,056	0,004	0,004	0,004	0,056	0,009	0,009	0,009

Continua...

Tabela 6.2: Sistema Híbrido com ruído gaussiano com EG simples na medida de ângulo de corrente da barra 12 para barra 13.

	Medida com erro de $10 \cdot \sigma$ Índice J(x) = 151,527221				Medida com erro de $20 \cdot \sigma$ Índice J(x) = 202,526941			
Medidas	UI:	r^N :	e_σ :	$\hat{b}$:	UI:	r^N :	e_σ :	$\hat{b}$:
$V^{PMU}:9$	0,058	1,441	1,443	1,443	0,058	1,446	1,448	1,448
$V^{PMU}:10$	0,059	-1,713	-1,716	-1,716	0,059	-1,708	-1,711	-1,711
$V^{PMU}:11$	0,058	-0,051	-0,051	-0,051	0,058	-0,046	-0,046	-0,046
$V^{PMU}:12$	0,059	-0,344	-0,345	-0,345	0,059	-0,340	-0,340	-0,340
$V^{PMU}:13$	0,059	0,907	0,908	0,908	0,059	0,911	0,912	0,912
$V^{PMU}:14$	0,060	1,547	1,549	1,549	0,060	1,551	1,553	1,553
$\theta^{PMU}:1$	0,667	0,017	0,021	0,021	0,667	-0,019	-0,023	-0,023
$\theta^{PMU}:2$	0,618	-1,231	-1,447	-1,447	0,618	-1,259	-1,480	-1,480
$\theta^{PMU}:3$	0,274	-0,134	-0,138	-0,138	0,274	-0,129	-0,134	-0,134
$\theta^{PMU}:4$	0,326	0,743	0,782	0,782	0,326	0,742	0,780	0,780
$\theta^{PMU}:5$	0,459	0,272	0,299	0,299	0,459	0,260	0,286	0,286
$\theta^{PMU}:6$	0,233	0,653	0,670	0,670	0,233	0,647	0,664	0,664
$\theta^{PMU}:7$	0,229	-0,267	-0,274	-0,274	0,229	-0,254	-0,260	-0,260
$\theta^{PMU}:8$	0,234	1,668	1,713	1,713	0,234	1,681	1,726	1,726
$\theta^{PMU}:9$	0,222	-0,373	-0,382	-0,382	0,222	-0,356	-0,365	-0,365
$\theta^{PMU}:10$	0,222	0,197	0,202	0,202	0,222	0,211	0,216	0,216
$\theta^{PMU}:11$	0,226	-0,255	-0,262	-0,262	0,226	-0,247	-0,253	-0,253
$\theta^{PMU}:12$	0,228	0,589	0,604	0,604	0,228	0,518	0,531	0,531
$\theta^{PMU}:13$	0,229	-1,364	-1,399	-1,399	0,229	-1,288	-1,322	-1,322
$\theta^{PMU}:14$	0,224	-0,842	-0,863	-0,863	0,224	-0,789	-0,809	-0,809
$I^{PMU}:1-2$	0,356	0,411	0,436	0,436	0,356	0,417	0,443	0,443
$I^{PMU}:1-5$	0,237	-0,410	-0,422	-0,422	0,237	-0,404	-0,415	-0,415
$I^{PMU}:2-5$	0,286	-1,680	-1,748	-1,748	0,286	-1,673	-1,740	-1,740
$I^{PMU}:2-4$	0,258	1,028	1,062	1,062	0,258	1,033	1,067	1,067
$I^{PMU}:2-3$	0,226	0,372	0,381	0,381	0,226	0,376	0,385	0,385
$I^{PMU}:2-1$	0,359	-1,076	-1,143	-1,143	0,359	-1,070	-1,137	-1,137
$I^{PMU}:3-4$	0,667	0,445	0,535	0,535	0,667	0,448	0,538	0,538
$I^{PMU}:3-2$	0,225	-0,375	-0,385	-0,385	0,225	-0,371	-0,381	-0,381
$I^{PMU}:4-3$	0,658	-1,260	-1,508	-1,508	0,658	-1,257	-1,505	-1,505
$I^{PMU}:4-9$	0,318	0,920	0,965	0,965	0,318	0,901	0,945	0,945
$I^{PMU}:4-7$	0,308	0,209	0,219	0,219	0,308	0,191	0,200	0,200
$I^{PMU}:4-5$	0,393	-0,765	-0,822	-0,822	0,393	-0,767	-0,824	-0,824
$I^{PMU}:4-2$	0,258	0,970	1,002	1,002	0,258	0,975	1,007	1,007
$I^{PMU}:5-4$	0,393	0,286	0,308	0,308	0,393	0,285	0,306	0,306
$I^{PMU}:5-2$	0,284	1,639	1,704	1,704	0,284	1,646	1,712	1,712
$I^{PMU}:5-1$	0,237	1,305	1,341	1,341	0,237	1,311	1,348	1,348
$I^{PMU}:5-6$	0,259	-0,617	-0,637	-0,637	0,259	-0,595	-0,614	-0,614
$I^{PMU}:6-12$	0,530	0,997	1,128	1,128	0,531	1,537	1,740	1,740
$I^{PMU}:6-13$	0,427	-0,206	-0,224	-0,224	0,427	-0,484	-0,527	-0,527
$I^{PMU}:6-11$	0,628	0,078	0,092	0,092	0,628	-0,003	-0,004	-0,004
$I^{PMU}:6-5$	0,259	-1,455	-1,503	-1,503	0,259	-1,433	-1,480	-1,480
$I^{PMU}:7-4$	0,308	0,266	0,278	0,278	0,308	0,248	0,259	0,259
$I^{PMU}:7-9$	0,348	-0,048	-0,050	-0,050	0,348	-0,066	-0,070	-0,070
$I^{PMU}:7-8$	0,580	1,035	1,197	1,197	0,580	1,026	1,186	1,186
$I^{PMU}:8-7$	0,580	-0,839	-0,970	-0,970	0,580	-0,848	-0,980	-0,980
$I^{PMU}:9-14$	0,606	-1,120	-1,310	-1,310	0,606	-1,237	-1,447	-1,447
$I^{PMU}:9-4$	0,318	-0,107	-0,113	-0,113	0,318	-0,127	-0,133	-0,133
$I^{PMU}:9-7$	0,348	-0,843	-0,892	-0,892	0,348	-0,861	-0,912	-0,912

Continua...

Tabela 6.2: Sistema Híbrido com ruído gaussiano com EG simples na medida de ângulo de corrente da barra 12 para barra 13.

	Medida com erro de $10 \cdot \sigma$ Índice J(x) = 151,527221				Medida com erro de $20 \cdot \sigma$ Índice J(x) = 202,526941			
Medidas	UI:	r^N :	e_σ :	$\hat{b}$:	UI:	r^N :	e_σ :	$\hat{b}$:
$I^{PMU}:9-10$	0,856	0,440	0,579	0,579	0,856	0,439	0,578	0,578
$I^{PMU}:10-11$	0,653	-2,019	-2,411	-2,411	0,653	-2,076	-2,479	-2,479
$I^{PMU}:10-9$	0,856	-1,125	-1,481	-1,481	0,856	-1,126	-1,482	-1,482
$I^{PMU}:11-10$	0,653	0,472	0,564	0,564	0,653	0,415	0,496	0,496
$I^{PMU}:11-6$	0,628	1,324	1,564	1,564	0,628	1,243	1,468	1,468
$I^{PMU}:12-13$	0,444	-0,143	-0,156	-0,156	0,445	-0,520	-0,569	-0,569
$I^{PMU}:12-6$	0,530	0,195	0,220	0,220	0,531	0,735	0,832	0,832
$I^{PMU}:13-6$	0,427	0,816	0,888	0,888	0,427	0,538	0,585	0,585
$I^{PMU}:13-14$	0,668	0,889	1,069	1,069	0,668	1,007	1,211	1,211
$I^{PMU}:13-12$	0,444	0,699	0,764	0,764	0,445	0,322	0,352	0,352
$I^{PMU}:14-9$	0,606	0,703	0,823	0,823	0,606	0,587	0,686	0,686
$I^{PMU}:14-13$	0,668	0,808	0,972	0,972	0,668	0,926	1,114	1,114
$\delta^{PMU}:1-2$	0,472	-0,456	-0,504	-0,504	0,472	-0,463	-0,512	-0,512
$\delta^{PMU}:1-5$	1,073	0,164	0,240	0,240	1,073	0,144	0,211	0,211
$\delta^{PMU}:2-5$	0,886	-0,823	-1,099	-1,099	0,886	-0,824	-1,101	-1,101
$\delta^{PMU}:2-4$	0,642	-0,174	-0,206	-0,206	0,642	-0,181	-0,215	-0,215
$\delta^{PMU}:2-3$	0,615	1,583	1,859	1,859	0,615	1,581	1,856	1,856
$\delta^{PMU}:2-1$	0,031	0,507	0,507	0,507	0,031	0,506	0,506	0,506
$\delta^{PMU}:3-4$	0,029	-0,748	-0,749	-0,749	0,029	-0,748	-0,749	-0,749
$\delta^{PMU}:3-2$	0,011	0,338	0,338	0,338	0,011	0,338	0,338	0,338
$\delta^{PMU}:4-3$	1,581	-1,219	-2,280	-2,280	1,581	-1,210	-2,264	-2,264
$\delta^{PMU}:4-9$	1,930	2,057	4,473	4,473	1,930	1,998	4,344	4,344
$\delta^{PMU}:4-7$	0,613	-1,362	-1,598	-1,598	0,613	-1,343	-1,575	-1,575
$\delta^{PMU}:4-5$	0,031	-1,361	-1,361	-1,361	0,031	-1,361	-1,361	-1,361
$\delta^{PMU}:4-2$	0,012	0,215	0,215	0,215	0,012	0,215	0,215	0,215
$\delta^{PMU}:5-4$	0,701	-0,465	-0,568	-0,568	0,701	-0,466	-0,569	-0,569
$\delta^{PMU}:5-2$	0,017	-0,151	-0,151	-0,151	0,017	-0,151	-0,151	-0,151
$\delta^{PMU}:5-1$	0,016	-1,094	-1,094	-1,094	0,016	-1,095	-1,095	-1,095
$\delta^{PMU}:5-6$	0,376	-1,453	-1,552	-1,552	0,376	-1,453	-1,553	-1,553
$\delta^{PMU}:6-12$	0,746	1,104	1,378	1,378	0,746	1,923	2,400	2,400
$\delta^{PMU}:6-13$	0,523	-0,922	-1,041	-1,041	0,522	-1,964	-2,215	-2,215
$\delta^{PMU}:6-11$	0,949	-2,333	-3,217	-3,217	0,949	-2,599	-3,583	-3,583
$\delta^{PMU}:6-5$	0,043	1,102	1,103	1,103	0,043	1,102	1,103	1,103
$\delta^{PMU}:7-4$	0,043	0,272	0,273	0,273	0,043	0,274	0,274	0,274
$\delta^{PMU}:7-9$	0,722	-0,129	-0,159	-0,159	0,722	-0,133	-0,163	-0,163
$\delta^{PMU}:7-8$	0,147	-0,211	-0,213	-0,213	0,147	-0,209	-0,212	-0,212
$\delta^{PMU}:8-7$	0,122	-0,579	-0,583	-0,583	0,122	-0,578	-0,582	-0,582
$\delta^{PMU}:9-14$	0,852	-1,496	-1,965	-1,965	0,851	-2,080	-2,732	-2,732
$\delta^{PMU}:9-4$	0,019	0,661	0,661	0,661	0,019	0,661	0,661	0,661
$\delta^{PMU}:9-7$	0,073	-0,501	-0,503	-0,503	0,073	-0,502	-0,503	-0,503
$\delta^{PMU}:9-10$	1,484	2,333	4,174	4,174	1,484	2,562	4,585	4,585
$\delta^{PMU}:10-11$	0,191	1,713	1,745	1,745	0,191	1,679	1,709	1,709
$\delta^{PMU}:10-9$	0,325	-1,503	-1,581	-1,581	0,325	-1,453	-1,528	-1,528
$\delta^{PMU}:11-10$	1,494	0,103	0,185	0,185	1,493	-0,165	-0,297	-0,297
$\delta^{PMU}:11-6$	0,169	-0,796	-0,807	-0,807	0,169	-0,843	-0,855	-0,855
$\delta^{PMU}:12-13$	2,223	4,153	10,122	10,122	2,215	8,259	20,068	20,068
$\delta^{PMU}:12-6$	0,106	-0,003	-0,003	-0,003	0,106	0,113	0,114	0,114
$\delta^{PMU}:13-6$	0,098	-0,003	-0,003	-0,003	0,098	-0,199	-0,200	-0,200

Continua...

Tabela 6.2: Sistema Híbrido com ruído gaussiano com EG simples na medida de ângulo de corrente da barra 12 para barra 13.

	Medida com erro de $10 \cdot \sigma$ Índice $J(x) = 151,527221$				Medida com erro de $20 \cdot \sigma$ Índice $J(x) = 202,526941$			
Medidas	UI:	r^N :	e_σ :	$\hat{b}$:	UI:	r^N :	e_σ :	$\hat{b}$:
$\delta^{PMU}:13-14$	1,167	0,271	0,417	0,417	1,167	0,684	1,052	1,052
$\delta^{PMU}:13-12$	0,226	-2,203	-2,259	-2,259	0,226	-4,265	-4,373	-4,373
$\delta^{PMU}:14-9$	0,136	-0,383	-0,387	-0,387	0,136	-0,476	-0,481	-0,481
$\delta^{PMU}:14-13$	0,137	-1,406	-1,419	-1,419	0,137	-1,357	-1,370	-1,370

6.3.4 Influência da inserção de PMUs no Índice UI de medidas SCADA

Para verificar o efeito da inserção de medidas fasoriais sincronizadas no processamento de EGs, neste exemplo foi considerada a presença de uma PMU na barra 5, disponibilizando as seguintes medidas fasoriais: tensão complexa na barra 5 e fluxos de corrente complexa da barra 5 para todas as suas adjacências (conforme destacado na Tabela 6.4).

Na tabela 6.3 foi comparado valores de UI s referentes aos planos de medição antes e depois de as medidas fasoriais sincronizadas serem inseridas. Para possibilitar uma análise mais refinada, na referida tabela as medidas foram classificadas considerando três faixas de valores de UI , conforme realizado em (BENEDITO, 2011). Desse modo, medidas com UI menor que 1,2 foram classificadas como boas, pois geralmente o processamento de EG, via as técnicas baseadas nos resíduos do estimador WLS, possibilita a detecção e identificação de EGs simples nessas medidas. As medidas que apresentam UI entre 1,2 e 2 foram classificadas como aceitáveis, pois o processo de identificação de EGs simples nessas medidas, através das técnicas baseadas na análise dos resíduos do estimador WLS, usualmente apresenta problema. Já as medidas com UI maior que 2 foram classificadas como medidas ruins, pois tanto a detecção quanto a identificação de EGs simples nessas medidas, através das técnicas baseadas na análise dos resíduos do estimador WLS, usualmente falham.

Tabela 6.3: Tabela de comparação

Parâmetros de análise	Antes	Depois
Índice UI Máximo	11,401	4,397
Média do Índice UI	1,152	0,854
Redundância Global	2,500	2,857
Medidas Virtual	5	5
Medidas Boas ($UI \leq 1,2$)	51	63
Medidas Aceitáveis ($1,2 < UI \leq 2$)	5	3
Medidas Ruins ($UI > 2$)	9	9
Total de medidas	70	80

Na tabela 6.3 podemos observar que o índice UI máximo melhorou (diminuiu) com a inserção de medidas de PMUs. Pode-se perceber também uma queda na média dos índices UI , observando uma melhora significativa no plano de medição em termos de processamento de EGs. Outros parâmetros a serem destacados são o aumento de medidas ditas como boas e aceitáveis. No caso da quantidade de medidas ruins, que possuem o índice UI muito elevado, não houve mudança.

Na tabela 6.4 são mostrados todos os índices UI s das medidas do plano de medição antes e depois da presença de medidas de PMUs. Em azul são destacadas as medidas que foram adicionadas no plano de medição. Destaca-se, em vermelho, a medida de injeção de potência ativa na barra 5 que antes tinha um índice UI muito elevado e depois da inserção das medidas de PMU teve seu valor reduzido.

Tabela 6.4: Valores de índices UI das medidas antes e depois da inserção de PMUs

Potências Ativas			Potências Reativas		
Medidas	Antes	Depois	Medidas	Antes	Depois
FA:1-2	0,289	0,197	FR:1-2	0,580	0,536
FA:2-3	0,243	0,222	FR:2-3	2,225	2,047
FA:3-4	1,274	0,878	FR:3-4	2,137	1,847
FA:4-2	0,321	0,171	FR:4-2	1,180	0,783
FA:4-5	0,489	0,214	FR:4-5	0,361	0,231
FA:5-2	0,292	0,173	FR:5-2	1,116	0,946
FA:5-6	0,333	0,214	FR:5-6	0,452	0,325
FA:6-5	0,333	0,214	FR:6-5	0,903	0,511
FA:6-5	0,900	0,838	FR:6-11	0,838	0,807
FA:6-12	0,613	0,612	FR:6-12	1,038	1,037
FA:6-13	0,454	0,453	FR:6-13	0,435	0,434
FA:7-4	0,422	0,266	FR:7-4	0,425	0,390
FA:7-8	-	-	FR:7-8	0,421	0,416
FA:7-9	0,422	0,267	FR:7-9	1,224	1,177
FA:8-7	-	-	FR:8-7	0,432	0,428
FA:9-4	0,421	0,265	FR:9-4	1,576	1,190
FA:9-10	0,976	0,964	FR:9-10	0,925	0,913
FA:9-14	0,756	0,734	FR:9-14	0,729	0,716
FA:10-9	0,976	0,964	FR:10-9	0,927	0,914
FA:10-11	4,230	3,286	FR:10-11	3,877	3,485
FA:11-6	0,891	0,830	FR:11-6	0,868	0,840
FA:12-13	3,308	3,305	FR:12-13	1,603	1,602
FA:13-6	0,449	0,449	FR:13-6	0,461	0,460
FA:14-13	0,908	0,900	FR:14-13	1,229	1,216
IA:1	0,281	0,184	IR:1	1,402	1,047
IA:2	6,478	3,685	IR:2	0,664	0,463
IA:5	11,401	3,141	IR:5	9,504	4,397
IA:7	-	-	IR:7	-	-
IA:8	-	-	IR:8	0,432	0,428
IA:9	0,756	0,521	IR:9	0,544	0,488
IA:13	0,835	0,835	IR:13	0,810	0,810
IA:14	0,665	0,661	IR:14	0,683	0,680
Fasores de Tensão e Corrente					
Medidas	Antes		Depois		

Continua...

Tabela 6.4: Valores de índices UI das medidas antes e depois da inserção de PMUs

V:1	0,149	0,129
V:2	0,150	0,129
V:3	0,155	0,134
V_{PMU}^5	-	0,134
V:6	0,156	0,134
V:8	0,149	0,128
V:12	0,160	0,138
θ_{PMU}^5	-	4,187
I_{PMU}^{5-4}	-	0,909
I_{PMU}^{5-2}	-	0,626
I_{PMU}^{5-1}	-	0,515
I_{PMU}^{5-6}	-	0,909
δ_{PMU}^{5-4}	-	2,054
δ_{PMU}^{5-2}	-	0,050
δ_{PMU}^{5-1}	-	0,054
δ_{PMU}^{5-6}	-	1,085

6.4 Índices UIs em um sistema somente com medidas de PMU

A última simulação feita nesse trabalho foi para analisar os índices UIs de um plano de medição com apenas medidas fasoriais sincronizadas. Embora saibamos que isso na prática não é viável devido ao elevado valor econômico desses equipamentos a simulação foi feita para analisar se medidas de PMUs realmente possuem índices UIs baixos. A tabela 6.5 mostra os valores encontrados dos índices UIs para um sistema formado apenas por medidas fasoriais sincronizadas.

Tabela 6.5: Índices UIs em um plano de medição só com medidas de PMUs

Medida	UI :	Medida	UI
V:1	0,1249	θ :1	0,7126
V:2	0,1269	θ :2	3,0678
V:3	0,1287	θ :3	0,3648
V:4	0,1282	θ :4	0,3587
V:5	0,1280	θ :5	0,4592
V:6	0,1259	θ :6	0,2727
V:7	0,1267	θ :7	0,2796
V:8	0,1235	θ :8	0,3349
V:9	0,1271	θ :9	0,2669
V:10	0,1277	θ :10	0,2674
V:11	0,1271	θ :11	0,2686
V:12	0,1275	θ :12	0,2716
V:13	0,1281	θ :13	0,2722
V:14	0,1297	θ :14	0,2731
I:1-2	0,6097	δ :1-2	0,4600
I:1-5	0,3692	δ :1-5	3,5287
I:2-5	0,4642	δ :2-5	2,9381

Continua...

Tabela 6.5: Índices UIs em um plano de medição só com medidas de PMUs

I:2-4	0,3577	δ :2-4	1,7138
I:2-3	0,3069	δ :2-3	0,7837
I:2-1	0,6175	δ :2-1	0,0275
I:3-4	0,8990	δ :3-4	0,0322
I:3-2	0,3056	δ :3-2	0,0123
I:4-3	0,8849	δ :4-3	1,5486
I:4-9	0,3810	δ :4-9	3,2226
I:4-7	0,5211	δ :4-7	1,1519
I:4-5	0,7175	δ :4-5	0,0397
I:4-2	0,3574	δ :4-2	0,0105
I:5-4	0,7175	δ :5-4	1,0872
I:5-2	0,4600	δ :5-2	0,0154
I:5-1	0,3691	δ :5-1	0,0144
I:5-6	0,3494	δ :5-6	0,5048
I:6-12	0,5907	δ :6-12	1,1641
I:6-13	0,4646	δ :6-13	0,6576
I:6-11	0,8323	δ :6-11	1,7389
I:6-5	0,3493	δ :6-5	0,0551
I:7-4	0,5212	δ :7-4	0,0624
I:7-9	0,7798	δ :7-9	1,9375
I:7-8	0,9999	δ :7-8	1,1551
I:8-7	0,9999	δ :8-7	0,8059
I:9-14	0,6358	δ :9-14	1,1118
I:9-4	0,3811	δ :9-4	0,0205
I:9-7	0,7798	δ :9-7	0,1117
I:9-10	0,9775	δ :9-10	2,3081
I:10-11	0,9584	δ :10-11	0,2208
I:10-9	0,9775	δ :10-9	0,3635
I:11-10	0,9584	δ :11-10	3,1671
I:11-6	0,8323	δ :11-6	0,2144
I:12-13	0,9689	δ :12-13	3,2617
I:12-6	0,5907	δ :12-6	0,1352
I:13-6	0,4646	δ :13-6	0,1166
I:13-14	0,7768	δ :13-14	1,8748
I:13-12	0,9689	δ :13-12	0,2381
I:14-9	0,6358	δ :14-9	0,1559
I:14-13	0,7768	δ :14-13	0,1603

Verifica-se que a maioria das medidas apresentam baixos índices UIs , no entanto o sistema apresenta ainda algumas medidas com índices UIs altos (destacados em vermelho na tabela 6.5).

A tabela 6.6 apresenta uma análise estatística dos valores dos índices UIs para três sistemas. O primeiro é formado por medidas de PMUs e 5 medidas virtuais (sem medida SCADA). O segundo apresenta apenas medidas de PMUs, exatamente as mesmas do primeiro sistema, no entanto ele não possui medida virtual alguma. O último sistema é composto por medidas SCADA e 5 medidas virtuais (sem medida de PMU).

Apesar de o valor da média para o sistema SCADA ser menor ele está bem próximo da média do sistema com PMUs, embora ainda possua menos medidas que o primeiro.

Podemos analisar também que o sistema com medidas de PMU possui mais medidas

ruins que o sistema com medidas SCADA, no entanto o valor máximo do índice UI é menor.

Tabela 6.6: Valores comparativos dos índices UIs para três sistemas de medição.

	PMUS com Medidas Virtuais	PMUS sem Medidas Virtuais	SCADA
Índice UI Máximo	3,272	3,529	5,738
Média dos Índices UI	0,568	0,679	0,543
Redundância Global	4,185	3,85	4,42
Medidas Virtuais	5	0	5
Medidas Boas ($UI \leq 1, 2$)	97	96	110
Medidas Aceitáveis ($1, 2 < UI \leq 2$)	6	5	6
Medidas Ruins ($UI > 2$)	5	7	3
Total de Medidas	113	108	124

É importante dizer que a remoção de uma medida com índice UI alto do plano de medição aumenta os índices UIs de outras medidas para valores ainda mais altos, devido a redução da redundância global de medidas do sistema. Logo, é necessário um estudo mais detalhado para verificar onde locar medidas de PMUs e SCADA para obtenção de sistemas de medição com medidas de baixo UI .

6.5 Considerações Finais

Neste capítulo a visão geométrica dos resíduos do estimador de estado WLS, baseada na obtenção e análise do índice UI desenvolvida para sistemas de medição SCADA em Benedito (2011), foi estendida para sistemas de medição híbridos. Ou seja, sistemas de medição contendo medidas convencionais SCADA e medidas de PMU. Para isto foi utilizado como base o estimador híbrido WLS proposto em Korres e Manousakis (2011). Porém, ao invés de utilizar o modelo de equações em coordenadas retangulares proposto em Korres e Manousakis (2011), nesta dissertação utilizou-se o usual modelo de equações em coordenadas polares.

Com base nas análises dos resultados de diversas simulações realizadas, algumas das quais apresentadas nas seções anteriores, ao longo deste capítulo destacaram-se alguns pontos interessantes relacionados ao efeito da inclusão de medidas de PMU no índice UI . De uma forma geral observou-se que a inclusão dessas medidas, em um sistema de medição composto apenas por medidas convencionais SCADA, possibilita realmente a obtenção de um sistema de medição formado por medidas com índices UIs menores. Sendo, portanto, um possível mecanismo para aumentar a possibilidade de sucesso no processamento de EGs via análise dos resíduos do estimador WLS.

Conclusão

As contribuições desse trabalho podem ser divididas em três segmentos principais.

A primeira contribuição, que está apresentada no capítulo 4, foi a comprovação que os erros das estimativas das variáveis de estado em um sistema com EG simples não-detectável (em uma medida de alto índice UI) são mais significativos que em medidas com EGs simples detectáveis (em medidas com índices UI s baixos). Consequentemente dá-se a importância de um estudo ainda mais detalhado do processamento de EGs em medidas com alto índice UI . Isso porque foi visto, através de várias simulações computacionais, que métodos convencionais de processamento de EGs pela análise dos resíduos do estimador WLS podem falhar nessas situações.

A segunda contribuição do trabalho, presente no capítulo 5, foi o estudo dos efeitos de diferentes ponderações no estimador de estado WLS e como isso pode afetar o índice UI das medidas e o processamento de EGs pela análise dos resíduos do estimador WLS. Os testes mostram que a ponderações σ^{FE} apresentou melhores resultados. Isso porque o uso dessa ponderação identificou, com mais facilidade, os EGs e proporcionou erros das estimativas das variáveis de estado menores. A razão dessa melhora, na exatidão das estimativas obtidas, ocorre em função de essa ponderação melhorar o condicionamento numérico da matriz Ganho.

A última contribuição, localizada no capítulo 6, mostra a extensão da visão geométrica dos resíduos do estimador de estado WLS, baseada na obtenção e análise do índice UI , para sistemas de medição híbridos, isto é, sistemas formados por medidas convencionais, obtidas via sistema SCADA, e por medidas fasoriais sincronizadas obtidas pelas PMUs. Embora sejam ainda bastante preliminares, os resultados numéricos apresentados neste capítulo indicam que a inserção de medidas fasoriais sincronizadas pode contribuir para o processamento de EGs através da análise dos resíduos do estimador de estado WLS. Isto em virtude de a inclusão dessas medidas ter contribuído para diminuição dos índices UI s das medidas disponíveis para estimação de estado.

7.1 Perspectivas Futuras

Com base nas principais contribuições deste trabalho, destacadas anteriormente, mais estudos são necessários no contexto de processamento de EGs através dos resíduos normalizados e do índice UI . Entre eles é possível destacar:

- ❑ Desenvolvimento de um procedimento para obtenção de sistemas de medição híbridos observáveis e isentos de medidas críticas e de conjuntos críticos de medidas, formados por medidas com índice UI menor que um valor pré-estabelecido, aumentando assim a possibilidade de sucesso no processamento de EGs através da análise dos resíduos do EE por WLS;
- ❑ Utilização do índice UI para aprimorar o teste HTI (MILI; CUTSEM; RIBBENS-PAVELLA, 1984): a eficiência do teste HTI depende do conjunto reduzido escolhido, ou conjunto de medidas suspeitas de estarem com EGs. A escolha desse conjunto geralmente está associada ao teste dos resíduos normalizados e, portanto, medidas apresentando elevados índices UI s e portadoras de EGs (que apresentariam baixos valores de resíduos normalizados) poderiam estar fora dessa escolha. A partir dessa constatação, verificou-se a possibilidade de utilizar o índice UI , para aprimorar a escolha do conjunto suspeito, para o teste HTI e, também, utilizar o índice UI para avaliar as estimativas finais obtidas;
- ❑ Utilização do índice UI para detecção e prevenção de ataques cibernéticos;
- ❑ Análise estatística da ocorrência de falhas para detecção e identificação de EGs simples em medidas apresentando altos índices UI s;
- ❑ Análise da influência do carregamento da rede no índice UI das medidas.

7.2 Publicações

A pesquisa que foi produzida nesta dissertação gerou o seguinte artigo que foi publicado em um importante congresso nacional:

VIEIRA, C. S.; MASSIGNAN, J. A. D.; LONDON JR, J. B. A. Avaliando o efeito da Inclusão de Medidas Fasoriais Sincronizadas para Processamento de Erros Grosseiros Através do índice de não-deteção de erros. **Congresso Brasileiro de Automática**, 2016, Vitória, ES, Brasil

Além dessa publicação, o trabalho em conjunto com o grupo de pesquisa em Estimção de Estado no LACO-SEP possibilitou a geração do seguinte artigo que foi também publicado em congresso:

FANTIN, C. A.; MASSIGNAN, J. A. D.; VIEIRA, C. S.; AVELINO, L. L.; LONDON JR, J. B. A. CAMILLO, M. H. M. Impacto da Modelagem de pseudo-medidas de carga na estimação de estado em sistemas de distribuição. **Congresso Brasileiro de Automática**, 2016, Vitória, ES, Brasil

Referências

- ABUR, A. A bad data identification method for linear programming state estimation. **IEEE Transaction on Power Systems**, 1990. v. 5, n. 3, p. 894–901, 1990.
- ABUR, A.; CELIK, M. K. A FAST ALGORITHM FOR THE WEIGHTED LEAST ABSOLUTE VALUE STATE ESTIMATION. 1991. v. 0, n. 6, 1991.
- ABUR, A.; EXPOSITO, A. G. **Power System State Estimation: Theory and Implementation**. New York: [s.n.], 2004. ISBN 0824755707.
- ALBUQUERQUE, A.; SIMÕES-COSTA, A. Tratamento de Erros Grosseiros em Estimadores de Estado Híbridos Multi-Estágios com Capacidade de Processamento de Medidas Fasoriais. In: **Simpósio de Especialistas e Planejamento da Operação e Expansão Elétrica**. Rio de Janeiro -RJ: [s.n.], 2012.
- ALMEIDA, M. C. D.; ASADA, E. N.; GARCIA, A. V. Power System Observability Analysis Based on Gram Matrix and Minimum Norm Solution. **IEEE Transaction on Power Systems**, 2008. v. 23, n. 4, p. 1611–1618, 2008.
- ALMEIDA, M. C. D.; GARCIA, A. V.; ASADA, E. N. Regularized Least Squares Power System State Estimation. **IEEE Transaction on Power Systems**, 2012. v. 27, n. 1, p. 290–297, 2012.
- ASHOK, A.; GOVINDARASU, M.; AJJARAPU, V. Online Detection of Stealthy False Data Injection Attacks in Power System State Estimation. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 2016. v. 3053, n. c, p. 1–1, 2016. ISSN 1949-3053. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7526441/>>.
- BALDICK, R.; CLEMENTS, K. A.; PINJO-DZIGAL, Z.; DAVIS, P. W. Implementing Nonquadratic Objective Functions for State Estimation and Bad Data Rejection. **IEEE Transaction on Power Systems**, 1997. v. 12, n. 1, 1997.
- BENEDITO, R.; LONDON, J. B. A.; BRETAS, N. G. Análise de Observabilidade em Sistemas Elétricos de Potência: Identificação de Ilhas Observáveis Através de Caminhos de Fatoração Associados à Matriz Jacobiana. In: **XI Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica**. Belém - PA: [s.n.], 2009.
- BENEDITO, R. A. d. S. **Índice de não-detecção de Erros Grosseiros no Processo de Estimação de Estado em Sistemas Elétricos de Potência**. Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2011.

BENEDITO, R. A. d. S.; ALBERTO, L. F. C.; BRETAS, N. G.; LONDON., J. B. A. J. Power system state estimation: Undetectable bad data. **International Transactions on Electrical Energy Systems**, 2013. 2013.

BOZZ, A. A. C. Metodologia para projeto de sistemas de medição confiáveis para estimação de estado considerando custo, medidas convencionais e fasoriais sincronizadas via Algoritmo Evolutivo e Matriz H. Tese (Doutorado), 2014.

BRETAS, N. G.; LONDON, J. B. A. J.; ALBERTO, L. F. C.; BENEDITO, R. A. S. Geometrical Approach on Masked Gross Errors for Power Systems State Estimation. In: **Power & Energy Society General Meeting**. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–7. ISBN 9781424442416.

BRETAS, N. G.; PIERETI, S. A.; BRETAS, A. S.; MARTINS, A. C. P. A Geometrical View for Multiple Gross Errors Detection , Identification , and Correction in Power System State Estimation. **IEEE Transaction on Power Systems**, 2013. v. 28, n. 3, p. 2128–2135, 2013.

BRETTAS, N. G. Network observability: Theory and algorithms based on triangular factorisation and path graph concepts. **General, Transmission and Distribution, IEEE Proceedings**, 1996. v. 143, n. 1, p. 123–128, 1996.

BULIRSCH, R.; STOER, J. **Introduction to Numerical Analysis**. 2. ed. [S.l.: s.n.], 1993.

CARO, E.; CONEJO, A. J.; MÍNGUEZ, R. Power System State Estimation Considering Measurement Dependencies. **IEEE Transaction on Power Systems**, 2009. v. 24, n. 4, p. 1875–1885, 2009.

CARO, E.; CONEJO, A. J.; MÍNGUEZ, R.; ZIMA, M.; ANDERSSON, G. Multiple Bad Data Identification Considering Measurement Dependencies. 2011. v. 26, n. 4, p. 1953–1961, 2011.

CASTILLO, M. R. M. Metodologia para Depuração off-line de Parâmetros Série e Shunt de Linhas de Transmissão através de Diversas Amostras de Medidas. Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia de São Carlos USP, 2010.

CELIK, M. K.; ABUR, A. A ROBUST WLAV STATE ESTIMATOR USING TRANSFORMATIONS. **Transactions on Power Systems**, 1992. v. 7, n. 1, p. 106–113, 1992.

CHAKHCHOUKH, Y.; ISHII, H. Coordinated Cyber-Attacks on the Measurement Function in Hybrid State Estimation. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2015. v. 30, n. 5, p. 2487–2497, 2015. ISSN 08858950.

CHAOJUN, G.; JIRUTITJAROEN, P.; MOTANI, M. Detecting False Data Injection Attacks in AC State Estimation. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 2015. v. 6, n. 5, p. 1–9, 2015.

CLEMENTS, K. A.; DAVIS, P. W.; KRUMPHOLZ, G. R. Power System State Estimation Residual ANALysis: An ALgorithm Using Network Topology. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, 1981. PAS-100, n. 4, p. 1779–1787, 1981.

- CUTSEM, T. V.; QUINTANA, V. H. Network parameter estimation using online data with application to transformer tap position estimation. **IEEE Proceedings**, 1988. v. 135, n. 1, p. 31 – 40, 1988.
- EHRENSPERGER, J. G. **Sistemas de medição fasorial sincronizada: análise do estado da arte e aplicações no monitoramento de sistemas de energia elétrica**. Tese (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.
- FALCÃO, D.; ASSIS, S. de. Linear Programming State Estimation: Error Analysis and Gross Error Identification. **IEEE Transactions on Power Systems**, 1988. v. 3, n. 3, p. 809 – 815, 1988.
- FALCAO, D. M.; ARIAS, M. A. State Estimation and Observability Analysis Based on Echelon Forms of the Linearized Measurement Models. **IEEE Transactions on Power Systems**, 1994. v. 9, n. 2, p. 979–987, 1994.
- FILHO, M. B. D. C.; SOUZA, J. C. S. D.; GUIMARAENS, M. A. R. Enhanced Bad Data Processing by by Phasor-Aided State Estimation. **IEEE Transaction on Power Systems**, 2014. v. 29, n. 5, p. 2200–2209, 2014.
- G, P. A.; THORP, J. S.; J., K. K. State Estimation with Phasor Measurements. **IEEE Transactions on Power Systems**, 1986. n. 1, p. 233–238, 1986.
- GÓMEZ-EXPÓSITO, A.; ABUR, A.; JAÉN, A. d. L. V.; GÓMEZ-QUILES, C. A. Multilevel State Estimation Paradigm for Smart Grids. 2011. v. 99, n. 6, 2011.
- HANDSCHIN, E.; KLIOKYS, E. TRANSFORMER TAP POSITION ESTIMATION AND BAD DATA DETECTION USING DYNAMIC SIGNAL MODELLING. **IEEE Transaction on Power Systems**, 1995. v. 10, n. 2, p. 810–817, 1995.
- HANDSCHIN, E.; SCHWEPPE, F. C.; KOHLAS, J.; FIECHTER, A. Bad Data Analysis for Power System State Estimation. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, 1975. PAS-94, n. 2, 1975.
- HUBER, P. Robust Estimation of a Location Parameter. **Annals Math. Statist**, 1964. v. 35, p. 73–101, 1964.
- IRVING, M. R.; OWEN, R. C.; STERLING, M. J. H. Power-system state estimation using linear programming. **Proceeding of the IEEE**, 1978. v. 125, n. 9, p. 879 – 885, 1978.
- JR, J. B. A. L.; ALBERTO, L. F. C.; BRETAS, N. G. Analysis of measurement-set qualitative characteristics for state-estimation purposes. **General, Transmission Distribution, IET**, 2007. v. 1, n. 1, p. 39–45, 2007.
- KORRES, N. M.; MANOUSAKIS, G. N. State estimation and observability analysis for phasor measurement unit measured systems. **IET Generation, Transmission & Distribution**, 2011. v. 6, p. 902–913, 2011.
- KOTIUGA, W. W.; VIDYASAGAR, M. Bad data Rejection properties of Weighted Least Absolute Value Techniques Applied to Static State Estimation. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, 1982. PAS-101, n. 4, p. 844–853, 1982.

- LIU, Y.; NING, P.; REITER, M. K. False Data Injection Attacks against State Estimation in Electric Power Grids. **ACM Transactions on Information and System Security**, 2009. v. 14, n. 1, p. 1–33, 2009. ISSN 10949224. Disponível em: <<http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1952982.1952995>>.
- LONDON, J. B. A. **Contribuições para o processo de Estimação de Estado em Sistemas Elétricos de Potência**. Tese (Livre-docência) — Escola de Engenharia de São Carlos USP, 2012.
- LONDON JR., J. B. B.; ALBERTO, L. F. C.; BRETAS, N. G.; DELBEM, A. B. D. Undetectable errors in power system measurements. In: **XI Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão ELétrica**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2004. p. CD – Artigo: SP-014,6 páginas.
- MILI, L.; CUTSEM, T. V.; RIBBENS-PAVELLA, M. Hypothesis Testing Identification : A New Method for Bad Data Analysis in Power System State Estimation. **IEEE Power Engineering Review**, 1984. v. 84 WM, n. 023-8, p. 3239–3252, 1984.
- MONTICELLI, A. **State Estimation in Electric Power Systems: A generalized Approach**. Massachusetts, USA: Kluwer Academic Publishers, 1999.
- _____. Electric Power System State Estimation. 2000. v. 88, n. 2, 2000.
- MONTICELLI, A.; GARCIA, A. Reliable Bad Data Processing for Real-Time State Estimation. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, 1983. PAS-102, n. 5, p. 1126–1139, 1983.
- MONTICELLI, A.; WU, F. F.; YEN, M. Multiple Bad Data Identification for State Estimation by Combinatorial Optimization. **IEEE Transaction on Power Delivery**, 1986. v. 0PWRD-1, n. 3, p. 361–369, 1986.
- PHANIRAJ, V.; MILI, L.; ROUSSEEUW, P. J. LEAST MEDIAN OF SQUARES ESTIMATION IN POWER SYSTEMS. **IEEE Transactions on Power Systems**, 1991. v. 6, n. 2, p. 511–523, 1991.
- PIERETI, S. A. R. **Configurador de Redes Baseado na Representação Nó-Profundidade Para Efeito de Estimação de Estado**. Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia de São Carlos, 2007.
- ROUSSEEUW, P. J.; LEROY, A. M. **Robust Regression and Outlier Detection**. New York, USA: [s.n.], 1987.
- SCHWEPPE, F. C.; HANDSCHIN, E. J. Static State Estimation in Electric Power Systems. **Proceeding of the IEEE**, 1974. v. 62, n. 7, p. 972–982, 1974.
- SCHWEPPE, F. C.; WILDES, J. Power System Static-State Part I: Exact Model. **Transactions on Power Apparatus and Systems**, 1970. Pas-89, n. 1, p. 120–125, 1970.
- THORP, J. S.; PHADKE, A. G.; KARIMI, K. J. Real Time Voltage-Phasor Measurements for Static State Estimation. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, 1985. PAS-104, n. 11, p. 3098–3106, 1985.

XIAOLI, Y.; ZONGSHUAI, H.; RUSEN, F.; HENG, Y.; HAOTIAN, X.; YONG, W.; XIUXIA, T. Weighted Least Squares State Estimation Based on the Optimal Weight. 2015. n. 3, p. 12–16, 2015.

ZHAO, J.; ZHANG, G.; SCALA, M. L. A Two-stage Robust Power System State Estimation Method with Unknown Measurement Noise. In: . [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–5. ISBN 9781509041688.

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**, 2006. v. 21, n. 4, p. 1930–1937, 2006.

ZHU, J.; ABUR, A. Bad Data Identification When Using Phasor Measurements. In: **Power Tech.** [S.l.: s.n.], 2007. p. 1676–1681. ISBN 9781424421909.

Anexos

Transformação de Householder para solução de sistemas lineares

No processo de estimação de estado é necessário resolver iterativamente a equação (2.16) até que exista convergência do método de Newton-Raphson para os estados do sistema. Esse sistema linear está indicado novamente abaixo:

$$\Delta \underline{x}^k = G(\underline{x}^k)^{-1} \cdot H(\underline{x}^k)^T \cdot R^{-1} \cdot \Delta \underline{z}(\underline{x}^k)$$

Essa equação requer que seja calculada a matriz inversa de $G(\underline{x}^k)$, ou seja, o seguinte sistema linear deve ser resolvido:

$$G(\underline{x}^k) \cdot \Delta \underline{x}^k = H(\underline{x}^k)^T \cdot R^{-1} \cdot \Delta \underline{z}(\underline{x}^k) \quad (\text{A.1})$$

Devido ao possível mal condicionamento da matriz ganho ($G(\underline{x}^k)$), o tradicional método de eliminação gaussiana, também conhecido como fatoração LU, pode não ser numericamente adequado para convergência do método de Newton. Como solução para esse problema é viável empregar a decomposição QR, em que a matriz ganho é escrita como o produto de uma matriz ortogonal (Q) com uma matriz triangular superior (R). Para isso é possível empregar a transformação de Householder conforme está descrito em Bulirsch e Stoer (1993) e resumido nesse apêndice.

Para simplificar a análise, a equação (A.1) será escrita conforme (A.2), aonde $x = \Delta \underline{x}^k$ e $y = H(\underline{x}^k)^T \cdot R^{-1} \cdot \Delta \underline{z}(\underline{x}^k)$.

$$G \cdot x = y \quad (\text{A.2})$$

A transformação de Householder é aplicada coluna por coluna nos dois lados da equação acima, até que a matriz que multiplica x seja triangular. A matriz ganho quadrada $n \times n$ pode ser escrita da seguinte forma:

$$G = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & \cdots & g_{1n} \\ g_{21} & g_{22} & \cdots & g_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{n1} & g_{n2} & \cdots & g_{nn} \end{bmatrix} \quad (\text{A.3})$$

Deve ser obtida uma matriz de transformação de Householder Q_1 a partir do vetor coluna $g'_1 = (g_{11}, g_{21}, \dots, g_{n1})^t$. de forma que:

$$Q_1 \cdot G = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ 0 & g_{22}^{(1)} & \cdots & g_{2n}^{(1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & g_{n2}^{(1)} & \cdots & g_{nn}^{(1)} \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

A matriz de Householder Q_1 é calculada com a equação:

$$Q_1 = I_n - \frac{2v_1 v_1^t}{v_1^t v_1} \quad (\text{A.5})$$

onde, I_n é a matriz identidade de dimensão n e v_1 é um vetor também com a dimensão n . Esse vetor, por sua vez, é calculado através do vetor coluna g'_1 , ou seja, o vetor da matriz G do qual são zerados todos os valores abaixo da diagonal principal.

O vetor v_1 é determinado com $v_1 = g'_1 - \bar{g}_1$, sendo que $\bar{g}_1 = (\pm \|g'_1\|_2, 0, \dots, 0)^t$, onde o sinal do elemento não nulo desse vetor é o oposto do sinal do elemento na respectiva posição do vetor g'_1 .

Esse processo aplicado a resolução do sistema linear (A.2) pode ser resumido da seguinte forma.

1. A partir do vetor coluna g'_1 , do qual se deseja zerar os elementos abaixo da diagonal principal, é obtido $\bar{g}_1 = (\pm \|g'_1\|_2, 0, \dots, 0)^t$.
2. É calculado o vetor auxiliar $v_1 = g'_1 - \bar{g}_1$.
3. A matriz de Householder é obtida com (A.5).
4. Essa matriz é multiplicada nos dois lados do sistema linear (A.2), de forma a zerar os elementos da primeira coluna da matriz ganho abaixo da diagonal principal.

Essas operações podem ser repetidas até que a matriz do lado direito da equação (A.2) seja triangular superior.

Após a primeira coluna ter os elementos desejados zerados, o processo descrito acima é empregado para zerar os elementos da segunda coluna. Para isso calculamos a matriz Q_2 de forma que:

$$Q_2 \cdot Q_1 \cdot G = Q_2 \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ 0 & g_{22}^{(1)} & \cdots & g_{2n}^{(1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & g_{n2}^{(1)} & \cdots & g_{nn}^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & \cdots & r_{1n} \\ 0 & r_{22} & r_{23} & \cdots & r_{2n} \\ 0 & 0 & g_{23}^{(2)} & \cdots & g_{2n}^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & g_{n3}^{(2)} & \cdots & g_{nn}^{(2)} \end{bmatrix} \quad (\text{A.6})$$

A matriz Q_2 contém uma matriz de Householder Q'_2 e uma matriz identidade I_1 com dimensão unitária da seguinte forma:

$$Q_2 = \begin{bmatrix} I_1 & 0 \\ 0 & Q'_2 \end{bmatrix} \quad (\text{A.7})$$

Sendo que a matriz de Householder Q'_2 é quadrada e tem dimensão $n - 1$. Ela é obtida com o processo já descrito, o vetor empregado para os cálculos é o vetor da segunda coluna $g'_2 = (g_{22}^{(1)}, g_{32}^{(1)}, \dots, g_{n2}^{(1)})^t$.

Note que, os elementos nulos da matriz Q_2 não são escalares mais sim matriciais e que a dimensão da matriz de Householder Q'_2 diminuiu com relação a Q_1 . O mesmo vale para os vetores auxiliares v_2 e $\bar{g}_2$ que são empregados no cálculo da matriz Q'_2 .

Finalmente Q_2 é multiplicada dos dois lados do sistema linear (A.2) para zerar os elementos abaixo da diagonal principal na segunda coluna.

Repetido esse processo para cada coluna é possível triangularizar a matriz ganho e de maneira direta resolver o sistema linear em questão conforme:

$$Q_{n-1} \cdot \dots \cdot Q_2 \cdot Q_1 \cdot G \cdot x = Q_{n-1} \cdot \dots \cdot Q_2 \cdot Q_1 \cdot y \quad (\text{A.8})$$

$$Q \cdot G \cdot x = R \cdot x = Q \cdot y \quad (\text{A.9})$$

Dessa forma, o sistema linear (A.2), que existe no problema de estimação de estado, pode ser resolvido evitando possíveis complicações numéricas caso o tradicional método de eliminação gaussiana seja empregado.