MARCIO ANDRE RIBEIRO GUIMARAENS

SUPRESSÃO DE ERROS GROSSEIROS DE MEDIÇÃO ATRAVÉS DA COOPERAÇÃO ENTRE ESTIMADORES DE ESTADO INDEPENDENTES

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Doutor, Área de concentração: Computação Científica em Sistemas de Potência.

Orientadores: Prof. Milton Brown Do Coutto Filho Prof. Julio Cesar Stacchini de Souza

> Niterói 2015

FICHA CATALOGRÁFICA

MARCIO ANDRE RIBEIRO GUIMARAENS

PROCESSAMENTO DE ERROS GROSSEIROS NA ESTIMAÇÃO DE ESTADOS AUXILIADA POR SINCROFASORES

Tese apresentada ao Curso de Pós Graduação em Computação da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Doutor, Área de concentração: Computação Científica em Sistemas de Potência.

Apresentada em 14 de Maio de 2015

BANCA EXAMINADORA

Prof. Julio Cesar Stacchini de Souza, D.Sc. – Orientador UFF – Universidade Federal Fluminense

Prof. Milton Brown Do Coutto Filho, D.Sc. - Orientador UFF – Universidade Federal Fluminense

Prof. Célio Vinicius Neves de Albuquerque, Ph.D. UFF – Universidade Federal Fluminense

Prof. Simone de Lima Martins, D.Sc. UFF – Universidade Federal Fluminense

Prof. Djalma Mosqueira Falcão, Ph.D. COPPE/UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

> Prof. Ricardo Bernardo Prada, Ph.D. PUC-Rio

À minha família, Claudia, Julia e Gabriel, em especial à minha amada esposa Claudia, pelo apoio, incentivo e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por estar sempre presente em minha vida, dando-me forças nas adversidades, tranquilidade na execução da tarefa e coragem para dedicar todo o tempo necessário a este projeto.

Aos meus orientadores, Professor Milton Brown Do Coutto Filho e Professor Julio Cesar Stacchini de Souza pelo acompanhamento constante, sempre com sugestões e críticas essenciais à elaboração desta Tese.

Aos amigos pelo apoio, sugestões, e pelas horas de descanso, quando me ajudavam a reduzir o stress.

À CAPES pela concessão de Bolsa de Estudos para realização do curso de doutorado.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram e/ou colaboraram para a execução deste trabalho.

A utilização plena de unidades de medição fasorial (UMFs) em sistemas elétricos de potência envolve interessantes aspectos, notadamente: diversidade de dispositivos necessários à medição; expressivo volume de dados levados a processamento; confiabilidade do sistema de aquisição e comunicação de dados a longas distâncias; flexibilidade para atender aplicações que estabelecem diferentes requisitos.

A função Estimação de Estado (EE) se constitui em um dos principais aplicativos de Sistemas de Gerenciamento de Energia (SGEs). Destina-se ao processamento e consequente depuração de telemedidas (convencionalmente, magnitudes de tensões, fluxos e injeções de potência ativa/reativa), obtidas por meio de unidades terminais remotas (UTRs), integradas ao sistema de controle supervisório e aquisição de dados (SCADA), espalhadas pelas barras da rede sob supervisão. A EE leva em conta incertezas inerentes aos processos de medição, bem como busca suprimir medidas portadoras de erros grosseiros, para obter a estimativa mais provável do estado operativo do sistema.

Diversos tópicos relacionados à EE têm sido intensamente estudados com o objetivo de melhorar a confiabilidade dos resultados do processo de estimação, constituindo avanços no processamento de erros grosseiros de medição. Para este fim, a medição sincronizada de fasores tem sido apontada como importante complemento àquela realizada por UTRs para a EE.

Esta Tese propõe uma metodologia em que estimadores de estado independentes atuem de forma cooperativa para beneficiar a depuração de medidas portadoras de erros grosseiros, advindas de UTRs e/ou UMFs. Resultados numéricos de estudos de simulação com sistemas considerados como referência para estudos de EE são apresentados e discutidos. Dentre os aspectos estudados podem-se destacar: aperfeiçoamento do processo de EE, no que diz respeito à confiabilidade das estimativas obtidas; integração de medidas fasoriais sincronizadas e medidas convencionais; tratamento do efeito de espalhamento de medidas portadoras de erros grosseiros; avaliação de situações envolvendo a criticalidade de medidas.

The full utilization of Phasor Measurement Units (PMUs) in power systems has interesting aspects, namely: large number of measurement points; impressive amount of data to be processed; reliability of the long distance data acquisition and communication system; flexibility to satisfy different application requisites.

The state estimation (SE) function is one of the main applications of an Energy Management System (EMS). Processing and debugging available conventional measurements (e.g., voltage magnitude, active/reactive power flows and injections), obtained from remote terminal units (RTUs), SE takes into account errors inherent to metering systems and suppresses eventual gross measurement errors, to obtain the most likely estimate of the system operating state.

Several topics related to SE have been intensively studied, so as to improve the reliability of the estimation process results, in view of bad data processing enhancements. In this line, PMU measurements has been indicated as an important complement of the measurements coming from RTUs.

This work proposes a methodology in which independent state estimators perform Numerical results of simulation studies carried out with benchmark systems for SE are presented and discussed. Among the studied aspects one can highlight: enhancement of the SE process, considering the reliability of the results achieved; integration of synchrophasors and conventional measurements; analysis of the gross error smearing effect; evaluation of criticalities in the measurement set.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

| 1.1 Considerações Gerais | 1 |
|--------------------------|---|
| 1.2 Objetivos | 3 |
| 1.3 Estrutura da Tese | 6 |
| 1.4 Publicações | 6 |

CAPÍTULO 2

ESTIMAÇÃO DE ESTADO

| 2.1 Introdução | 7 |
|--------------------------------|----|
| 2.2 Etapas | 8 |
| 2.3 Filtragem | 9 |
| 2.4 Análise de Observabilidade | |
| 2.5 Análise de Resíduos | |
| 2.6 Modelagem | 17 |

CAPÍTULO 3

SINCROFASORES NA ESTIMAÇÃO DE ESTADO

| 3.1 Introdução | |
|--|----|
| 3.2 Considerações Iniciais | |
| 3.3 Medidas de Corrente na Estimação de Estado | |
| 3.4 Revisão da Literatura | 35 |
| 3.5 Conclusões | 42 |

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA PROPOSTA

| 4.1 Introdução 4.2 Nomenclatura | 43 45 |
|--|----------------------------|
| 4.3 Processamento de EG | 46 |
| 4.4 Integração de Dados na EE | 48 |
| 4.4.1 Único Estimador | 49 |
| 4.4.2 Estimadores Múltiplos | 49 |
| 4.5 Processamento de EG com abordagem PHASE | 50 |
| 4.5.1 Abordagem PHASE Frrol Indicador não d | ofinido |
| | ennuo. |
| 4.5.1.1 Estimador Sync | 50 |
| 4.5.1.1 Estimador Sync 4.5.1.2 Estimador Conv | 50 51 |
| 4.5.1.1 Estimador Sync 4.5.1.2 Estimador Conv 4.5.2 Diagnóstico | 50 51 53 |
| 4.5.1 Abordagem HAOL 4.5.1.1 Estimador Sync 4.5.2 Diagnóstico 4.5.3 Identificação do EG | 50 51 53 54 |
| 4.5.1 Abordagem HAGE 4.5.1.1 Estimador Sync 4.5.2 Estimador Conv 4.5.3 Identificação do EG 4.5.3.1 EG em medida convencional | 50 51 53 54 55 |

| 4.6 Estimação Final do Estado | |
|--|-------------------------|
| 4.7 Dos Erros Grosseiros oriundos de PMUsErro! | Indicador não definido. |
| 4.7.1 Erros de Desempenho de PMUs Erro! | Indicador não definido. |
| 4.7.2 Erros de Desempenho de PDCs Erro! | Indicador não definido. |
| 4.7.3 Erros no canal de comunicação Erro! | Indicador não definido. |

CAPÍTULO 5

RESULTADOS OBTIDOS

| 5.2 Descrição das Simulações 58 |
|--|
| 5.3 Simulações no Sistema IEEE 14 Barras 59 |
| 5.3.1 EG em medidas Convencionais 61 |
| 5.3.2 EG em medidas Fasoriais 62 |
| 5.3.3 EG em Dados Críticos |
| 5.4 Simulações no Sistema IEEE 30 Barras66 |
| 5.5 Simulações no Sistema IEEE 118 Barras 69 |
| 5.7 Erros Simultâneos em Medidas SCADA e Fasoriais |
| 5.8 Complexidade do Algoritmo |
| 5.9 Estimação Final |

CAPÍTULO 6

| CONCLUSÕES E PESQUISAS FUTURAS | . 87 |
|--------------------------------|------|
| Referências | . 91 |
| Bibliografia não Referenciada | . 99 |

APÊNDICE A

| CÁLCULO DA MATRIZ DE COVARIÂNCIA DO ESTADO | Erro! Indicador não |
|--|---------------------|
| definido. | |

APÊNDICE B

LINHAS DE CÓDIGO DA DEPURAÇÃO DE EG Erro! Indicador não definido.

LISTA DE FIGURAS

| Figura 2.1 – | Sistema de 3 Barras com Sistema de medição SM0 | 17 |
|--------------|--|----|
| Figura 2.2 – | Modelo П | 19 |
| Figura 2.3 – | Modelo de Transformador de tape variável | 19 |
| Figura 2.4 – | Modelo π Equivalente de Transformador de tape variável | 20 |
| Figura 2.5 – | Modelo π Equivalente | 22 |
| Figura 3.1 – | Modelo FASE de estimação | 34 |
| Figura 4.1 – | Arquitetura simplificada do processamento de EG proposto | |
| | pelo PHASE | 49 |
| Figura 5.1 – | Configuração SM1 utilizada no sistema IEEE14 Barras | 61 |
| Figura 5.2 – | Configuração SM2/SMF2 utilizada no sistema IEEE30 Barras | 66 |
| Figura 5.3 – | Configuração SM3 utilizada no sistema IEEE118 Barras | 69 |
| Figura 5.4 – | Configuração SMF3 utilizada no sistema IEEE118 Barras | 70 |

| Tabela 1.1 – | Exemplo hipotético de uma análise residual | _ 16 |
|---------------|---|------|
| Tabela 4.1 – | Validação de dados e Diagnóstico com PHASE | _ 50 |
| Tabela 5.1 – | Casos 1 e 2 com a ocorrência de EG únicos e múltiplos em | |
| | medidas convencionais | _ 65 |
| Tabela 5.2 – | Casos 3 e 4 com a ocorrência de EG únicos e múltiplos em | |
| | medidas convencionais | _ 65 |
| Tabela 5.3 – | Indicadores globais dos resultados das simulações | _ 65 |
| Tabela 5.4 – | Casos 5 e 6 com a ocorrência de EG únicos e múltiplos em | |
| | medidas convencionais | _71 |
| Tabela 5.5 – | Teste <i>r</i> ^N do estimador híbrido para o Caso 8 – EGs simultâneos_ | 72 |
| Tabela 5.6 – | Testes residuais do estimador convencional auxiliado pelo | |
| | PHASE para o EG em <i>P</i> ₆₋₁₃ e <i>Q</i> ₆₋₁₃ | 73 |
| Tabela 5.7 – | Testes residuais do estimador convencional auxiliado pelo | |
| | PHASE para o Caso 8 | 73 |
| Tabela 5.8 – | Testes <i>r</i> _{phase} do estimador convencional auxiliado pelo PHASE | |
| | para o <i>Caso 8</i> | _74 |
| Tabela 5.9 – | EC com o sistema de medição SCADA da Figura 5.1 | 77 |
| Tabela 5.10 - | EH com o sistema de medicao SCADA da Figura 5.1 e PMUs | |
| | nas barras 2, 6, 7 e 9 | 78 |
| Tabela 5.11 - | Estimador Sync com o sistema de medicao PMU nas | |
| | Barras 2, 6, 7 e 9 apenas | 78 |
| Tabela 5.12 - | Media Aritmetica entre os estados Conv e Sync das Tabelas 5.9 | |
| | e 5.11 | 79 |
| Tabela 5.13 - | Media Ponderada entre os estados Conv e Sync das Tabelas 5.9 | 9 |
| | e 5.11 | 79 |
| Tabela 5.14 - | Fusao de dados entre os estados Conv e Sync das Tabelas 5.9 | |
| | e 5.11 | 79 |
| Tabela 5.15 - | EC com sistema de medicao da Figura 5.1 porem com medidas | |
| | P3 e Q3 portadoras de EG | _80 |
| Tabela 5.16 - | EH com mesmo sistema de medicao da Tabela 5.10, porem com | ı |
| | medidas P3 e Q3 portadoras de EG | 80 |
| | | 00 |

| Tabela 5.17A – Media Aritmetica com EC auxiliado pelo PHASE porem sem | |
|---|----|
| medidas P3 e Q3 portadoras de EG | 81 |
| Tabela 5.17B – Media Ponderada com EC auxiliado pelo PHASE porem sem | |
| medidas P3 e Q3 portadoras de EG | 81 |
| Tabela 5.17C – Fusao de Dados com EC auxiliado pelo PHASE porem sem | |
| medidas P3 e Q3 portadoras de EG | 81 |
| | |

PRINCIPAIS SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

| nb | Número de barras |
|-------|---|
| z | vetor de medidas |
| x | vetor de estado |
| h | vetor das funções não lineares que relacionam x e z |
| R | Matriz de covariância do erro das medidas |
| н | Matriz Jacobiano |
| G | Matriz de Ganho |
| r | Resíduo |
| ЃN | Resíduo Normalizado |
| SEE | Sistema de Energia Elétrica |
| COS | Centro(s) de Operação do Sistema |
| SCADA | Sistema de Controle Supervisório e Aquisição de Dados |
| SGE | Sistema de Gerenciamento de Energia |
| EG | Erro Grosseiro |
| EE | Estimação de Estado |
| UTR | Unidade Terminal Remota |
| GPS | Global Positioning System |
| UMF | Unidade de Medição Fasorial |
| EVT | Erro Vetorial Total |
| ONS | Operador Nacional do Sistema Elétrico |
| EC | Estimador Convencional |
| EH | Estimador Híbrido |

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

Em grande medida, a sociedade moderna depende da energia elétrica para os mais diversos fins. As fontes primárias de energia muitas vezes ocorrem em locais distantes dos centros urbanos e industriais, sendo necessárias rede elétricas de transporte até tais consumidores.

O conjunto de equipamentos que atuam de maneira coordenada de forma a gerar, transmitir e fornecer energia elétrica aos consumidores, dentro de certos padrões operativos e observadas restrições econômicas/ambientais, formam o que se conhece por sistema de energia elétrica (SEE).

O Brasil se destaca no cenário mundial, por ter uma capacidade energética de geração hidroelétrica considerável. País de grande extensão territorial, demandou a construção de uma rede de transmissão de energia elétrica de grande porte (milhares de barras) que para ser convenientemente operada requer dados obtidos diretamente no campo, recebidos remotamente.

A aquisição de dados e correspondente processamento possibilita, por exemplo, a avaliação de sobrecargas em ramos da rede, assim como de tensões anormais em barramentos (nós elétricos), levando a decisões operativas ou de planejamento da rede elétrica.

Os Centros de Operação do Sistema (COS) possuem ferramentas computacionais sofisticadas, reunidas em um sistema de gerenciamento de energia (SGE), para que se possam realizar atividades de controle supervisório, a partir de medidas remotamente transmitidas via sistema SCADA (acrônimo de *supervisory control and data acquisition*). Valores medidos estão sempre sujeitos a erros de baixa

1

magnitude e, eventualmente, de elevada magnitude (grosseiros), neste caso trazidos pelo mal funcionamento de equipamentos de medição, transformadores de instrumentos, etc.

Para lidar com tais erros e construir uma base de dados completa e confiável para a operação de redes de potência, Schweppe em 1970 **[SCH70]** propôs a criação da função Estimação de Estado (EE) em COS. Basicamente, a EE atua como um filtro capaz de detectar, identificar e remover inconsistências em dados redundantes de medição. Entende-se como redundância para a EE o excedente de medidas disponíveis em relação ao número de variáveis de estado a estimar. Considerada como ferramenta básica de SGEs, a EE produz resultados que alimentam os demais aplicativos de análise de redes (destinados a avaliação de segurança e otimização), sendo importantes para tomada de decisão operativa em tempo real **[MOR09]**.

Deve-se destacar que a EE necessita condições ou requisitos para seu correto funcionamento, tais como: redundância suficiente para suprir as rotinas de validação de dados; configuração correta da rede elétrica atual do sistema; valores corretos de parâmetros elétricos dos ramos da rede; simultaneidade dos dados adquiridos remotamente em diversos pontos da rede significativamente distantes. Tais requisitos se constituem em grandes desafios, pois nem sempre se concretizam: a redundância de dados envolve elevados investimentos; a correta configuração corrente da rede e o perfeito conhecimento dos seus parâmetros elétricos podem apresentar erros; unidades terminais remotas (UTRs) que fornecem convencionalmente medidas para a EE não fazem leituras simultâneas.

A função EE compõe-se de diversos módulos, a saber: configurador da rede elétrica; análise de observabilidade; filtragem de telemedidas; análise de resíduos da estimação. No módulo destinado à configuração da rede, ocorre a transformação da representação denominada *seção de barra-dispositivo seccionador* para o modelo conhecido por *barra-ramo*. A análise de observabilidade consiste em verificar se as medidas obtidas em uma determinada varredura da rede permitem a EE do sistema em sua intereza. No módulo de filtragem, i.e., aquele destinado à estimação propriamente dita, estimativas do estado/medidas são obtidas, usualmente através de algoritmos baseados no método dos mínimos quadrados ponderados. Por fim, procede-se à análise de resíduos da estimação que se destina a avaliar a consistência dos resultados obtidos pelo processo de EE.

Desde a sua introdução há quase cinco décadas, a função EE mantém-se como um campo fértil para pesquisa. Um considerável número de publicações sobre este multifacetado problema, que excursiona da modelagem matemática até a implementação em COS, pode ser encontrado em **[MON99]** e **[ABU04]**. Dentre os diversos tópicos de pesquisa atuais sobre EE, figura em destaque o uso de todos os dados sobre o estado da rede elétrica disponíveis para processamento. Neste sentido, a oferta de medidas colhidas por unidades de medição fasorial (UMFs) e respectiva incorporação ao processo de EE assumem especial interesse.

Na década de 1980, uma nova tecnologia de medição foi desenvolvida **[PHA02]**, tomando por base relés de distância (symmetrical component distance relay – SCDR), com capacidade para obter o ângulo das grandezas fasoriais do sistema elétrico, sincronizadamente (com precisão de até 1 μ s), através de um sistema de posicionamento global (global positional system - GPS).

O primeiro protótipo de uma UMF foi construído na Universidade Virginia Tech, tendo sido comercializado pela empresa Macrodyne, em 1988. Atualmente, diversas empresas fabricam suas próprias UMFs.

Pesquisas recentes [MOR09] vêm sendo feitas de modo a aproveitar medidas fornecidas por UMFs na EE, notadamente em estudos de análse de observabilidade da rede e de algoritmos de filtragem do estado. Fundamentalmente, duas vertentes se apresentam: uma sustenta que as medidas conhecidas por sincrofasores devem ser incorporadas à EE, sem contudo alterar significativamente os processos já instalados [PHA08]; outra considera que medidas fasoriais e convencionais devam ser processadas em conjunto por um estimador híbrido [PSE06]. Nesta Tese, ambas as possibilidades de processamento de medidas serão abordadas.

1.2 Objetivos

Na EE convencional, medidas obtidas através de um sistema SCADA são processadas, nomeadamente: fluxos/injeções de potência ativa e reativa; magnitudes de tensão de barramentos. Como dito anteriormente, o processo de estimação encontra-se estratificado em módulos, correspondentes à obtenção da configuração atual da rede, análise de observabilidade, filtragem e validação de dados. Dentre tais camadas de processamento, destaca-se a depuração de dados como uma das mais

árduas, notadamente no que diz respeito ao tratamento de erros grosseiros de medição.

Atualmente, as pesquisas em EE têm sido propulsionadas por avanços na tecnologia de medição [PHA08], [AHM13] correspondentes à utilização de UMFs. Tais unidades são capazes de medir com maior exatidão fasores de tensão de barramentos e corrente de ramos, sincronizados na rede elétrica através de GPS. Desta forma, torna-se possível realizar observações diretas do estado do sistema, caracterizado pela magnitude e ângulo de fase da tensão das barras da rede sob supervisão. Tais observações são obtidas durante o regime de operação que há equilíbrio entre carga e geração.

Apesar das inegáveis vantagens de se utilizar medidas de sincrofasores na EE (em termos de precisão, taxa de amostragem, sincronização, etc.), devido a aspectos financeiros, UMFs têm sido instaladas parcimoniosamente **[EXP11]**. Por consequência, supõe-se que medidas convencionais (aquelas fornecidas pelo sistema SCADA) não serão deixadas de lado de imediato, devendo coexistir com medidas fasoriais durante algum tempo.

Com o intuito de aperfeiçoar o processo de EE enriquecendo-o com medidas adicionais, duas linhas de ação podem ser tomadas: (i) reunir em bloco medidas convencionais e fasoriais, processando-as simultaneamente através de um único estimador **[VAL11]**; (ii) tomar individualmente cada bloco de medidas e processá-los separadamente por meio de dois estimadores **[ZHO06]**. Esta última forma apresenta como vantagem preservar o estimador convencional que já esteja instalado no centro de controle.

Neste período de incorporação de uma nova tecnologia de medição para a EE, diversos aspectos do problema têm sido estudados: aumento da precisão e confiabilidade das estimativas obtidas para o estado; avaliação da capacidade de observação da rede elétrica; criticalidade de dados e elementos do sistema de medição; processamento de erros grosseiros com origem na medição, nos parâmetros e na configuração da rede.

A presente Tese aborda o problema do tratamento de erros grosseiros de medição através da função EE, que possam ocorrer em medidas convencionais ou fasoriais. Para tal, propõe-se uma metodologia que emprega, simultaneamente e de

forma cooperativa, resultados de estimadores de estado independentes, que processam apenas medidas convencionais obtidas de UTRs ou medidas de sincrofasores obtidas de UMFs. O processo de EE proposto recebeu aqui a denominação de estimação de estado com auxílio de sincrofasores (PHASE – *phasor-aided state estimation*) Dentre as principais características da metodologia proposta, destacam-se:

- Capacidade de depuração de erros em medidas convencionais e medidas de sincrofasores, mesmo em condições adversas;
- Aumento da capacidade de detecção e identificação de erros grosseiros múltiplos em relação a estimadores de estado convencionais e híbridos;
- Redução do efeito de espalhamento provocado por medidas portadoras de erros grosseiros;
- Provisão de pseudomedidas em substituição àquelas identificadas como portadoras de erros grosseiros.
- Preservação de estimadores de estado existentes, uma vez que a metodologia é empregada de forma acessória para a depuração de erros grosseiros;

O enfoque adotado busca comparar o desempenho de estimadores híbridos (i.e., aqueles que processam em uma única massa de dados todas as medições disponíveis) e aqueles que atuam de forma combinada, na presença de erros grosseiros de medição. Resultados numéricos obtidos em estudos de simulação com os sistemas IEEE 14-barras (considerado como referência para estudos de estimação), IEEE 30- barras e IEEE 118-barras são apresentados e discutidos.

1.3 Estrutura da Tese

Além do presente capítulo, esta Tese compreende cinco outros, descritos a seguir:

O Capítulo 2 apresenta os principais conceitos utilizados na EE em sistemas elétricos de potência. Também são abordados os requisitos necessários ao processo de estimação, tais como: redundância de medidas; capacidade de observação da rede; detecção, identificação e possível substituição de medidas portadoras de erros grosseiros; identificação de dados críticos para a EE.

O Capítulo 3 descreve formas de inclusão de medidas de fasores no processo de EE e trata de alguns aspectos relativos à utilização de UMFs no processo de EE, apresentando uma revisão bibliográfica sobre este campo de pesquisa.

O Capítulo 4 apresenta a metodologia proposta nesta Tese para o processamento de medição fasorial na EE, denominada Estimação de Estado Auxiliada por Sincrofasores (PHASE – Phasor-Aided State Estimation).

O Capítulo 5 dedica-se à apresentação de resultados alcançados com três métodos de estimação: convencional, em que são processadas apenas medições convencionais; híbrido, em que medições fasoriais e convencionais são processadas em conjunto; e PHASE, onde as medições fasoriais são processadas em separado das medições convencionais. Simulações de medidas fasoriais ou convencionais estarão sob a influência de erros grosseiros. Diferentes formas de composição de estimativas obtidas com estimadores independentes são estudadas.

O Capítulo 6 reúne as principais conclusões alcançadas, bem como apresenta propostas para pesquisa futura no tema.

1.4 Publicações

A partir dos resultados parciais da presente pesquisa foram geradas as publicações que constam do Apêndice A:

CAPÍTULO 2

ESTIMAÇÃO DE ESTADO

2.1 Introdução

Os sistemas SCADA fornecem em tempo real diversos dados adquiridos remotamente, tais como, o estado aberto/fechado de chaves/disjuntores que refletem a configuração atual da rede elétrica e valores de medidas de grandezas elétricas de interesse para a operação da rede elétrica supervisionada. A partir destes dados, uma série de funções avançadas contidas em SGEs são executadas, iniciando-se pela EE, seguindo-se as destinadas à segurança e otimização.

Os valores fornecidos pelo sistema SCADA estão sujeitos a erros de pequena magnitude (corriqueiros, inerentes à medição) e grosseiros, estes introduzidos pelo funcionamento inadequado de elementos que compõem o processo de medição. Detectar, identificar e recuperar/remover medidas portadoras de erros grosseiros são problemas que impõem desafios teóricos e práticos aos processos de EE em sistemas elétricos de potência.

Entende-se por estado operativo do sistema aquele plenamente caracterizado por grandezas elétricas referentes a uma determinada configuração de rede, ou seja, tensões de cada barra da rede elétrica (módulo e ângulo). Uma vez conhecido o estado, grandezas elétricas dele dependentes podem ser determinadas (correntes, fluxos e injeções de potência).

Schweppe **[SCH70]** foi pioneiro ao trazer para a área de sistemas de potência a EE, inicialmente enfrentando questionamentos sobre a real necessidade de se ter tal função. Desde então, muitos trabalhos de pesquisa em EE foram realizados, encontrando-se em **[MON99]** e **[ABU04]** material consolidado sobre o assunto, a ser utilizado neste capítulo, que descreve sucintamente o processo de EE, suas etapas, e premissas para adequado funcionamento. Atualmente, a função EE tem sido considerada como fundamental à operação em tempo real, estando sempre presente entre os aplicativos computacionais integrantes dos SGEs.

2.2 Etapas

Usualmente o processo de EE em sistemas de potência é composto por quatro etapas descritas a seguir:

a) Pré-Filtragem – Verificam-se os valores das grandezas medidas frente a limites, evitando assim que valores maiores do que a capacidade operativa dos equipamentos de medição sejam levados em consideração no restante do processo de estimação. Diversos testes de consistência também são aplicados: comparação de valor medido com valor nominal de uma grandeza ou valor colhido em instante anterior; atendimento às leis de Kirchhoff; plausibilidade de valores medidos nos dois extremos de um ramo da rede; confrontação entre os estados de chaves e disjuntores e valores medidos.

b) Observabilidade – Avalia-se o conjunto de dados pré-filtrados disponíveis, no que diz respeito a sua capacidade de permitir a realização do processo de EE em toda rede ou se apenas em parte dela (ilhas observáveis). Neste último caso, são identificadas as medições (pseudomedidas) necessárias para tornar a rede completamente observável.

c) Filtragem – Estima-se o estado do sistema utilizando o conjunto de medidas
 e configuração atual da rede. Nesta etapa, usualmente adota-se o método dos
 Mínimos Quadrados Ponderados.

d) Análise de Resíduos – Através da análise estatística dos resíduos da estimação (diferença entre valores medidos e estimados), são identificados possíveis erros grosseiros nas grandezas medidas ou erros de configuração da rede elétrica, não eliminados nas etapas anteriores.

Os dados utilizados pelo processo de EE são adquiridos de bases estáticas e dinâmicas. As bases estáticas contêm dados dos parâmetros elétricos de elementos da rede tais como, transformadores, elementos "shunt", linhas de transmissão. As

bases dinâmicas contêm informações das unidades de medição (UTRs e UMFs), tais como: magnitude de tensão e corrente, injeções de potência, fluxos de potência, estados de chaves, disjuntores e tapes de transformadores e, atualmente, medições fasoriais de tensão e corrente.

2.3 Filtragem

A EE é executada efetivamente na etapa de filtragem, em que medidas com maior exatidão exercem maior influência na obtenção de uma estimativa do estado do que as demais presentes, de acordo com o método dos mínimos quadrados ponderados.

A relação entre medidas e estado do sistema é descrita pela seguinte equação:

$$z = h(x) + \varepsilon \tag{2.1}$$

Onde:

z – vetor de medidas do sistema, usualmente formado por medidas fornecidas por UTRs, tais como: fluxos de potência ativa e reativa nos ramos da rede; potências ativas e reativas injetadas nas barras; e módulo de tensão nas barras, de dimensão (mx 1), onde m é o número de medidas do sistema.

h(.) – vetor que relaciona o estado verdadeiro com medidas isentas de erros, através de funções não lineares (equações do problema de fluxo de potência).

x – vetor estado, representando módulo e ângulo das tensões nas barras, com dimensão ($n \ge 1$), onde n é o número de variáveis de estado, sendo n = 2nb -1 e nb é o número de barras do sistema.

 ε – vetor de erros associados à medição, descrito como variável aleatória de distribuição de probabilidades Normal, valor esperado zero e matriz de covariância *R*.

Representa-se a função objetivo da forma a seguir:

$$J(x) = \sum_{i=1}^{m} \varepsilon_{i}^{2} \alpha_{i} = \sum_{i=1}^{m} (z_{i} - h(x_{i}))^{2} \alpha_{i}$$
(2.2)

Onde:

J(x) – função objetivo

 α_i – peso atribuído à i-ésima medida

Em notação matricial:

$$J(x) = [z - h(x)]^T W[z - h(x)]$$
(2.3)

Sendo $W = R^{-1}$, matriz de ponderação e $R = diag\{1/\alpha_1, 1/\alpha_2, ..., 1/\alpha_m\}$

O objetivo a ser alcançado consiste em se obter uma estimativa para o estado \hat{x} que minimize J(x), através de:

$$\frac{\partial J(x)}{\partial x}\Big|_{x=x} = 0 \tag{2.4}$$

Aplicando a condição (2.4) em (2.3), obtém-se a seguinte equação:

$$g(x) = H^{t}W\left[z - h(x)\right]$$
(2.5)

Onde $H = \frac{\partial h(x)}{\partial x}$ denomina-se Matriz Jacobiano.

Utilizando o método de Newton Raphson para encontrar o estado estimado em (2.5), obtém-se o seguinte processo iterativo:

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \left[\left(H^{t} W H \right)^{-1} H^{t} W \right]^{(k)} \left[z - h(x^{(k)}) \right]$$
(2.6)

10

Onde k é o contador de iterações.

Define-se a matriz de ganho G do processo como sendo (H'WH) e então reescreve-se (2.6) como:

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \left[G^{-1}H^{t}W\right]^{(k)}\left[z - h(x^{(k)})\right]$$
(2.7)

A convergência do processo iterativo é avaliada através da maior componente do módulo do vetor desvio $|\Delta x^{(k)}| = |x^{(k+1)} - x^{(k)}|$ que deve ser inferior a uma determinada tolerância.

Para simplificar o problema, pode-se também considerar como linear a relação entre estado e medida **[GRA94]**:

$$z = Hx + \varepsilon \tag{2.8}$$

Onde H é a matriz Jacobiano, obtida através da linearização das equações de fluxo de potência.

A função objetivo passa a ter a seguinte forma:

$$J(x) = \sum_{i=1}^{m} \varepsilon_i^2 \alpha_i = \sum_{i=1}^{m} (z_i - Hx_i)^2 \alpha_i$$
(2.9)

Matricialmente:

$$J(x) = [z - Hx]^{t} W[z - Hx]$$
(2.10)

O estado estimado é obtido através de:

$$\hat{x} = \left[G^{-1}H'W\right]z \tag{2.11}$$

Portanto, o vetor de medidas filtradas vem de:

$$\hat{z} = H.\hat{x} \tag{2.12}$$

O uso de estimadores lineares tem baixo custo computacional sendo útil na análise de observabilidade, identificação de medidas e conjuntos críticos, e problemas que podem ser enfocados sob o ponto de vista estrutural **[COU01b]**, isto é, onde o interesse se volta para a inter-relação de variáveis.

2.4 Análise de Observabilidade

Antes de se estimar o estado de um determinado sistema, deve-se avaliar se o mesmo é observável ou não. Para que um sistema seja observável deve haver uma variedade de medidas, em quantidade suficiente (redundantes) e distribuídas convenientemente por toda a rede sob supervisão.

A análise de observabilidade consiste em:

- verificar a existência de medidas suficientes em toda a rede;

 identificar a existência de ilhas observáveis, caso a rede como um todo não seja observável;

 escolher um conjunto mínimo de pseudomedidas para tornar o sistema observável, sem comprometer o processo de estimação de estado das ilhas observáveis originalmente.

A utilização de pseudomedidas visa melhorar ou restaurar a observabilidade do sistema **[COU99]**. Tais dados são obtidos através de valores típicos, históricos, previsões, etc. usados como medidas fictícias em lugar de medidas portadoras de erros grosseiros ou em regiões da rede que apresentem deficiência de medição. A utilização de pseudomedidas pode trazer benefícios importantes na etapa de detecção e identificação de erros grosseiros **[MOT10]**.

A análise de observabilidade pode ser feita através de métodos numéricos ou topológicos. A análise topológica (com base na teoria dos grafos) envolve métodos combinatórios complexos e procedimentos lógicos, não influenciados por problemas numéricos. Os métodos numéricos baseiam-se em aritmética de ponto flutuante, como por exemplo, os que utilizam a fatoração da matriz Jacobiano ou matriz de Ganho, já inserida no próprio processo de EE.

Os dois métodos citados para avaliação da observabilidade podem ser construídos de forma acoplada ou desacoplada. A primeira forma possui a desvantagem de não possuir solução única, de modo que a forma desacoplada é mais frequentemente adotada **[ABU04]**. O desacoplamento deve-se à alta sensibilidade do grupo de medidas de potência ativa em relação ao ângulo fasorial da tensão (P - θ), tal como o de medidas de potência reativa em relação à magnitude de tensão (Q-V).

Desta forma, pode-se fazer a análise apenas pelo conjunto P - θ, adotando as seguintes simplificações:

- R = I (Matriz Identidade)
- $b_{ik} = 1$ (parâmetro do ramo que liga as barras *i* e *k* da rede)
- Elementos de *H* pertencentes a *i*-ésima medida:
- Fluxo $P_{ik}: H(l,i) = -b_{ik}$ $H(l,k) = -b_{ik}$
- Injeção $Pi: H(l,i) = \sum_{k} b_{ik}, i \neq k \quad H(l,k) = -b_{ik}$

onde k é o índice das barras ligadas à barra i.

As colunas de H são correspondentes aos ângulos das barras, excluído aquele tomado como referência. Maiores detalhes podem ser observados em [COU01b].

A observabilidade de um sistema se verifica quando a matriz de Ganho é inversível, ou seja, pela ausência de pivôs nulos durante sua fatoração através do método da Eliminação de Gauss.

Diferentes graus de observabilidade podem ser identificados, considerando-se a criticalidade individual de medidas e a formação de conjuntos críticos de medidas. Uma medida é definida como crítica quando sua ausência do conjunto de medição disponível para processamento tornar o sistema não observável. Um grupo de medidas não críticas é considerado como conjunto crítico (Cconj), quando a ausência de qualquer elemento deste conjunto tornar os elementos nele remanescentes medidas críticas.

O processo de identificação de medidas críticas (Cmeds) e conjuntos críticos (Cconjs) aqui adotados baseia-se nas propriedades numéricas dos resíduos da estimação [COU07].

O nível de criticalidade das medidas processadas está relacionado à confiabilidade do processo de estimação. Cmeds apresentam sempre resíduos nulos e sua matriz de covariância é nula, ou seja, tais medidas não se correlacionam com qualquer outra medida. Se uma Cmed for portadora de erro grosseiro (EG), tal erro não será detectado, como será visto adiante. Da forma semelhante, Cconjs compõem-se de medidas com resíduos normalizados idênticos e máxima correlação entre si. Se alguma medida pertencente a um Cconj contiver EG, este será detectado, porém não poderá ser identificado.

Portanto, pode-se afirmar que o nível de redundância das medidas disponíveis para processamento é fundamental para EE. Tal redundância pode ser avaliada quanto ao posicionamento, quantidade e tipo de medição, considerando:

- Alcançar a observabilidade da rede elétrica como um todo;
- Confiabilidade, no que tange a possibilidade de detectar, identificar e eliminar EGs;
- Qualidade do valor estimado (diminuição da incerteza em relação à medição);
- Robustez, para fazer frente à ausência de algumas medições, mantendo os requisitos de observabilidade, confiabilidade e qualidade preservados.

Uma abordagem mais completa sobre a análise de criticalidade pode ser encontrada em **[COU13]**, em que uma série de indicadores de diferentes graus de observabilidade são propostos. Tais indicadores são obtidos em termos da probabilidade de inobservabilidade, assumindo-se que eventos associados à indisponibilidade de medidas tenham ocorrido, entre estes a perda de uma ou mais medidas; uma unidade de medição (UTR ou UMF); um ou mais ramos da rede elétrica.

2.5 Análise de Resíduos

A EE permite suavizar os erros de baixa magnitude (estatisticamente esperados), usualmente presentes nos processos de medição. Quando medidas apresentam valores muito distintos em relação ao que se espera diz-se que estas podem conter EGs [COU99].

Uma vez que o estado tenha sido estimado, este é utilizado para estimar medidas e realizar uma avaliação da consistência dos resultados alcançados. Tal procedimento é chamado de análise de resíduos. O objetivo principal é detectar a presença de erros estatisticamente elevados através da análise do vetor dos resíduos da estimação, conforme:

$$r = z - \hat{z} \tag{2.13}$$

$$r = z - h(\hat{x}) \tag{2.14}$$

onde z - valor medido

 \hat{z} - valor estimado

r - resíduo da estimação

O vetor de resíduos pode ser interpretado como uma variável aleatória Normal, de valor esperado zero e matriz de covariância U, obtida por:

$$U = R - H(H^{t}WH)^{-1}H^{t}$$
(2.15)

Ao se considerar $S = (H^tWH)^{-1}$ e $T = HSH^t$, então (2.15) pode ser reescrita como:

$$U = R - T$$

O vetor de resíduos é normalizado e verifica-se a seguinte condição:

$$r_N(i) = \frac{|r(i)|}{\sqrt{U(i,i)}} \le \lambda$$
(2.16)

Onde o índice *i* indica *i*-ésima componente do vetor dos resíduos e λ corresponde ao limite de detecção (seu valor usual é três).

Resíduos normalizados superiores ao limite estabelecido indicam a presença de EGs. Caso haja apenas uma medida portando EG em determinado sistema de medição, aquela que apresentar o maior resíduo normalizado, normalmente será a medida portadora de EG. Desta forma, este teste além de detectar a presença de EGs é também capaz de identificar a(s) medida(s) portadoras(s) de erro.

Uma medida portadora de EG que seja processada na etapa de filtragem compromete a estimação de componentes do estado a ela associados e por via de consequência influencia a estimativa de outras medidas, fazendo com que diversos resíduos elevados sejam detectados. Tal situação caracteriza o que se denomina efeito de espalhamento do EG. Além da medida espúria, outras medidas (não portadoras de EGs) também possuirão resíduos normalizados superiores ao limite de detecção estabelecido, dificultando o processo de depuração de erros, notadamente quando várias medidas estão portando EGs.

Para que se identifique uma medida como portadora de EG, através de um procedimento comum e ineficiente, elimina-se uma medida por vez e volta-se a estimar o estado, até que a eliminação de uma das medidas suspeitas leve a nenhuma violação de resíduos da estimação. Quando vários EGs estão presentes, tal procedimento irá requerer várias combinações de medidas (duas-a duas, três-a-três, etc.) que tenham resíduos elevados até que se possa concluir o processo de EE sem violações de resíduos.

Com o objetivo de exmplificar o processo de depuração de EG, considere o SEE de 3 barras da Figura 2.1, com o sistema de medição **SMO** : $P_2=-4,07$ pu, $P_{1:3}=2,04$ pu e $P_{3:1}=-1,90$ pu e suas respectivas variâncias: $\sigma^2_2=0,04$ pu, $\sigma^2_{1:3}=0,02$ pu e $\sigma^2_{3:1}=0,02$ pu, conforme mostrado em **[MON99]**.

A equação a ser resolvidas, segundo modelo linear:

$$\hat{z} = H.\hat{x}; \qquad \begin{bmatrix} P_2 \\ P_{1-3} \\ P_{3-1} \end{bmatrix} = H.\begin{bmatrix} \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix}; \qquad \begin{bmatrix} P_2 \\ P_{1-3} \\ P_{3-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 150 & -100 \\ 0 & -100 \\ 0 & 100 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix}$$



Figura 2.1 – Sistema de 3 Barras com SM0.

A matriz de covariância das medidas será:

$$R = \begin{bmatrix} \sigma_{P_2}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{P_{3-1}}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{P_{3-1}}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \cdot 10^{-3};$$

$$G^{-1} = (H^t \cdot R^{-1} \cdot H)^{-1} = \begin{bmatrix} 2,222 & 0,667 \\ 0,667 & 1,000 \end{bmatrix} \cdot 10^{-7}$$

$$\hat{z} = H \cdot G^{-1} \cdot H^t \cdot R^{-1} \cdot z =$$

$$= \begin{bmatrix} 150 & -100 \\ 0 & -100 \\ 0 & 100 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 2,222 & 0,667 \\ 0,667 & 1,000 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 150 & 0 & 0 \\ -100 & -100 & 100 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 250 & 0 & 0 \\ 0 & 500 & 0 \\ 0 & 0 & 500 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -4,07 \\ 2,04 \\ -1,90 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} -4,07 \\ 1,97 \\ -1,97 \end{bmatrix}$$

Agora, pode-se calcular os resíduos através de (2.13)

$$r = z - \hat{z} = \begin{bmatrix} -4,07\\2,04\\-1,90 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -4,07\\1,97\\-1,97 \end{bmatrix}$$

E os resíduos normalizados de (2.16)

$$r_N(i) = \frac{|r(i)|}{\sqrt{U(i,i)}} \le \lambda$$

Onde U é obtida de (2.15)

$$U = R - H(H^{t}WH)^{-1}H^{t} = \begin{bmatrix} 4 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \cdot 10^{-3} - \begin{bmatrix} 150 & -100 \\ 0 & -100 \\ 0 & 100 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 2,222 & 0,667 \\ 0,667 & 1,000 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 150 & 0 & 0 \\ -100 & -100 & 100 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Logo, percebe-se que este sistema de medição possui uma medida crítica (P_2), pois a linha de U referente a esta medida, possui seus valores nulos. Outra informação retirada de U, seria a existência de um conjunto crítico ($P_{I-3} \in P_{3-1}$) obtida através de seus resíduos normalizados idênticos.

$$r_N(i) = \begin{bmatrix} * \\ 2,21 \\ 2,21 \end{bmatrix}$$

Isto significa que EG em P_2 seria indetectável e EG em P_{1-3} ou P_{3-1} seria detectável porém não identificável.

2.6 Modelagem

Esta seção apresenta as equações que relacionam o estado e medidas convencionais, bem como as suas derivadas que compõem a matriz Jacobiano do sistema.

Representam-se os ramos da rede através de um modelo π equivalente. A Figura 2.2 apresenta o referido modelo.



Figura 2.2 – Modelo Π

sendo:

 $y_{ik} = g_{ik} + jb_{ik}$, admitância série do ramo entre as barras $i \in k$.

 B'_{ik} é a metade da susceptância em paralelo do ramo

Considere agora, um ramo i-k, correspondente a um transformador de tape variável, que opere com uma relação de transformação (1:t) diferente da relação nominal. Pode-se representar tal transformador através do modelo da Figura 2.3:



Figura 2.3 – Modelo de Transformador de tape variável

O modelo π equivalente desta modelagem pode ser visto na Figura 2.4:



Figura 2.4 – Modelo 🗆 Equivalente de Transformador de tape variável

onde:

$$A = \left(\frac{t-1}{t}\right) y_{ik} \tag{2.17}$$

$$B = \left(\frac{1-t}{t^2}\right) y_{ik} \tag{2.18}$$

$$C = \left(\frac{1}{t}\right) y_{ik} \tag{2.19}$$

A matriz admitâncias de barra é obtida através da Lei dos Nós aplicada ao sistema, desconsiderando o acoplamento mútuo entre os ramos:

Corrente de um nó do sistema é obtida por:

$$I_{i} = \sum_{1 \neq i}^{m} I_{im} = \sum_{1 \neq i}^{m} (V_{i} - V_{m}) y_{im} = V_{i} \sum_{1 \neq i}^{m} y_{im} + \sum_{1 \neq i}^{m} V_{m} (-y_{im})$$
(2.20)

sendo:

i índice do nó

m índice dos nós conectados a i

 y_{im} é a admitância do ramo que liga nó i ao nó m

Se
$$\sum_{i\neq i}^{m} y_{im} = Y_{ii}$$
 e $-y_{im} = Y_{im}$ então:
 $I_{i} = V_{i}Y_{ii} + \sum_{i\neq i}^{m} V_{m}Y_{im} = \sum_{i=1}^{m} V_{m}Y_{im}$ (2.21)

Matricialmente:

$$I_{barra} = Y_{barra} V_{barra}$$

$$\begin{bmatrix} I_{1} \\ I_{2} \\ \vdots \\ I_{i} \\ \vdots \\ I_{n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1i} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2i} & \cdots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{i1} & Y_{i2} & \cdots & Y_{ii} & \cdots & Y_{in} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{ni} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{1} \\ V_{2} \\ \vdots \\ V_{i} \\ \vdots \\ V_{i} \end{bmatrix}$$
(2.22)

Onde *n* é o número de nós do sistema.

Incluindo um transformador de tape variável entre os nós i e n, segundo modelo da Figura 2.3, na construção da matriz admitâncias de barra, chega-se a **[GRA94]**:

$$Y_{barra_nova} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1i} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2i} & \cdots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{i1} & Y_{i2} & \cdots & Y_{ii} & \cdots & -Y_{in}/t \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & -\frac{y_{ni}}{t} & \cdots & Y_{nn} + y_{in} \cdot \begin{pmatrix} 1/t \\ t^2 \end{pmatrix} \end{bmatrix}$$
(2.23)

Repete-se o procedimento para todo ramo que represente um transformador.

Reescrevendo (2.17), (2.18) e (2.19) utilizando elementos da matriz admitâncias de barra, tem-se:

$$A = (1 - t)Y_{ik} \tag{2.24}$$

$$B = (1 - 1/t)Y_{ik}$$
(2.25)

$$C = -Y_{ik} \tag{2.26}$$

Juntando-se ao modelo π equivalente do transformador com tap variável uma susceptância de elemento em derivação jB'_{in} em determinados ramos da rede, tem-se uma nova matriz admitâncias de barra mostrada na equação (2.27):

$$Y'_{barra_nova} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1i} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2i} & \cdots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{i1} & Y_{i2} & \cdots & Y_{ii} + jB'_{in} & \cdots & -\frac{y_{in}}{t} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & -\frac{y_{ni}}{t} & \cdots & Y_{nn} + y_{in} \cdot \left(\frac{1}{t^2}\right) + jB'_{in} \end{bmatrix}$$
(2.27)

Repete-se o procedimento para todos os ramos com susceptância.

Com estas considerações chega-se ao modelo abaixo:



Figura 2.5 – Modelo π Equivalente

Onde:

$$Y_{ik} = G_{ik} + jB_{ik}$$

$$y_{si} = (g_{si} + jb_{si}) = [(1-t)G_{ik}] + j[(1-t)B_{ik} + B_{ik}]$$

$$y_{sk} = (g_{sk} + jb_{sk}) = [(1-1/t)G_{ik}] + j[(1-1/t)B_{ik} + B_{ik}]$$

Utilizando o modelo da Figura 2.5, as equações de fluxo de potência correspondem a:

$$S_{ik}=P_{ik}+jQ_{ik}$$

$$P_{ik} = (g_{si} - G_{ik})V_i^2 + V_i V_k (G_{ik} \cos(\theta_{ik}) + B_{ik} sen(\theta_{ik}))$$
(2.28)

$$Q_{ik} = (-b_{si} + B_{ik})V_i^2 + V_iV_k(G_{ik}sen(\theta_{ik}) - B_{ik}\cos(\theta_{ik}))$$
(2.29)

Onde $\theta_{ik} = \theta_i - \theta_k$

22

As equações de injeção são obtidas somando-se os fluxos que deixam cada nó da rede em direção aos seus vizinhos:

$$P_{i} = \sum_{j=1 \neq i}^{m} \left[\left(g_{si} - G_{ij} \right) V_{i}^{2} + V_{i} V_{j} \left(G_{ij} \cos(\theta_{ij}) + B_{ij} sen(\theta_{ij}) \right) \right]$$

$$P_{i} = V_{i} \sum_{j=1}^{m} V_{j} \left(G_{ij} \cos(\theta_{ij}) + B_{ij} sen(\theta_{ij}) \right)$$
(2.30)

$$Q_{i} = \sum_{j=1\neq i}^{m} \left[\left(-b_{si} - B_{ij} \right) V_{i}^{2} + V_{i} V_{j} \left(G_{ij} sen(\theta_{ij}) - B_{ij} \cos(\theta_{ij}) \right) \right]$$

$$Q_{i} = V_{i} \sum_{j=1}^{m} V_{j} \left(G_{ij} sen(\theta_{ij}) - B_{ij} \cos(\theta_{ij}) \right)$$
(2.31)

Usualmente, os medidores são de fluxos/injeções de potência ativa e reativa e de magnitudes de tensão. A partir das equações anteriores, os elementos da matriz Jacobiano são obtidos de acordo com as expressões a seguir:

Fluxo de Potência:

$$\frac{\partial P_{ik}}{\partial \theta_i} = V_i V_k \left(-G_{ik} sen(\theta_{ik}) + B_{ik} \cos(\theta_{ik}) \right)$$
(2.32)

$$\frac{\partial P_{ik}}{\partial \theta_k} = V_i V_k \left(G_{ik} sen(\theta_{ik}) - B_{ik} \cos(\theta_{ik}) \right)$$
(2.33)

$$\frac{\partial P_{ik}}{\partial V_i} = -2V_i \left(G_{ik} + g_{si} \right) + V_k \left(G_{ik} \cos(\theta_{ik}) + B_{ik} sen(\theta_{ik}) \right)$$
(2.34)

$$\frac{\partial P_{ik}}{\partial V_k} = V_i \left(G_{ik} \cos(\theta_{ik}) + B_{ik} sen(\theta_{ik}) \right)$$
(2.35)

$$\frac{\partial Q_{ik}}{\partial \theta_i} = V_i V_k \left(G_{ik} \cos(\theta_{ik}) + B_{ik} sen(\theta_{ik}) \right)$$
(2.36)

$$\frac{\partial Q_{ik}}{\partial \theta_k} = V_i V_k \left(-G_{ik} \cos(\theta_{ik}) - B_{ik} sen(\theta_{ik}) \right)$$
(2.37)

$$\frac{\partial Q_{ik}}{\partial V_i} = 2V_i (B_{ik} - b_{si}) + V_k (G_{ik} sen(\theta_{ik}) - B_{ik} \cos(\theta_{ik}))$$
(2.38)

$$\frac{\partial Q_{ik}}{\partial V_k} = V_i \left(G_{ik} sen(\theta_{ik}) - B_{ik} \cos(\theta_{ik}) \right)$$
(2.39)
Injeções de Potência:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} = V_i \sum_{j=1 \neq i}^m V_j \left(-G_{ij} sen(\theta_{ij}) + B_{ij} \cos(\theta_{ij}) \right)$$
(2.40)

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} = V_i V_j \Big(G_{ij} sen(\theta_{ij}) - B_{ij} \cos(\theta_{ij}) \Big)$$
(2.41)

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_i} = 2G_{ii}V_i + \sum_{j=1\neq i}^m V_j \Big(G_{ij}\cos(\theta_{ij}) + B_{ij}sen(\theta_{ij}) \Big)$$
(2.42)

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_j} = V_i \Big(G_{ij} \cos(\theta_{ij}) + B_{ij} sen(\theta_{ij}) \Big)$$
(2.43)

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} = V_i \sum_{j=1 \neq i}^m V_j \left(G_{ij} \cos(\theta_{ij}) + B_{ij} sen(\theta_{ij}) \right)$$
(2.44)

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} = V_i V_j \left(-G_{ij} \cos(\theta_{ij}) - B_{ij} sen(\theta_{ij}) \right)$$
(2.45)

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = -2B_{ii}V_i + \sum_{j=1\neq i}^m V_j \left(G_{ij}sen(\theta_{ij}) - B_{ij}\cos(\theta_{ij}) \right)$$
(2.46)

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_j} = V_i \Big(G_{ij} sen(\theta_{ij}) - B_{ij} \cos(\theta_{ij}) \Big)$$
(2.47)

Magnitude de Tensão:

$$\frac{\partial V_i}{\partial \theta_i} = \frac{\partial V_i}{\partial \theta_j} = \frac{\partial V_i}{\partial V_j} = 0$$
(2.48)

$$\frac{\partial V_i}{\partial V_i} = 1 \tag{2.49}$$

A estrutura da matriz Jacobiano será:

| ∂P_{ik} | ∂P_{ik} | ∂P_{ik} | ∂P_{ik} |
|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| $\partial 	heta_i$ | $\partial 	heta_k$ | ∂V_i | ∂V_k |
| ∂P_i | ∂P_i | ∂P_i | ∂P_i |
| $\partial 	heta_i$ | $\partial 	heta_k$ | ∂V_i | ∂V_k |
| ∂Q_{ik} | ∂Q_{ik} | ∂Q_{ik} | ∂Q_{ik} |
| $\partial 	heta_i$ | $\partial 	heta_k$ | ∂V_i | ∂V_k |
| ∂Q_i | ∂Q_i | ∂Q_i | ∂Q_i |
| $\partial 	heta_i$ | $\partial 	heta_k$ | ∂V_i | ∂V_k |
| ∂V_i | ∂V_i | ∂V_i | ∂V_i |
| $\overline{\partial 	heta_i}$ | $\overline{\partial 	heta_k}$ | $\overline{\partial V_i}$ | $\overline{\partial V_k}$ |

(2.50)

Neste capítulo, apresentou-se de forma resumida as principais etapas de um processo clássico de EE, levado a efeito pelo método dos Mínimos Quadrados Ponderados, em que medidas convencionais fornecidas pelo sistema SCADA são processadas. A utilização de outras medidas, tais como as de corrente e de ângulos de fase das tensões nodais serão apreciadas no próximo capítulo.

CAPÍTULO 3

SINCROFASORES NA ESTIMAÇÃO DE ESTADO

3.1 Introdução

Medidas oriundas de UMFs (sincrofasores) usadas em parceria com medidas convencionais fornecidas pelo sistema SCADA têm despertado grande interesse para o aperfeiçoamento dos processos de EE. Isto se revela não apenas por corresponderem à medição direta do estado do sistema, como também por apresentarem maior grau de exatidão e serem colocadas à disposição com taxas de aquisição mais elevadas do que aquelas associadas ao sistema SCADA. Em [PHA08] e [MOR09], apresentam-se uma descrição sobre o desenvolvimento histórico da medição fasorial, seus fundamentos e aplicações.

Neste capítulo, abordam-se aspectos gerais relativos à utilização de sincrofasores no processo de EE, apresentando-se também uma revisão dos principais trabalhos encontrados na literatura sobre o tema.

3.2 Considerações Iniciais

As medidas de UMFs possuem características próprias, distintas daquelas fornecidas por UTRs convencionais, requerendo para sua inclusão no processo de EE criteriosa análise. Os pontos mais relevantes a serem considerados nesta análise dizem respeito a:

 Os sistemas de medição sincronizada de fasores (por envolverem requisitos de instalação, comunicação, investimento de vulto, etc.) serão implementados gradativamente [YAN11];

- Medidas providas por UMFs serão usualmente consideradas como adicionais, de forma a beneficiar os processos de EE atuais;
- As UMFs fornecem dados de ângulo de fase das tensões nodais mais precisos do que aqueles obtidos indiretamente por meio de processos de EE convencionais;
- Sincrofasores possuem taxas de amostragem mais elevadas do que aquelas oriundas de UTRs convencionais e a sua incorporação à EE convencional deve considerar tal fato;
- O módulo e ângulo das tensões nodais (estado do sistema) são observados diretamente nas barras onde existam UMFs instaladas. Considerando-se como corretos os valores de parâmetros dos ramos da rede, sabe-se que o estado de barras vizinhas será observado, se tais UMFs medirem as correntes dos ramos nela incidentes;
- A confiabilidade dos resultados da EE (livres de EGs) figura como fundamental, já que estes servem de base para outras funções avançadas de COS que em conjunto auxiliam nas tomadas de decisão operativas;
- O estado do sistema será aquele que caracteriza a operação em regime de equilíbrio, isto é, não serão considerados estados típicos de estudos de perturbações no sistema (análise de estabilidade).

3.3 Medidas de Corrente na Estimação de Estado

[Medidas de magnitude de corrente são comumente utilizadas em subestações e sua função básica é suprir relés de proteção, não sendo habitual seu processamento pela EE nos centros de controle do sistema. A utilização de medidas de corrente na EE traz algumas dificuldades **[ABU04]** como será comentado adiante. Com a introdução da medição fasorial, tanto as medidas de tensão como as de correntes têm sido consideradas igualmente importantes em auxílio aos processos de EE já instalados, sendo aqui tratadas a seguir. A magnitude das correntes de ramo são obtidas por:

$$I_{ik} = \sqrt{\frac{P_{ik}^2 + Q_{ik}^2}{V_i}}$$
(3.1)

Onde:

 I_{ik} - magnitude da corrente de ramo entre as barras *i* e *k*;

 P_{ik} - fluxo de potência ativa no ramo entre as barras $i \in k$;

 Q_{ik} - fluxo de potência reativa no ramo entre as barras $i \in k$;

 V_i - magnitude de tensão da barra *i*.

Em função das variáveis de estado, I_{ik} pode-se expressa por (ramo sem derivação):

$$I_{ik} = \sqrt{(g_{ik}^2 + b_{ik}^2)(V_i^2 + V_k^2 - 2V_iV_k\cos(\theta_{ik}))}$$
(3.2)

Onde:

 g_{ik} - condutância do ramo entre as barras *i* e *k*;

 b_{ik} - susceptância do ramo entre as barras $i \in k$;

 V_i e V_k – magnitude das tensões das barras i e k;

 θ_{ik} - diferença entre os ângulos da tensão das barras *i* e *j*, respectivamente

Os elementos da matriz Jacobiano referente às medidas de corrente seriam:

$$\frac{\partial I_{ik}}{\partial \theta_i} = \frac{g_{ik}^2 + b_{ik}^2}{I_{ik}} V_i V_k \sin(\theta_{ik})$$
(3.3)

$$\frac{\partial I_{ik}}{\partial \theta_k} = -\frac{g_{ik}^2 + b_{ik}^2}{I_{ik}} V_i V_k \sin(\theta_{ik})$$
(3.4)

$$\frac{\partial I_{ik}}{\partial V_i} = \frac{g_{ik}^2 + b_{ik}^2}{I_{ik}} \left(V_i - V_k \cos(\theta_{ik}) \right)$$
(3.5)

$$\frac{\partial I_{ik}}{\partial V_k} = \frac{g_{ik}^2 + b_{ik}^2}{I_{ik}} \left(V_k - V_i \cos(\theta_{ik}) \right)$$
(3.6)

Pelas expressões das derivadas das correntes de ramo, nota-se que para $V_i \approx V_k$ e $\theta_{ik} \approx 0$ ambas as derivadas não são definidas, o que pode acarretar

problemas de convergência. As expressões de corrente elevadas ao quadrado buscam eliminar este problema, assumindo a seguinte forma:

$$\frac{\partial I_{ik}^2}{\partial V_i} = 2(g_{ik}^2 + b_{ik}^2) \cdot \left(V_i - V_j \cos(\theta_{ik})\right)$$
(3.7)

$$\frac{\partial I_{ik}^2}{\partial V_k} = 2(g_{ik}^2 + b_{ik}^2) \cdot (V_k - V_i \cos(\theta_{ik}))$$
(3.8)

$$\frac{\partial I_{ik}^2}{\partial \theta_i} = 2(g_{ik}^2 + b_{ik}^2) V_i V_k sen(\theta_{ik})$$
(3.9)

$$\frac{\partial I_{ik}^2}{\partial \theta_k} = -2(g_{ik}^2 + b_{ik}^2) V_i V_k sen(\theta_{ik})$$
(3.10)

A estrutura da nova matriz Jacobiano seria:

| \mathbf{P}_{ik} | ∂P_{ik} | ∂P_{ik} | ∂P_{ik} |
|-----------------------|---|---|---|
| $	heta_i$ | $\partial 	heta_k$ | ∂V_i | ∂V_k |
| P_i | ∂P_i | ∂P_i | ∂P_i |
| $	heta_i$ | $\partial 	heta_k$ | ∂V_i | ∂V_k |
| 2_{ik} | ∂Q_{ik} | ∂Q_{ik} | ∂Q_{ik} |
| θ_{i} | $\partial 	heta_k$ | ∂V_i | ∂V_k |
| Q_i | ∂Q_i | ∂Q_i | ∂Q_i |
| $\theta_{_i}$ | $\partial 	heta_k$ | ∂V_i | ∂V_k |
| V_i | ∂V_i | ∂V_i | ∂V_i |
| $\overline{\theta_i}$ | $\overline{\partial \theta_k}$ | $\overline{\partial V_i}$ | $\overline{\partial V_k}$ |
| I_{ik} | ∂I_{ik} | ∂I_{ik} | ∂I_{ik} |
| <u>A</u> | $\frac{\pi}{\partial \theta}$ | $\frac{i\kappa}{\partial V}$ | $\frac{1}{\partial V}$ |
| | $\frac{\partial P_{ik}}{\partial q_{i}} = \frac{\partial P_{ik}}{\partial q_{i}}$ $\frac{\partial P_{ik}}{\partial q_{i}} = \frac{\partial P_{ik}}{\partial q_{i}}$ $\frac{\partial P_{ik}}{\partial q_{i}} = \frac{\partial P_{ik}}{\partial q_{i}}$ | $ \begin{array}{cccc} P_{ik} & \frac{\partial P_{ik}}{\partial \theta_{i}} & \frac{\partial P_{ik}}{\partial \theta_{k}} \\ \frac{\partial P_{i}}{\partial \theta_{i}} & \frac{\partial P_{i}}{\partial \theta_{k}} \\ \frac{\partial Q_{ik}}{\partial \theta_{i}} & \frac{\partial Q_{ik}}{\partial \theta_{k}} \\ \frac{\partial Q_{ik}}{\partial \theta_{i}} & \frac{\partial Q_{i}}{\partial \theta_{k}} \\ \frac{\partial Q_{i}}{\partial \theta_{i}} & \frac{\partial Q_{i}}{\partial \theta_{k}} \\ \frac{\partial Q_{i}}{\partial \theta_{i}} & \frac{\partial Q_{i}}{\partial \theta_{k}} \\ \frac{\partial Q_{i}}{\partial \theta_{k}} & \frac{\partial Q_{i}}{\partial \theta_{k}}$ | $ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$ |

Com isso os valores das derivadas em $V_i \approx V_k$ e $\theta_{ik} \approx 0$ tendem a zero. Entretanto, ao elevar as expressões de I_{ij} ao quadrado as covariâncias das medidas duplicam. Nota-se também que as medidas de corrente não podem ser acopladas *a priori* com o subproblema ativo ou reativo, pois as correntes se acoplarão somente se a diferença ($V_i - V_j$) for suficiente elevada.

As medidas de corrente costumam trazer vários problemas que deterioram o desempenho do EE, além da não linearidade da função derivada já mencionada anteriormente. Um deles é a inicialização dos elementos da matriz Jacobiano com

valores do perfil horizontal (*flat star*t), pois estes não são definidos - quando os valores da corrente I_{ij} estão presentes - e são nulos - se I^2_{ij} for adotada. Uma solução seria adicionar um elemento "shunt" artificial nos elementos somente na primeira iteração ou iniciar as variáveis com uma pequena perturbação randômica.

Em **[ALV99]**, o problema de fluxo de potência foi resolvido com uma implementação em MATLAB, cuja formulação tinha o objetivo de tratar as grandezas elétricas na forma cartesiana. Esta pôde ser adaptada por **[MOR09]** ao problema de EE na utilização de medidas de corrente na forma cartesiana, através das seguintes expressões:

$$I_d = Y_d \,. \, V_{barra} \tag{3.12}$$

e
$$I_p = Y_p \cdot V_{barra}$$
 (3.13)

Onde:

 Y_d é matriz admitâncias relacionando tensões de barra com as correntes nos terminais DE (partida), tem dimensão do número de barras da rede (nb) por número de ramos da rede (nr).

 Y_p é matriz admitâncias relacionando tensões de barra com as correntes nos terminais PARA (chegada), tem dimensão (*nb*) por (*nr*).

Considerando as derivadas parciais de tensão a seguir:

$$\frac{\partial V_{barra}}{\partial |V_{barra}|} = diag(V_{barra}./|V_{barra}|)$$
(3.14)

$$\frac{\partial V_{barra}}{\partial \theta_{barra}} = j \quad diag(V_{barra}) \tag{3.15}$$

Onde o operador, "./", significa divisão termo a termo dos elementos de V_{barra} e o operador "diag" significa dispô-los em uma matriz diagonal; $j = \sqrt{-1}$.

Então as expressões abaixo compõem os elementos da matriz Jacobiano:

$$\frac{\partial I_d}{\partial |V_{barra}|} = Y_d \frac{\partial V_{barra}}{\partial |V_{barra}|} = Y_d diag(V_{barra}./|V_{barra}|)$$
(3.16)

$$\frac{\partial I_d}{\partial \theta_{barra}} = Y_d \frac{\partial V_{barra}}{\partial \theta_{barra}} = Y_d j \quad diag(V_{barra})$$
(3.17)

$$\frac{\partial I_p}{\partial |V_{barra}|} = Y_p \frac{\partial V_{barra}}{\partial |V_{barra}|} = Y_p diag(V_{barra}./|V_{barra}|)$$
(3.18)

$$\frac{\partial I_p}{\partial \theta_{barra}} = Y_p \frac{\partial V_{barra}}{\partial \theta_{barra}} = Y_p j \quad diag(V_{barra})$$
(3.19)

As injeções de corrente podem ser calculadas através da expressão abaixo, sendo necessária para compor as expressões de injeção de potência, como será visto adiante.

Novamente considerando (3.14) e (3.15), obtém-se então:

е

$$\frac{\partial I_{barra}}{\partial |V_{barra}|} = Y_{barra} diag(V_{barra}./|V_{barra}|)$$
(3.21)

$$\frac{\partial I_{barra}}{\partial \theta_{barra}} = Y_{barra} j \quad diag(V_{barra})$$
(3.22)

Entretanto, com a consideração na forma cartesiana das medidas de corrente, as medidas de injeção e fluxo de potência têm de acompanhar essas mudanças. A seguir, têm-se as expressões de fluxo de potência:

$$S_d = diag(I_d^*)V_d = diag(V_d)I_d^*$$
(3.23)

$$S_{p} = diag(I_{p}^{*})V_{p} = diag(V_{p})I_{p}^{*}$$
 (3.24)

As derivadas que comporão a matriz Jacobiano, relativa aos fluxos de potência, já considerando (3.14) a (3.19), serão:

$$\frac{\partial S_d}{\partial |V_{barra}|} = diag(V_d)(Y_d diag(V_{barra}./|V_{barra}|))^* + diag(I_d^*)diag(V_d./|V_d|)$$
(3.25)

$$\frac{\partial S_p}{\partial |V_{barra}|} = diag(V_p)(Y_p diag(V_{barra}./|V_{barra}|))^* + diag(I_p^*)diag(V_p./|V_p|)$$
(3.26)

$$\frac{\partial S_d}{\partial \theta_{barra}} = diag(V_d)(Y_d j \quad diag(V_{barra}))^* + diag(I_d^*) j \quad diag(V_d)$$
(3.27)

$$\frac{\partial S_p}{\partial \theta_{barra}} = diag(V_p)(Y_p j \quad diag(V_{barra}))^* + diag(I_p^*) j \quad diag(V_p)$$
(3.28)

As medidas de injeção têm a seguinte expressão:

$$S_{barra} = diag(V_{barra})I_{barra}^*$$
(3.29)

As derivadas parciais que compõem a matriz Jacobiano são obtidas através das expressões a seguir utilizando (3.24) e (3.25):

$$\frac{\partial S_{barra}}{\partial |V_{barra}|} = diag(V_{barra})(Y_{barra}diag(V_{barra}./|V_{barra}|))^{*} + diag(I_{barra}^{*})diag(V_{barra}./|V_{barra}|)$$
(3.30)

$$\frac{\partial S_{barra}}{\partial \theta_{barra}} = diag(V_{barra})(Y_{barra} j \quad diag(V_{barra}))^* + diag(I_{barra}^*) j \quad diag(V_{barra})$$
(3.31)

A estrutura da matriz Jacobiano, mostrada adiante em (3.32), está montada apenas com medidas convencionais de tensão, corrente, fluxo de potência e injeção de potência. Entretanto, a formulação apresentada por **[ALV99]** é relevante para inserção de medidas fasoriais no estimador, como ilustrado em **[MOR09]**.

Em **[ZHU07]** é apresentado um tratamento das medidas de corrente na forma polar para utilização de UMFs, a seguir descrito.

Tendo adaptado a formulação de **[ALV99]** para EE e introduzindo as medidas de correntes comumente disponíveis nas UMFs, então **[MOR09]** pode-se incrementar, na matriz Jacobiana, as medidas de ângulo também fornecidas pelas UMFs, conforme visto em (3.33).

$$\begin{bmatrix} real \left(\frac{\partial S_{ik}}{\partial \theta_i} \right) & real \left(\frac{\partial S_{ik}}{\partial \theta_k} \right) & real \left(\frac{\partial S_{ik}}{\partial V_i} \right) & real \left(\frac{\partial S_{ik}}{\partial V_k} \right) \\ real \left(\frac{\partial S_i}{\partial \theta_i} \right) & real \left(\frac{\partial S_i}{\partial \theta_k} \right) & real \left(\frac{\partial S_i}{\partial V_i} \right) & real \left(\frac{\partial S_i}{\partial V_{ki}} \right) \\ real \left(\frac{\partial I_{ik}}{\partial \theta_i} \right) & real \left(\frac{\partial I_{ik}}{\partial \theta_k} \right) & real \left(\frac{\partial I_{ik}}{\partial V_i} \right) & real \left(\frac{\partial I_{ik}}{\partial V_k} \right) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ imag \left(\frac{\partial S_{ik}}{\partial \theta_i} \right) & imag \left(\frac{\partial S_{ik}}{\partial \theta_k} \right) & imag \left(\frac{\partial S_{ik}}{\partial V_i} \right) & imag \left(\frac{\partial S_{ik}}{\partial V_k} \right) \\ imag \left(\frac{\partial S_i}{\partial \theta_i} \right) & imag \left(\frac{\partial S_i}{\partial \theta_k} \right) & imag \left(\frac{\partial S_{ik}}{\partial V_i} \right) & imag \left(\frac{\partial S_{ik}}{\partial V_k} \right) \\ imag \left(\frac{\partial I_{ik}}{\partial \theta_i} \right) & imag \left(\frac{\partial I_{ik}}{\partial \theta_k} \right) & imag \left(\frac{\partial I_{ik}}{\partial V_i} \right) & imag \left(\frac{\partial I_{ik}}{\partial V_k} \right) \\ imag \left(\frac{\partial I_{ik}}{\partial \theta_i} \right) & imag \left(\frac{\partial I_{ik}}{\partial \theta_k} \right) & imag \left(\frac{\partial I_{ik}}{\partial V_i} \right) & imag \left(\frac{\partial I_{ik}}{\partial V_k} \right) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ real\left(\frac{\partial S_{ik}}{\partial \theta_i}\right) & real\left(\frac{\partial S_{ik}}{\partial \theta_k}\right) & real\left(\frac{\partial S_{ik}}{\partial V_i}\right) & real\left(\frac{\partial S_{ik}}{\partial V_k}\right) \\ real\left(\frac{\partial S_i}{\partial \theta_i}\right) & real\left(\frac{\partial S_i}{\partial \theta_k}\right) & real\left(\frac{\partial S_i}{\partial V_i}\right) & real\left(\frac{\partial S_i}{\partial V_{ki}}\right) \\ real\left(\frac{\partial I_{ik}}{\partial \theta_i}\right) & real\left(\frac{\partial I_{ik}}{\partial \theta_k}\right) & real\left(\frac{\partial I_{ik}}{\partial V_i}\right) & real\left(\frac{\partial I_{ik}}{\partial V_k}\right) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ imag\left(\frac{\partial S_{ik}}{\partial \theta_i}\right) & imag\left(\frac{\partial S_{ik}}{\partial \theta_k}\right) & imag\left(\frac{\partial S_{ik}}{\partial V_i}\right) & imag\left(\frac{\partial S_{ik}}{\partial V_k}\right) \\ imag\left(\frac{\partial S_i}{\partial \theta_i}\right) & imag\left(\frac{\partial S_i}{\partial \theta_k}\right) & imag\left(\frac{\partial S_i}{\partial V_i}\right) & imag\left(\frac{\partial S_i}{\partial V_k}\right) \\ imag\left(\frac{\partial I_{ik}}{\partial \theta_i}\right) & imag\left(\frac{\partial I_{ik}}{\partial \theta_k}\right) & imag\left(\frac{\partial I_{ik}}{\partial V_i}\right) & imag\left(\frac{\partial I_{ik}}{\partial V_k}\right) \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

(3.33)

O processo de EE pode ser adaptado então para receber as medidas fasoriais, processamento híbrido, como implementado por **[KOR11]**. Entretanto este estimador sofre o efeito de espalhamento normalmente, conforme mencionado anteriormente na seção 2.5, no caso de ocorrência de medidas espúrias. A criticalidade também oferece as mesmas dificuldades de processamento quando o EG ocorre em medida crítica ou pertencente à conjunto crítico.

Desta forma, ainda há espaço para melhorias no processo de depuração do EG. Em estudos elaborados no processo de estimação auxiliado por previsões (FASE – Forecasting Aided State Estimation) **[COU89]** foi encontrado um resultado interessante neste sentido. Neste processo de estimação são implementados 2 módulos: o módulo previsor e o módulo estimador. O módulo estimador processa as medidas SCADA enquanto o módulo previsor processa um banco de dados histórico de estados estimados em momentos anteriores. No momento de aquisição de novas medidas, estas seriam analisadas com as mesmas medidas estimadas com a previsão através das inovações. Com origens distintas, previsões e medidas, o cálculo de inovações fornece então um eficiente processo de depuração de erros. A Figura 3.1 mostra este processo com mais detalhes.



Figura 3.1 – Forecasting Aided State Estimatio - FASE

Utilizando esta ideia de independência de informação para redução do efeito de espalhamento, a concepção de medidas fasoriais, conceituamente mais precisas e o computacional atual capaz de oferecer processadores avanço com multiprocessamento, elaborou-se então a um procedimento inédito de depuração que utiliza: UMFs; processamento independente dos dados SCADA e UMFs com estimadores independentes; processamento paralelo dos mesmos para evitar aumento do tempo de estimação final. Esta nova abordagem de depuração recebeu o nome de PHASE – Phasor Measurement State Estimation, que será detalhado no próximo capítulo.

3.4 Revisão da Literatura

Aqui, busca-se apresentar alguns dos principais estudos realizados sobre a inclusão de medidas fasoriais nos processos de EE em sistemas de potência.

Allemong **[ALL82]**, em 1982, propôs a inclusão de medidas de fasores no processo de EE usando a forma polar. Na forma apresentada foi possível incluir medidas fasoriais e ainda aplicar o princípio do desacoplamento (P-teta e Q-V), conforme abaixo indicado:

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta_i \\ \Delta V_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{AA} & G_{AR} \\ G_{AR} & G_{RR} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} H_{AA} & H_{AR} \\ H_{AR} & H_{RR} \end{bmatrix}^{t} R^{-1} [z - h(V, \theta)]$$
(3.34)

Onde o vetor z deve ter a seguinte sequência de medidas P_{ij} , P_i , θ_i , Q_{ij} , Q_i e V_i para a correta solução dos subsistemas.

Thorp e outros **[THO85]** foram pioneiros na análise dos benefícios da utilização de UMFs na EE. Nesta referência, foi avaliado o impacto da inclusão de medidas de ângulo bem precisas (desvio padrão inferior a 2%) em conjunto com medidas convencionais de fluxo de potência e magnitude de tensão, tendo sido constatado um leve aumento na taxa de convergência do processo de estimação.

Baldwin e outros [BAL93] propuseram um método de instalação otimizada de UMFs em redes elétricas, com base no critério de observabilidade, usando um

algoritmo duplo de "Bisecting Search" Modificado e "Simulated Annealing". Primeiro o algoritmo de "Bisecting Search" fixa o número de UMFs a ser utilizado e depois o algoritmo de "Simulated Annealing" otimiza este número, garantindo a observabilidade do sistema. A proposta apresenta o uso do modelo linear de EE devido a limitações computacionais da época. Um limite para a quantidade de UMFs necessárias (v_{LS}) foi sugerido de forma a garantir a observabilidade do sistema. A indicação baseia-se em uma análise topológica da rede, partindo de um modelo de construção gulosa, onde se instalam UMFs em barras com maiores quantidades de conexões.

$$v_{LS} = \frac{N + \frac{k}{2}}{3}$$
(3.35)

Onde:

N - o número de barras do sistema

k - número de medidas de fluxo de potência desconhecidos

Este trabalho determinou que o número mínimo de UMFs garantidor da observabilidade de um sistema está compreendido entre 1/5 e 1/4 do número de barras do referido sistema.

Zivanovic em 1996 faz uma análise entre duas abordagens para a inclusão de UMFs na EE **[ZIV96]**. A primeira abordagem seria incluir apenas as medidas de ângulo das tensões nodais **[TH085]**. Desta forma, os estimadores de estado desacoplados poderiam ter sua implementação muito simplificada. Em suas simulações, percebeu-se que uma medida de ângulo diminuía os desvios padrão dos estados estimados, mas não tanto como uma medida de fluxo ou injeção de potência. Ou seja, ainda era mais vantajoso ter uma medida de potência do que uma medida de ângulo. Uma segunda abordagem (em duas etapas) foi implementada por **[PHA86]**, em que estimadores não lineares convencionais seriam inicialmente executados para em seguida o estado estimado ser inserido em outro estimador (desta vez linear) juntamente com as medidas completas fornecidas por UMFs. Como estas eram relativamente recentes à época e muito caras (geralmente o sistema elétrico possuía medidas convencionais em maior número), os resultados deste novo estimador deveria ganhar confiança à proporção que seu uso fosse gradativamente ampliado.

Denegri **[DEN02]** apresentou técnicas de posicionamento de UMFs visando à otimização da instalação destas unidades. As técnicas propostas visavam apenas uma quantidade mínima de UMFs, de forma a obter a observabilidade.

Xu e outros sugeriram uma metodologia **[ABU05]** para otimizar a instalação de unidades de medição de sincrofasores, tendo em vista a sua melhor localização em um determinada rede elétrica, consideradas restrições de observabilidade. Neste estudo, são analisados diversos cenários, a saber: não há nenhuma medição convencional instalada; há medidas de injeção de potência; há medidas de fluxo de potência. Xu também propôs outra metodologia chamada de Procedimento Baseado na Topologia onde uma avaliação da rede é feita manualmente e identificam-se ilhas observáveis, instalando-se UMFs em suas fronteiras. Esta proposta traz benefícios claros na instalação de UMFs em redes já observadas por medidas convencionais.

Enquanto algumas pesquisas se concentravam na obtenção de metodologias para instalação otimizada de UMFs, outras visavam incluir sincrofasores no processo de EE propriamente dito. Como já existiam estimadores em funcionamento, era clara a necessidade de se encontrar formas alternativas de inclusão destas medidas aos estimadores, sem que houvesse a necessidade de grandes modificações nos códigos computacionais já desenvolvidos.

Ainda em 2005, Zhao propôs um método de inclusão de medidas de sincrofasores no estimador de estado em duas etapas para sistemas de grande porte **[ZHA05]**. O sistema seria subdividido em várias áreas e cada uma delas teria seu próprio estimador. Os estados estimados de cada área alimentam um estimador que leva em conta os sincrofasores do sistema e faz a EE do sistema por completo.

Chen verificou em 2006 a possibilidade de otimizar a inclusão de sincrofasores em sistemas de medição convencionais, visando reduzir o número de medidas críticas [CHE06]. O método de Peter-Wilkinson foi utilizado na identificação destas medidas críticas e uma matriz de incidência indicava a inclusão de sincrofasores na(s) barras necessária(s).

Zhou, em 2006, apresentou uma alternativa de inclusão dos sincrofasores em que o estimador existente forneceria o estado do sistema e outro estimador usaria estes dados como entrada juntamente com as medidas dos sincrofasores [ZHO06]. Apesar de muito semelhante ao procedimento de Zhao [ZHA05], diferem na implementação.

Zhao propôs o uso de medidas de sincrofasores de tensão provenientes de UMFs que seriam consideradas como estado efetivo, a partir das quais poderiam seriam calculados os estados de suas barras vizinhas, diminuindo consideravelmente a escala do problema **[ZH06]**. Esta abordagem aumenta a velocidade de convergência do processo de EE, mas a precisão do estimador é comprometida devido ao erro das medidas fornecidas pelas UMFs. Assim sendo, Zhao propõe um modelo EE duplo, onde primeiramente o estado é alcançado com um estimador não linear, considerando as medidas de tensão provenientes das UMFs, como sendo constantes durante o processo iterativo de filtragem (incluindo as tensões calculadas das barras vizinhas) e, numa segunda etapa, um estimador linear utiliza o estado da primeira etapa e novamente as medidas de UMFs para produzir o estado final. Esta abordagem diminui a influência da redução da precisão e mantém a velocidade da convergência.

Ainda em 2006, em **[DOT06]**, estudos realizados na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) mostraram os resultados obtidos pelo SPMS (Synchronized Phasor Measurement System) capaz de observar ocorrências no sistema, tais como, oscilações de freqüência e desligamentos de geradores na usina de Itaipu, através do monitoramento de UMFs localizadas nos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Neste estudo, foi utilizada a internet como canal de comunicação das UMFs com um concentrador de dados fasoriais (PDC - Phasor Data Concentrator). Entretanto, foi recomendado o uso de canais privados para evitar que dados importantes participem do fluxo de dados públicos, tal como acontece na Internet. Apesar deste trabalho não ter sido elaborado com os olhares voltados ao processo de EE, tornou-se importante conhecer as formas de EGs oriundas de UMFs.

Em 2007, Zhu focalizou a escolha do ângulo de referência para o problema de EE **[ZHU07]**. Com a participação de sincrofasores, tal escolha fica definida pelo ângulo da barra que possui um sincrofasor. Entretanto, alertou que se existirem poucos sincrofasores, um EG na medida do ângulo poderia comprometer a confiabilidade da EE.

Um estimador de estado reduzido foi proposto em [CHN08] onde as barras com UMFs instaladas teriam seu estado considerado como valores verdadeiros do

estado e o estimador faria a estimação apenas das barras onde não existisse UMF, através das medidas convencionais incidentes nestas barras.

Abassy e Ismail montaram um método unificado para otimização de alocação de UMFs, levando-se em consideração medidas convencionais pré-existentes no sistema [ABA09], tomando por base a proposta de [ABU05], nos casos em que existem medidas de injeção ou fluxo de potência.

Moraes alcançou resultados importantes [MOR09], como a constatação de que a inclusão de duas medidas de ângulo em determinado conjunto de medidas oferece melhoras significativas na estimação atestadas pelo indicador Erro Vetorial Total (EVT). Como a inclusão de uma medida de ângulo significa a criação de uma medida crítica e a inclusão de duas medidas de ângulo implica na formação de um conjunto crítico de medidas, Moraes sugere a inclusão de pelo menos três medidas de ângulo para que o conjunto de medição possua ausência de medidas e conjuntos críticos desta natureza. Além disto, no caso da presença de duas medidas de ângulo formando conjunto crítico, e não estando disponível outra medida de ângulo, podemse adotar medidas de corrente nas UMFs já existentes, pois estas têm o efeito de desfazer o conjunto crítico formado pelas medidas de ângulo.

Moraes propõe ainda um uso diferente das medidas provenientes de UMFs. Como tais unidades hoje em dia atuam em conjunto com UTRs, e a UMF é capaz de prover 60 leituras por segundo, cogitou-se da possibilidade de considerar essa multiplicidade de leituras como sendo pseudomedidas no processo de estimação. Entretanto, não foi registrada melhora significativa na EE com tal proposta.

Moraes constatou que a utilização de UMFs na EE reduz o espalhamento de EGs e torna mais evidente sua presença. No próximo capítulo desta Tese, o referido efeito será também ilustrado e uma nova abordagem para depuração de medidas portadores de EGs será proposta.

Mazlumi e outros **[MAZ10]** elaboraram uma heurística, denominada Bacterial Foraging, com o propósito de achar a alocação ótima de UMFs em sistemas elétricos. Mazlumi encontrou as mesmas configurações de UMFs para o sistema IEEE14 barras encontradas por **[ABU05]** e **[ABA09]**.

39

Baltensperger e outros **[BAT10]** implementaram um estimador não linear convencional processando medidas oriundas de UTRs. O estado fornecido pelo estimador convencional é agrupado com as medidas de UMFs disponíveis formando um conjunto de medidas para um novo estimador, desta vez linear.

Valverde e outros desenvolveram alternativas para a inclusão de UMFs na EE [VAL11]. Em sua primeira proposta tem-se a alteração do vetor de estado, para que se incluam as medidas de corrente dos ramos da rede provenientes de UMFs. Desta forma, algumas restrições seriam incluídas no processo de estimação e o estimador teria seu resultado influenciado pela presença de dados de UMFs. Em sua segunda proposta, tem-se um estimador em que se juntam às medidas de UMFs de magnitudes e ângulos de tensão nodais as medidas convencionais, sendo que as medidas de corrente provenientes de UMFs são transformadas em pseudomedidas de magnitude e ângulo de tensão, assim possibilitando que o estimador aproveite mais dados disponíveis.

Em 2011, Simões e outros apresentaram um estimador de duas etapas utilizando medidas convencionais e de UMFs **[SIM11]**. Na primeira etapa, o estimador convencional fornece estimativas com seus respectivos erros. Na segunda etapa, os valores deste estado inicialmente estimado são processados como informações obtidas *a priori*, e os dados provenientes de UMFs formam o vetor de medidas do processo de EE, semelhante ao estimador FASE proposto por **[COU89]**, porém com diferente implementação.

Ainda em 2011, Korres e outros **[KOR11]** aplicaram o procedimento padrão de análise residual do processo de EE convencional à estimação híbrida (com a utilização conjunta de medidas fasoriais e convencionais). Seu trabalho concentrou-se em verificar a utilização dos valores oriundos de UMFs na forma polar ou retangular, concluindo por indicar a forma retangular como aquela que levaria a um desempenho melhor.

Duan propõe em seu trabalho dois métodos alternativos de identificação e detecção de medidas espúrias, explorando a esparsidade de ocorrência de EGs **[DUA11]**. Estes dois métodos mostraram resultados superiores ao procedimento padrão de analise residual. Entretanto, a consideração da ocorrência de erros simples e esparsos pode eventualmente não ser realista, comprometendo assim sua aplicabilidade.

40

Já em 2012, Tarali desenvolveu um método para aplicar a análise residual em estimadores de dois estágios **[TAR12]**, especificamente o estimador em dois estágios proposto por **[ZH06]** com segundo estágio linear. A abordagem proposta é a de analise combinatória de resíduos, o que já havia sido aplicada no estimador híbrido de **[KOR11]**.

Simões Costa e outros realizaram pesquisa em que adotam um modelo de estimação baseado nos estimadores de duas etapas: uma com obtenção do estado estimado através de medidas fasoriais e outra valendo-se do processamento de medidas convencionais **[SIM12]**. Concluídas tais etapas, um processo de fusão de dados faria com que um única estimativa do estado fosse alcançada. Em seus resultados, foi mostrado que ao se inserir-se uma medida portadora de EG, o método proposto não detecta nem identifica a medida espúria, porém o estado final estimado apresentava um erro relativamente pequeno, apesar da presença do EG.

Frente à diferença substancial no volume de dados oriundos de medidas SCADA e de UMFs, **[MUR13]** conduziu extenso estudo com o intuito de determinar um algoritmo de compatibilização de dados desta natureza. Como usualmente, a cada seis medidas fornecidas pelo sistema SCADA novecentas medidas de UMFs são colhidas, Murugesan mostrou que a determinação de comprimentos de *buffer* variável poderiam fazer diminuir a influência de dados espúrios oriundos de UMFs.

[KOL14] e **[CAR14]**, apesar de não desenvolverem pesquisa utilizando UMFs, desenvolveram novos métodos de detecção de EG no processo de EE, alcançando bons resultados quando comparados ao teste de resíduo normalizado, fato que aqui merece menção.

Jian Du desenvolveu um método para estimar o estado utilizando o modelo em duas etapas **[DU14]**, com o mesmo objetivo proposto em **[SIM12]**, porém com implementação diferente.

[KAS14] propôs um método em dois estágios em que a área observável por UMFs teria seu estado estimado separadamente e utilizando apenas medidas fasoriais. Estratégia semelhante foi proposta por **[GOL14]**, que tendo em vista o número limitado de UMFs em operação, extraindo vantagens da agilidade de envio de dados desta unidades.

3.5 Conclusões

Conforme o levantamento apresentado na seção anterior sobre os trabalhos de pesquisa referentes à utilização de UMFs no processo de EE, verifica-se que estes, em sua maioria, se direcionam para a proposição de modificações de estimadores já instalados para que se tornassem capazes de também processar medidas provenientes de UMFs. Inicialmente, a preocupação maior recaiu sobre a otimização de planos de medição (minimamente observáveis) que contivessem UMFs. Em seguida, aspectos tais como precisão de estimativas e taxa de convergência de algoritmos de estimação tiveram lugar. Os trabalhos mais recentes começaram a se concentrar em estimar o estado de tal forma que erros grosseiros de medição influenciem o mínimo possível a estimativa final do estado.

O presente trabalho volta-se para a utilização de medidas oriundas de UMFs no processo de EE, conjuntamente com medidas convencionais, em benefício do processo de detecção/identificação de medidas contaminadas por EGs. A incorporação de medidas de UMFs será realizada de forma semelhante àquela adotada pelos estimadores em dois estágios, em que o processamento de medidas fasoriais e convencionais dão-se de forma independente. O método proposto nesta Tese, denominado PHASE (phasor-aided state estimation), será apresentado no próximo capítulo. Vale ressaltar ainda que na abordagem PHASE o estado final pode ser calculado de várias formas diferentes, pois o benefício principal proposto está na correta detecção e identificação de medidas espúrias, eliminando-as do processo de estimação e, por conseguinte, impedindo sua influência na estimação final.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA PROPOSTA

4.1 Introdução

Normalmente formulado como um problema de mínimos quadrados ponderados (MQP), à EE cabe a tarefa árdua de detectar, identificar e substituir medidas espúrias, conhecidas como portadoras de EGs. Isto se deve principalmente ao fato de que tais erros se propagam pelo processo de clássico de estimação, cabendo a análise de resíduos verificar se estão presentes e quais as medidas que realmente os contêm. Em outras palavras, o processo de EE se deixa contaminar por medidas contendo EGs (ignorando *a priori* sua presença) para, após a estimação, verificar (com muito mais dificuldades) a necessidade de excluí-los. Assim sendo, frequentemente, os resultados da função EE são comprometidos por EGs, trazendo à esta função um certo descrédito e frustações dos seus usuários (operadores da rede elétrica). Buscar novas formas para o tratamento de EGs tem sido uma preocupação constante dos pesquisadores de EE, sendo objetivo central desta Tese.

A área de EE vive um momento de atividade intensa em pesquisas, induzidas principalmente pelos avanços na tecnologia de medição, fruto do aparecimento de UMFs. Estes equipamentos são capazes de fornecer fasores de tensões nodais e correntes de ramo da rede, com boa precisão e sincronizados através do sistema GPS **[PHA08]**. Através de UMFs, pode-se observar diretamente o estado do sistema elétrico, perfeitamente caracterizado pelas magnitudes e ângulos de fase das tensões nos barramentos da rede.

Por outro lado, as vantagens desta tecnologia de medição (precisão, alta taxa de amostragem de dados e sincronização) para serem exploradas na EE, exigem um investimento financeiro elevado. Logo, sua implantação deverá ocorrer de forma lenta e gradual, o que significa dizer que não se poderá prescindir de medidas convencionais para a EE, devendo com estas coexistir as medidas de sincrofasores, durante o período de tempo de migração tecnológica.

Com o intuito de aproveitar todos os dados de observação do estado disponíveis, duas possibilidades de processamento vêm se destacando: (a) medidas convencionais em conjunto com as fasoriais alimentam um único estimador [THO85], [PHA86], [BI08] e [VAL11]; (b) cada conjunto de medição é tratado individualmente e processado separadamente por meio de dois estimadores [ZHO06], [SIM13], apontando-se como vantagem o aproveitamento do processo de EE já instalado.

Independentemente da abordagem a ser adotada, estudos têm sido conduzidos, cobrindo principalmente os seguintes aspectos: aumento do grau de precisão e confiabilidade das estimativas produzidas pela EE [SIM13]; análise conjunta da observabilidade e criticalidade de medidas [KOR12], [GOL13]; tratamento de EGs [CHE06]; avaliação de erros de parâmetros e de configuração da rede elétrica [ZHU10].

O processo de EE, entendido como um problema complexo e multifacetado, diante da oferta de medidas adicionais providas por UMFs traz em si a necessidade da integração de dados. Tal situação remete ao caso da disponibilidade de uma base de dados históricos, relativos a estado operativos observados na rede, que permite a extração de informação necessária para produzir dados preditivos do estado e medidas, a serem integrados adicionalmente ao processo de EE para enriquecê-lo. Esta integração de dados no processo de EE recebe o nome de estimação de estado auxiliada por previsões, com acrônimo Forecasting-Aided State Estimation - FASE. A combinação da estimação e previsão de estado tem sido recorrentemente apontada como um recurso promissor ao processo de EE, especialmente em termos do processamento de EGs [COU83], [FAL91], [COU01a], [HUA04], [COU09a], [COU09b], [HUA12].

O processamento de dados com base na FASE faz com que sejam evitadas as principais dificuldades para se lidar com EGs encontradas na EE convencional, uma vez que se pode detectar, identificar e substituir várias medidas espúrias, de forma correta e única (identificação em bloco de EGs). Por esta razão, seria uma boa escolha adotar a abordagem FASE, a fim de explorar a combinação de sincrofasores e as medições convencionais para o benefício de processamento de EGs. No entanto, levando em consideração a relutância (demonstrada amiúde em artigos da literatura especializada) em se alterar os programas de EE convencionais existentes, apontada atualmente como desvantajosa por força de se estar atravessando um período de transição para a tecnologia de UMFs, a abordagem da FASE não será adotada nesta Tese. Em contrapartida, propõe-se aqui um processo de estimação que se preocupa

44

com a supressão de EGs, tendo características semelhantes àquelas encontradas na FASE, lançando-se mão de medidas fasoriais. Tal processo de estimação recebe o nome de PHASE – Phasor-Aided State Estimation. Os acrônimos em inglês estão sendo mantidos por serem mais conhecidos desta forma.

Esta Tese apresenta uma nova forma de processamento de EGs através da PHASE, em que se apontam as seguintes características:

- · preservam-se os estimadores existentes no sistema SCADA;
- estimadores com base nos método dos mínimos quadrados ponderados, atuando de forma independente, são usados para processar separadamente medidas convencionais e fasoriais;
- elimina-se o efeito de espalhamento de EGs, o que permite a identificação e substituição em bloco de tais erros;
- medidas convencionais e fasoriais portadoras de EGs são processadas adequadamente;
- pode-se validar os dados processados, até mesmo em condições adversas de observabilidade;
- estimação de estado final só se dará após as medidas terem sido consideradas como válidas.

4.2 Nomenclatura

Esta seção apresenta a notação utilizada na Tese, necessária principalmente à identificação dos processos de estimação individualizados, i.e., para os que tratarem apenas de medidas convencionais (Conv) e para aqueles destinados às medidas de sincrofasores (Sync). Quando necessário, outros símbolos serão introduzidos ao longo do desenvolvimento do texto.

- z_{conv} vetor m_{conv}×1 composto apenas por medidas convencionais (SCADA).
- P_{i-j},Q_{i-j} medidas de fluxo de potência ativa, reativa convencionais (da barra i para barra j).

| Pi,Qi | medidas de injeção de potência ativa, reativa convencionais (na barra i). | | | | | |
|---|---|--|--|--|--|--|
| V i | medida de magnitude de tensão convencional na barra i. | | | | | |
| Zsync | vetor m _{sync} ×1 composto somente por medidas de sincrofasores. | | | | | |
| \vec{V}_{i} | medida de fasor tensão na barra i. | | | | | |
| $ \vec{V_{i}} \angle \theta_{i}$ | magnitude, ângulo de fase de $ec{V_{ m i}}$. | | | | | |
| $\vec{I}_{\mathrm{i-j}}$ | medida de fasor corrente do ramo i-j. | | | | | |
| $\vec{I}_{\mathrm{real}_{\mathrm{i-j}}}$ | componente real de \vec{I}_{i-j} . | | | | | |
| $ec{I}_{	ext{imag}_{	ext{imag}_{	ext{i}-	ext{j}}}}$ | componente imaginária de \vec{I}_{i-j} . | | | | | |
| $\hat{x}^{(ext{conv})}$ | vetor n×1 de estado estimado convencionalmente. | | | | | |
| $\hat{x}^{(sync)}$ | vetor n×1 de estado estimado por meio de fasores apenas. | | | | | |
| $(.)^{(\text{conv})}_{\text{conv}}$ | vetor/matriz relacionado às medidas convencionais, avaliado | | | | | |
| | $\operatorname{com} \hat{x}^{(\operatorname{conv})}$. | | | | | |
| $(.)^{(\text{conv})}_{\text{sync}}$ | vetor/matriz relacionado às medidas fasoriais, avaliado com | | | | | |
| | $\hat{x}^{(ext{conv})}$. | | | | | |
| $(.)_{\rm conv}^{\rm (sync)}$ | vetor/matriz relacionado às medidas convencionais, avaliado | | | | | |
| | com $\hat{x}^{(sync)}$. | | | | | |
| (.) ^(sync) sync | vetor/matriz relacionado às medidas fasoriais, avaliado com | | | | | |
| | $\hat{x}^{(sync)}$. | | | | | |

4.3 Processamento de EGs

Como frisado repetidamente, atribui-se à EE a fundamental tarefa de detectar medidas portadoras de EGs e, a depender da capacidade de observação da rede supervisionada, identificá-las e substituí-las por medidas com valores corretos. O tratamento de EGs é significativamente influenciado pela disponibilidade de medidas qualificadas (redundantes, de tipos variados e bem localizadas). O termo redundância refere-se a um excesso de medidas disponíveis, considerando o montante necessário para estimar todas as variáveis de estado. Quando há uma escassez de medições qualificadas, situação avaliada pela análise de observabilidade e criticalidade [COU13], a EE convencional não será capaz de desempenhar adequadamente a tarefa de depuração de dados.

Os algoritmos dedicados ao processamento de EGs (em sua maioria) têm lugar após a etapa de filtragem, quando então realizam a análise residual da estimação. Baseiam-se nas propriedades estatísticas desses resíduos, conforme ilustrado no Capítulo 2. A grande dificuldade desta análise diz respeito à propagação de erros por conta da interdependência existente entre variáveis de estado e medidas correspondentes. Usualmente, os resíduos de medidas portadoras de EGs violam o limite de detecção adotado, bem como acontece com algumas outras medidas não são portadoras de EGs. Este efeito é conhecido como efeito de espalhamento de EGs, o que impossibilita a identificação em bloco de medidas espúrias, dificultando sobremaneira a validação de dados quando ocorrem EGs múltiplos.

Condições favoráveis à depuração de dados podem ser criadas, se dados adicionais estiverem disponíveis. Por exemplo, na FASE, dados previstos podem ser usados em adição aos dados obtidos correntemente **[COU09a]**. Com base no cálculo de inovações (diferenças entre valores previstos e de medidas), um processamento eficaz de EGs pode ser alcançado, com detecção, identificação e substituição de medidas espúrias, desta feita não são atingidas pelo efeito de espalhamento de EGs. Tal espalhamento não se faz sentir nas inovações, uma vez que as previsões são obtidas independentemente das medidas a que serão comparadas (i.e., aquelas relativas ao processo de EE em determinado intervalo de tempo). De forma alternativa, com proposto nesta Tese, se vários medidores adicionais (UMFs) oferecem dados independentes do sistema SCADA, podem-se utilizar tais dados (de forma semelhante ao uso de previsões) para confrontá-los com medidas convencionais recém obtidas para avaliar sua consistência.

A seguir, à semelhança das inovações de algoritmos com base na FASE, será apresentado o tratamento de resíduos de processos criados por estimadores que usam dados conhecidos a priori, produzindo estimativas independentes dos valores com os quais serão confrontadas.

Seja r(i) a *i-ésima* componente do vetor de resíduos, obtida a partir da diferença entre a medida z(i) e aquela estimada independentemente $\tilde{z}(i)$:

$$\mathbf{r}(i) = \mathbf{z}(i) - \widetilde{\mathbf{z}}(i) \tag{4.1}$$

onde $\tilde{z} = h(\tilde{x})$; \tilde{x} — um vetor de estado estimado independentemente.

Admite-se que r(i) seja aproximadamente descrito por um processo Gaussiano com média zero e matriz de covariância V dada por:

$$V = R + M \tag{4.2}$$

onde $M = HLH^t$ — matriz de covariância do erro do vetor \tilde{z} ; $H = \partial h/\partial x$, calculado em $x = \tilde{x}$; L — matriz de covariância de \tilde{x} , obtido com o estimador independente. Logo, o conjunto de medidas recebidas e estimadas são mutuamente independentes.

O vetor resíduo é normalizado e analisado pela seguinte validação estatística:

$$\mathbf{r}_{\mathrm{N}}(i) = |\mathbf{r}(i)| / \sigma_{V}(i) \leq \lambda \tag{4.3}$$

Onde $\sigma_V(i) = \sqrt{V(i,i)}$ — desvio padrão da *i*-ésima componente do vetor *r*.

Do exposto, percebe-se uma grande vantagem na aquisição de dados que possam ser processados independentemente por estimadores autônomos. Na Seção 4.5, propõe-se um esquema de processamento de EGs em que os testes estatísticos de resíduos de estimadores distintos (Sync e Conv) são avaliados de forma cooperativa.

4.4 Integração de Dados na EE

Por natureza, dota-se a função EE de um apetite voraz por dados, o que faz com que, se não saciada, seus resultados tornem-se inúteis. Na abordagem estática do problema de EE, considerando que as estimativas são extraídas de um conjunto de medidas referentes a um único intervalo de tempo (compara-se a um retrato do sistema), há necessidade de dados em profusão (altamente redundantes) para o funcionamento adequado daquela função. Trata-se portanto de uma concentração de dados para processamento, forma diversa da FASE, em que dados previstos referentes a um intervalo de tempo à frente suprem, em parte e complementarmente, à necessidade de redundância.

A integração de dados compreende uma combinação de dados obtidos a partir de diferentes fontes, fornecendo uma visão unificada destes dados. Seguem-se, com interesse no processamento de EGs, duas abordagens para a integração de medidas convencionais e fasoriais na EE, caracterizadas estruturalmente pelo número de estimadores utilizados.

4.4.1 Único Estimador

À primeira vista, processar indistintamente medições convencionais e fasoriais com um único estimador parece ser a solução natural para integrar estes dados em benefício da função EE. Na literatura especializada, encontra-se referência a este esquema como estimação de estado híbrida [BI08], em que, embora estimativas ótimas globais possam ser obtidas, este requer algumas ações práticas (e.g., sincronização) necessárias a conciliar medidas de UMFs com aquelas fornecidas pelo sistema SCADA [VAL11], [YAN11], [Zhn13]. Além disso, o software de EE existente deve ser modificado para processar medidas fasoriais.

Tendo em conta o processamento de EGs, a fusão de dados entre medidas convencionais e fasoriais tem a vantagem de aumentar a redundância de dados, o que contribui para uma melhor condição de detecção/identificação de tais erros. No entanto, o processamento simultâneo de todas as medidas disponíveis pode levar a dificuldades na supressão de EGs, devido ao efeito de espalhamento de erros. Sucessivos ciclos de estimação de estado e eliminações sucessivas de medidas suspeitas (em base combinatória, uma-a-uma, duas-a-duas, etc.) são obrigatórios **[KOR11]**, até que todos os EGs sejam identificados.

4.4.2 Estimadores Múltiplos

Alternativamente, medidas convencionais e fasoriais podem ser tratadas por processos de estimação distintos. Na literatura, encontram-se diversos estimadores propostos para este fim, compostos por duas ou mais etapas de estimação. Em **[ZHO06]**, um primeiro estimador processa as medições convencionais, resultando em um vetor de estado, cujas componentes são consideradas como pseudomedidas pelo segundo estimador responsável por processá-las conjuntamente com as medições fasoriais. Esquema semelhante encontra-se em **[SIM13]**, entretanto com as medições convencionais e fasoriais processadas independentemente em módulos separados. O estado obtido, em cada um dos módulos, é combinado (por meio de um esquema de fusão de dados) em uma etapa adicional para produzir a estimativa final.

Considerando que existe uma tendência em se manter o software de EE existente intacto, o uso de múltiplos estimadores para a integração de dados torna-se desta forma atraente.

No que diz respeito à análise de EGs, os esquemas de integração de dados realizada por meio de módulos de estimação separados permitem a construção de estratégias em que o efeito de espalhamento de erros é limitado. Até a presente data, excluídos os trabalhos publicados oriundos desta Tese, não há registro na literatura de estudos para o tratamento de EGs com estimadores que processem separadamente medidas convencionais e fasoriais, como será visto a seguir.

4.5 Processamento de EGs com PHASE

A estratégia proposta para aperfeiçoar o processamento de EGs envolve a construção de um processo de EE em que dois estimadores (não lineares, com base no método MQP), aqui designados por Sync e Conv, atuando separadamente, tratam de forma independente medidas oriundas de UMFs e do sistema SCADA. Adiante, sobrescritos serão utilizados para denotar a que estimador (Sync ou Conv) determinado cálculo se refere. Subscritos indicam o tipo de medição (fasorial ou convencional) para a qual um vetor/matriz estiver associado. Testes estatísticos de resíduos da estimação, em esforço conjunto, procuram validar ambos os tipos de medição.

4.5.1 Estimador Sync

O estado estimado $\hat{x}^{(\text{sync})}$ é obtido em conjunto com sua matriz de covariância de erro S^(sync) a partir do processamento somente de medidas oriundas de UMFs $(z_{\text{sync}}; R_{\text{sync}})$. Então, usando $\hat{x}^{(\text{sync})}$, o vetor de medidas convencionais estimado $\hat{z}_{\text{conv}}^{(\text{sync})} = h_{\text{conv}}(\hat{x}^{(\text{sync})})$ e sua respectiva matriz de covariância de erro $M_{\text{conv}}^{(\text{sync})}$ são calculadas. Esta matriz é dada por:

$$M_{\rm conv}^{\rm (sync)} = [H_{\rm conv}^{\rm (sync)}] S^{\rm (sync)} [H_{\rm conv}^{\rm (sync)}]^{\rm t}$$
(4.4)

Onde $[H_{\text{conv}}^{(\text{sync})}] = \partial h_{\text{conv}} / \partial x$, matriz Jacobiano das medidas convencionais, calculada em $x = \hat{x}^{(\text{sync})}$; $S^{(\text{sync})} = \{[H_{\text{sync}}^{(\text{sync})}]^{\text{t}}[R_{\text{sync}}]^{-1}[H_{\text{sync}}^{(\text{sync})}]\}^{-1}$; $[H_{\text{sync}}^{(\text{sync})}] = \partial h_{\text{sync}} / \partial x$, matriz Jacobiano formado a partir de medidas de sincrofasores, calculada em $x = \hat{x}^{(\text{sync})}$. Assim, considerando-se $z_{\text{conv}}(i)$ como a i-ésima componente do vetor de medidas convencionais, a seguinte diferença pode ser computada:

$$\mathbf{r}_{\text{conv}}^{(\text{sync})}(i) = \mathbf{Z}_{\text{conv}}(i) - \hat{\mathbf{Z}}_{\text{conv}}^{(\text{sync})}(i)$$
(4.5)

A matriz $V_{\rm conv}^{\rm (sync)}$ de covariância do vetor $r_{\rm conv}^{\rm (sync)}$ será dada por:

$$V_{\rm conv}^{\rm (sync)} = R_{\rm conv} + M_{\rm conv}^{\rm (sync)}$$
(4.6)

Onde a matriz $R_{\rm conv}$ é a matriz de covariância de erros do vetor de medidas convencionais.

As componentes do vetor $r_{conv}^{(sync)}$ são normalizadas e submetidas ao seguinte teste estatístico:

$$\mathbf{r}_{\mathrm{N}_{\mathrm{conv}}}^{(\mathrm{sync})}(i) = \left| \mathbf{r}_{\mathrm{conv}}^{(\mathrm{sync})}(i) \right| / \sigma_{V_{\mathrm{conv}}^{(\mathrm{sync})}}(i) \leq \lambda$$
(4.7)

Onde $\sigma_{V_{\text{conv}}^{(\text{sync})}}(i) = \sqrt{V_{\text{conv}}^{(\text{sync})}(i,i)}$; λ limiar para detecção de medidas espúrias.

4.5.2 Estimador Conv

O mesmo tipo de cálculo realizado no estimador Sync executa-se aqui no estimador Conv que por sua vez processa apenas medidas convencionais $(z_{conv}; R_{conv})$, conforme indicam as equações apresentadas a seguir:

$$\hat{z}_{conv}^{(conv)} = h_{conv}(\hat{x}^{(conv)})$$
(4.8)

$$\boldsymbol{T}_{\text{conv}}^{(\text{conv})} = [\boldsymbol{H}_{\text{conv}}^{(\text{conv})}]\boldsymbol{S}^{(\text{conv})}[\boldsymbol{H}_{\text{conv}}^{(\text{conv})}]^{\text{t}}$$
(4.9)

Onde o vetor $\hat{x}^{(\text{conv})}$ é o estado estimado e a matriz $S^{(\text{conv})}$ sua respectiva matriz de covariância de erro; $\hat{z}_{\text{conv}}^{(\text{conv})}$ é o vetor de medidas convencionais estimadas e $T_{\text{conv}}^{(\text{conv})}$ sua matriz de covariância de erros.

$$\mathbf{r}_{\text{conv}}^{(\text{conv})}(i) = \mathbf{z}_{\text{conv}}(i) - \hat{\mathbf{z}}_{\text{conv}}^{(\text{conv})}(i)$$
(4.10)

$$\boldsymbol{U}_{\text{conv}}^{(\text{conv})} = \boldsymbol{R}_{\text{conv}} - \boldsymbol{T}_{\text{conv}}^{(\text{conv})}$$
(4.11)

Onde $\mathbf{r}_{conv}^{(conv)}(i)$ é o i^{o} resíduo das medidas convencionais e $\sigma_{U_{conv}^{(conv)}}(i) = \sqrt{U_{conv}^{(conv)}(i,i)}$ seu respectivo desvio padrão. Os componentes de $\mathbf{r}_{conv}^{(conv)}$ são normalizados e submetidos ao seguinte teste:

$$\mathbf{r}_{\mathrm{N_{conv}}}^{(\mathrm{conv})}(i) = \left| \mathbf{r}_{\mathrm{conv}}^{(\mathrm{conv})}(i) \right| / \boldsymbol{\sigma}_{U_{\mathrm{conv}}^{(\mathrm{conv})}}(i) \leq \lambda$$
(4.12)

O estado estimado $\hat{x}^{(conv)}$ e sua matriz de covariância de erro $S^{(conv)}$ também podem ser usados para obter uma estimação das medidas fasoriais $\hat{z}_{sync}^{(conv)}$ e sua matriz de covariância de erro $M_{sync}^{(conv)}$:

$$\hat{z}_{\text{sync}}^{(\text{conv})} = \boldsymbol{h}_{\text{sync}}(\hat{\boldsymbol{x}}^{(\text{conv})})$$
(4.13)

$$\boldsymbol{M}_{\rm sync}^{\rm (conv)} = [\boldsymbol{H}_{\rm sync}^{\rm (conv)}]\boldsymbol{S}^{\rm (conv)}[\boldsymbol{H}_{\rm sync}^{\rm (conv)}]^{\rm t}$$
(4.14)

Desta forma, as seguintes diferenças podem ser calculadas, normalizadas e validadas por:

$$\mathbf{r}_{\text{sync}}^{(\text{conv})}(i) = \mathbf{z}_{\text{sync}}(i) - \hat{\mathbf{z}}_{\text{sync}}^{(\text{conv})}(i)$$
(4.15)

$$V_{\rm sync}^{\rm (conv)} = \boldsymbol{R}_{\rm sync} + \boldsymbol{M}_{\rm sync}^{\rm (conv)}$$
(4.16)

$$\mathbf{r}_{\mathrm{N}_{\mathrm{Sync}}}^{(\mathrm{conv})}(i) = \left| \mathbf{r}_{\mathrm{Sync}}^{(\mathrm{conv})}(i) \right| / \boldsymbol{\sigma}_{V_{\mathrm{Sync}}^{(\mathrm{conv})}}(i) \leq \lambda$$
(4.17)

Onde $\sigma_{V_{sync}^{(conv)}}(i) = \sqrt{V_{sync}^{(conv)}(i,i)}$ é o desvio padrão da *i*-ésima medida de sincrofasores; λ limiar para detecção de medidas espúrias.

O diagrama de blocos simplificado apresentado na Figura 4.1 representa a sequência de etapas dos processos realizados pelos estimadores Sync e Conv objetivando o processamento de EGs proposto. Por razões de simplificação, os processos de identificação do EGs não estão contidos no diagrama da Figura 4.1, sendo apresentados no módulo de validação de dados da Seção 4.5.2.



Figura 4.1 – Processamento de EGs proposto em PHASE

4.5.3 Diagnóstico

Com PHASE, a combinação dos testes de resíduos da estimação facilita o diagnóstico da ocorrência de EGs. A Tabela 4.1 apresenta as quatro combinações de respostas sim ou não, referentes às violações de limite indicados por estes testes, bem como o diagnóstico correspondente a cada caso.

| Violações | do Limite | | |
|------------------------------|------------------------------|--|--|
| $r_{\rm Nconv}^{\rm (sync)}$ | $r_{\rm Nconv}^{\rm (conv)}$ | Diagnose | |
| Sim | Sim | EG em medidas SCADA: erro em <i>z</i> _{conv} dentro da área observável por PMUs | |
| Sim | Não | EG em medidas de PMUs | |
| Não | Não | sem EG | |
| Não | Sim | EG em medidas SCADA: erro em z_{conv} fora da area observável por PMUs | |

Tabela 4.1 – Validação de dados e Diagnóstico com PHASE.

Considerando que o processo de instalação de UMFs encontra-se em andamento, pode-se supor que a disponibilidade de sincrofasores seja limitada atualmente. Ainda assim, pode-se esperar que os processos de estimação Sync ocorram em áreas contendo medições fasoriais apenas, necessárias para se observar estas partes da rede elétrica e nelas colher os benefícios da PHASE. Para ilustrar este aspecto, alguns resultados de estudos de simulação podem ser encontrados no Capítulo 5.

A seguir, o procedimento para a identificação de medidas espúrias tanto oriundas do sistema SCADA quanto de UMFs será apresentado.

4.5.4 Identificação de EGs

Para que se alcance um grau de compreensão inicial mais favorável à utilização da metodologia proposta, entende-se como necessário adotar hipóteses realistas sobre a ocorrência de EGs, tais como: assume-se presente um nível de redundância razoável para o sistema de medições convencionais (pelo menos a ausência de medidas críticas) e um nível baixo de redundância para sistemas de medição fasorial. A seguir, serão analisadas as situações da presença de EGs em medidas convencionais e fasoriais.

4.5.4.1 EGs em medida convencional

Violações do limite estabelecido em ambos os testes $r_{N_{conv}}^{(sync)}$ e $r_{N_{conv}}^{(conv)}$ testes indicam a presença de erros em z_{conv} , interno a área local observada por UMFs. O processo de identificação de EGs ocorre selecionando-se as componentes de $r_{N_{conv}}^{(sync)}$ marcadas como suspeitas. Estas medidas identificadas como portadoras de EGs podem, facilmente, ser substituídas (todas de uma única vez) pelas suas estimativas correspondentes, obtidas através do estimador Sync, ponderadas pelos elementos da diagonal da matriz M definida em (4.4). Este procedimento é computacionalmente muito mais atraente do que o processo usual (baseado na combinação de medidas). No caso em que não há violações do limite estabelecido no teste $r_{N_{conv}}^{(sync)}$, porém há violações no teste $r_{N_{conv}}^{(conv)}$, então EGs ocorrem em medidas convencionais fora da área de cobertura das UMFs. Portanto, a identificação de EGs se dá através do teste usual (combinatório) de $r_{N_{conv}}^{(conv)}$.

4.5.4.2 EGs em sincrofasores

Se alguns elementos de $r_{N_{conv}}^{(sync)}$ violam o limite de detecção estabelecido, mas o teste $r_{N_{conv}}^{(conv)}$ valida z_{conv} , então conclui-se que as medidas estimadas $\hat{z}_{conv}^{(sync)}$ estão comprometidas pela presença de EGs nas medidas oriundas de UMFs. Nesta situação, o vetor do estado estimado $\hat{x}^{(conv)}$ obtido pelo estimador Conv é validado e pode ser usado ainda para estimar as medidas fasoriais. Assim sendo, o teste $r_{N_{sync}}^{(conv)}$ pode ser aplicado para verificar violações e identificar possíveis medidas fasoriais espúrias.

Quando medidas convencionais críticas (não redundantes para um dado conjunto) estão presentes, seus resíduos $r_{N_{conv}}^{(conv)}$ correspondentes (originados pelo estimador Conv) não serão marcados como suspeitos, uma vez que estes resíduos são numericamente sempre nulos. Entretanto, esta adversidade não ocorre com o teste $r_{N_{conv}}^{(sync)}$ obtido via estimador Sync. Em outras palavras, se o teste $r_{N_{conv}}^{(sync)}$ for positivo e o teste $r_{N_{conv}}^{(conv)}$ for negativo, então medidas fasoriais válidas seriam

eliminadas, de acordo com o estabelecido na Tabela 4.1. Desta forma, situações em que medidas críticas estejam presentes devem ser tratadas separadamente pelo processo PHASE proposto. Por exemplo, se a análise de observabilidade/criticalidade classificar uma medida convencional como crítica e esta for marcada pelo teste de resíduo do estimador *Sync* como suspeita, então somente esta medida será considerada como portadora de EG. Quanto à ocorrência de EGs em *k*-tuplas críticas de medidas convencionais, estas serão corretamente detectadas/identificadas por PHASE, uma vez que o teste $r_{N_{conv}}^{(conv)}$ do estimador Conv indicará a *k*-tupla como suspeita e o teste $r_{N_{conv}}^{(sync)}$ do estimador Sync também o fará.

Embora EGs em medidas de UMFs sejam desconsiderados na maioria dos trabalhos encontrados na literatura, pode-se reconhecer que tais erros ocorram e afetem o processo de EE. O Apêndice C apresenta alguns aspectos relacionados à ocorrência de EGs em sincrofasores.

4.6 Estimação Final do Estado

Embora um dos objetivos principais desta Tese seja a construção de esquemas confiáveis para o processamento de EGs, entende-se que a utilização de estimadores múltiplos requer a obtenção de uma estimativa final para o estado do sistema. Assim sendo, após a depuração dos dados, ou seja, quando se espera não mais haver EGs presentes entre as medições, uma estimativa do estado do sistema deve ser produzida, existindo para tal diversos caminhos. Por exemplo, considerando que duas estimativas estejam disponíveis, juntamente com as correspondentes matrizes de covariância de erro de estimação, uma possibilidade de cálculo para a estimativa final do estado, seria [GIB11, p. 462]:

$$\hat{x}^{(\text{final})} = w_1 \hat{x}^{(\text{sync})} + w_2 \hat{x}^{(\text{conv})}$$
 (4.18)

De acordo com princípios da fusão os pesos em (4.18) são dados por [SIM13]:

$$w_1 = S^{(\text{conv})} (S^{(\text{sync})} + S^{(\text{conv})})^{-1},$$

$$w_2 = S^{(\text{sync})} (S^{(\text{sync})} + S^{(\text{conv})})^{-1}.$$
(4.19)

$$(G^{(\text{sync})} + G^{(\text{conv})})\hat{x}^{(\text{final})} = G^{(\text{sync})}\hat{x}^{(\text{sync})} + G^{(\text{conv})}\hat{x}^{(\text{conv})}$$
(4.20)

O cálculo da estimativa final do estado utilizando (4.18) e (4.19) envolve inversão de matrizes, fato inconveniente em problemas de grande porte. No entanto, em vez de se usar (4.18), a estimativa final pode ser obtida por (4.20), através de uma fatoração triangular esparsa de um sistema linear. Também vale ressaltar que as matrizes de ganho utilizadas em (4.20) já foram computadas a partir dos dois estimadores independentes, cujas estimativas devem ser combinadas.

Uma alternativa mais simples, porém fornecedora de resultados melhores que a EE puramente convencional (medidas unicamente do sistema SCADA), seria a média aritmética entre os estados já estimados nos processos Sync e Conv, ou seja:

$$\hat{x}^{(\text{final})} = (\hat{x}^{(\text{sync})} + \hat{x}^{(\text{conv})})/2$$
 (4.21)

Com o intuito de ilustrar a aplicação da metodologia proposta neste capítulo, simulações foram realizadas com a concorrência dos seguintes fatores: variação da quantidade de EGs simultaneamente introduzidos; criação de diferentes condições de observabilidade; ocorrência de EGs em ambas as medidas convencionais e fasoriais. Tais simulações estão reunidas no próximo capítulo desta Tese.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS OBTIDOS

5.1 Introdução

Conforme visto no capítulo anterior, a metodologia proposta foi desenvolvida com o objetivo de propiciar uma grande melhoria no processo de depuração de EG na estimação de estado. De forma a avaliar tal capacidade, foram realizadas diversas simulações envolvendo a presença de diferentes tipos de erros.

De modo a avaliar o desempenho da metodologia proposta, a análise residual realizada com PHASE é comparada com a realizada com o estimador de estado convencional, utilizando-se apenas medidas convencionais, e também a realizada pelo estimador híbrido, utilizando-se medidas convencionais e fasoriais conjuntamente.

Inicialmente, os resultados do estudo serão apresentados tendo-se por base o sistema IEEE 14 barras e terão como característica principal a observabilidade total, porém mínima, proporcionada pelo sistema de medição fasorial. Posteriormente, um estudo tendo por base os sistemas IEEE 30 e 118 barras levará em conta a situação onde as medições fasoriais permitem observar apenas uma parte do sistema.

5.2 Descrição das Simulações

Os testes descritos a seguir foram executados em um computador com processador Core i3, 3,3GHz, 4Gb de memória RAM, sistema operacional Windows XP SP3 e utilizando o MatLab v2006a.

As simulações levarão em conta duas situações, a se conhecer: (i) A presença de um único EG em uma das medições do sistema de medição sugerido para testes; (ii) A presença de múltiplos EG tendo como base a simulação de falha de uma UTR.

Os EG simulados serão considerados aos pares, assumindo a falha do equipamento de medição. O outro tipo será a falha de UTR/PMU, que comprometerá todas as medidas vinculadas a UTR/PMU em questão. Cabe ressaltar que não serão levados em considerações erros múltiplos em medidas de tipos diferentes nas seções 5.3, 5.4 e 5.6, ou seja, os EG ocorrerão em medidas convencionais ou medidas fasoriais e não será considerada a possibilidade de ocorrência simultânea de EG em medias convencionais e fasoriais ainda. A ocorrência de EGs simultâneo, em medidas de UTR e de PMU, será considerada na Seção 5.7

No sistema IEEE 14 barras, as medidas simuladas, sem a presença de EG, levam em consideração um sorteio de valores com distribuição normal de média igual ao valor medido e desvio padrão específico da medição em questão segundo o trabalho de **[MOR09, pp. 139]**. Desta forma possuem erro médio de 4,27% em módulo para medidas oriundas do sistema SCADA e 0,34% para medidas oriundas de PMUs, considerando que estas são mais precisas que as primeiras. A simulação de EG nas medidas leva em consideração um erro fixo de 12 desvios para medidas convencionais, gerando um erro médio de 25% nos mesmos, e 50 desvios para PMUs, gerando um erro médio de 33%. Nos sistemas IEEE 30 e 118 Barras foram simulados apenas EG em medidas convencionais e os valores dos erros estão na mesma ordem de grandeza.

A complexidade do algoritmo proposto será analisada na Seção 5.8 onde os aspectos computacionais serão abordados e na Seção 5.9 serão apresentadas formas de finalização do processo de estimação, apesar de este não ser o foco da metodologia proposta. Vale ressaltar que as simulações avaliarão o desempenho da Estimação Convencional, Estimação Híbrida e Estimação Convencional auxiliada pelo método PHASE.

5.3 Simulações no Sistema IEEE 14 Barras

Tendo em vista que o problema da EE é de natureza local, sem perda de generalidade, estudos podem ser realizados em sistemas de pequeno porte. Desta forma, utilizou-se o sistema IEEE14 barras com a seguinte configuração de medidores, mostrado na Figura 5.1, doravante denominado Sistema de Medição 1 – SM1.


Figura 5.1 – Configuração SM1 utilizada no sistema IEEE14 Barras, onde **o** representam pares de medidas de fluxo de potencia ativos/reativos; □ representa medida convencional de magnitude de tensão e ∇ representam pares de medidas de injeção de potência.

A utilização de PMUs considerará as condições apresentadas por **[ABU05]**, onde se mostra que a disposição de PMUs nas barras 2, 6, 7 e 9 é suficiente para garantir a mínima observabilidade do sistema IEEE 14 barras, desde que possuam medições de magnitude e ângulo de tensões bem como fasor corrente em cada ramo originado na barra em questão (valores reais e imaginários do fasor em coordenadas retangulares). Este conjunto de PMUs será denominado Sistema de Medição Fasorial 1 - SMF1.

A seguir serão mostradas algumas situações de ocorrência de EG, a se conhecer: EG em medidas convencionais; EG em medidas fasoriais e EG em medidas pertencentes a conjuntos críticos ou medidas efetivamente críticas.

5.3.1 EG em medidas Convencionais

Nesta situação foram simulados dois tipos de casos: CASO 1 – onde a presença do EG ocorre em um único par de medidas convencional; CASO 2 – onde o EG ocorre em todas as medidas convencionais de uma determinada UTR.

CASO 1: Foram executadas 20 simulações onde cada uma dos pares de medidas do SM1 portava EG. Na tabela 5.3 pode ser visto o resultado global destas 20 simulações e na Tabela 5.1 têm-se dois exemplos se destas simulações, onde ocorre um EG no par de medidas P₁₋₆, Q₁₋₆ e P₃, Q₃. Repare que a Estimação Convencional destacou as medidas P₁₋₆, Q₁₋₆ e P₃, Q₃, em suas respectivas simulações, como medidas suspeitas por terem seus resíduos normalizados superiores ao limite de detecção, porém as mesmas não eram os maiores resíduos, as injeções de potência da barra 10 e da barra 6 se inserem entre as medidas espúrias, das respectivas simulações, com resíduos maiores que as portadoras de EG. A Estimação Híbrida não obteve a mesma dificuldade que a Estimação Convencional, pois as medidas espúrias foram corretamente indicadas, na análise residual normalizada, como maiores resíduos, porém houve o efeito espalhamento de EG e medidas fasoriais foram listadas como suspeitas. Apesar do destaque correto das medidas espúrias, o efeito de espalhamento do EG fez com que houvesse um gasto adicional na análise das medidas erroneamente indicadas. Desta forma, a abordagem PHASE obteve resultado nitidamente superior, pois não foi afetada pelo efeito de espalhamento do EG e conseguiu a indicação em bloco das medidas espúrias.

CASO 2: Foram executadas quatro simulações, onde o EG se fazia presente em todas as medidas de cada uma das seguintes UTRs: 1, 4, 6 e 9. Na Tabela 5.3 pode ser visto o resultado global destas simulações e na Tabela 5.1 os casos específicos de EG nas UTRs 1 e 6. Neste caso mais crítico de múltiplos erros, fica mais evidente ainda a dificuldade das Estimações Convencionais e Híbridas. Entretanto a abordagem PHASE manteve o mesmo comportamento com relação ao efeito de espalhamento do EG e identificação em bloco das medidas espúrias através do teste $r_{N_{conv}}^{(sync)}$.

Apesar destes excelentes resultados, a quantidade de testes realizados é pequena, de forma que mais simulações se fazem necessárias para confirmar o desempenho da abordagem PHASE.

5.3.2 EG em medidas Fasoriais

Nesta outra situação, agora simulou-se EG em medidas fasoriais. Novamente erros simples e múltiplos serão simulados, a saber: CASO 3 – onde há a simulação de EG em cada uma das medidas fasoriais, totalizando 19 simulações de pares de medida, ou seja, $|\vec{V_i}| \in \theta_i$, $\vec{I}_{real_{i-j}} \in \vec{I}_{imag_{-j}}$; Caso 4 – onde simula-se um erro na PMU, ou seja, todas as medidas oriundas da unidade conterão EG.

CASO 3: Ao todo foram realizadas 19 simulações, onde cada uma das medidas fasoriais foi simulada portando EG. A Tabela 5.2 mostra um exemplo destas simulações, o EG na medida fasorial de tensão da barra 2. Note que a Estimação Convencional não pode ser aplicada, pois o EG ocorre em Medida Fasorial. A estimação Híbrida mostra as medidas $|\vec{V}_2|, \theta_2$ na listagem de medidas suspeitas pelo processo de análise residual normalizada padrão e estes são os maiores resíduos, porém o efeito de espalhamento do EG se fez muito forte. Na abordagem PHASE o teste $r_{N_{conv}}^{(sync)}$ mostra como suspeitas algumas medidas convencionais, porém como o teste $r_{N_{conv}}^{(conv)}$ não lista nenhum resíduo violado, então efetua-se o teste $r_{N_{sync}}^{(conv)}$, que mostra apenas $|\vec{V}_2|, \theta_2$ como medidas suspeitas. O resultado global destas simulações pode ser vista na Tabela 5.3.

CASO 4: Realizaram-se as quatro simulações possíveis neste caso, onde cada uma das PMUs teve simulado uma falha em todas as suas medidas. Os resultados globais podem ser vistos na Tabela 5.3 e o exemplo específico do EG na PMU₁ está relacionado na Tabela 5.2. O resultado é semelhante à situação encontrada no CASO 3, a abordagem PHASE mostra-se eficiente quanto ao efeito de espalhamento do EG e indica em bloco as medidas espúrias com limites de detecção violados.

5.3.3 EG em Dados Críticos

Nesta seção se faz uma análise específica do caso onde a criticalidade da medida portadora de EG é alta. Por exemplo, têm-se as medidas P_{7-8} , Q_{7-8} e P_{8-7} , Q_{8-7} como sendo partes de um conjunto crítico no SM1. Suponha a ocorrência de EG no

par P8-7, Q8-7. A Estimação Convencional terá como resíduos normalizados que violam o limite estabelecido as quatro medidas. Ao efetuar a eliminação de uma delas e estimar novamente, nenhuma medida será listada como suspeita no teste $r_{N_{CONV}}^{(conv)}$ e o mesmo ocorre caso a medida retirada for devolvida e a outra for retirada. Isto significa que o EG não será corretamente identificado pela Estimação Convencional. A Estimação Híbrida indica corretamente as medidas espúrias com os maiores resíduos normalizados, porém o efeito de espalhamento lista as medidas de corrente de ramo $\vec{I}_{real_{7.8}}$, $\vec{I}_{imag_{7.8}}$ como suspeitas também, acarretando em esforço adicional na identificação. A abordagem PHASE novamente não é afetada pelo efeito de espalhamento do EG e indica em bloco as duas medidas espúrias. Esta análise implica que, a ocorrência de EG nas medidas P7-8, Q7-8 e P8-7, Q8-7 não é identificável na Estimação Hibrida, pois a listagem de medidas suspeitas inclui as referidas medidas e a medida de corrente $\vec{I}_{real_{7-8}}$, $\vec{I}_{imag_{7-8}}$ somente. Ao efetuar-se a analise residual normalizada padrão e eliminar-se este par de medidas de corrente, a estimação híbrida recai na situação anterior da estimação convencional, ficando nítida a vantagem da abordagem PHASE nesta situação crítica. A esta situação denomina-se "tripla crítica", ou seja, a retirada de uma destas medidas torna as outras, um conjunto crítico.

A quantidade de simulações efetuadas ainda é relativamente pequena apesar de ter percorrido todo espaço amostral de possibilidades do sistema IEEE 14 barras com o SM1 observando-o. Faz-se necessário verificar outras sementes de medidas simuladas e variar a magnitude dos EG inserido, de forma a verificar a robustez e eficiência do método proposto.

Outras avaliações que podem ser efetuadas: ir além da analise residual PHASE e chegar a um estado final estimado e comparar o custo computacional entre os métodos de estimação em caso de ocorrências de EG; o comportamento do método em instâncias maiores e assim poder efetivamente atestar a eficiência do método. E é neste intuito que uma pequena prévia desta possibilidade é analisada na próxima seção, porém o sistema passa a não ser completamente observável por PMUs, formando uma pequena ilha de observabilidade.

| | | | Convencional | Híbrido | | PHASE |
|------|-------|---|---|--|---|--|
| | | EG | Med. Marcadas pelo teste $r_{N conv}^{(conv)}$ | Med. Marcadas pelo teste $r_{\rm N}$ | Med. Marcadas (sync) pelo teste $P_{N_{conv}}$ | Med. Marcadas pelo teste $r_{N \text{ conv}}^{(\text{conv})}$ |
| 01 | 531 | P ₆₋₁₁ ,Q ₆₋₁₁ | $\begin{array}{c} P_{6-11}; Q_{6-11}; V_1; Q_{2-3}; Q_{9-10}; \\ Q_{9-14}; P_3; Q_3; Q_6; Q_{10}; Q_{13} \end{array}$ | $P_{6-11}; Q_{6-11}; \vec{I}_{real_{6-11}}; \vec{I}_{imag_{6-11}}$ | $P_{6-11}; Q_{6-11};$ | $\begin{array}{c} P_{6-11}; Q_{6-11}; V_1; Q_{2-3}; Q_{9-10}; \\ Q_{9-14}; P_3; Q_3; Q_6; Q_{10}; Q_{13} \end{array}$ |
| Caso | 5.5.1 | $P_{3,Q_{3}}$ | $P_3; P_{2-3}; P_{6-11}; P_6$ | $P_{3}; Q_{3}; \vec{I}_{real_{2-3}}; \vec{I}_{imag_{2-3}}; \vec{I}_{imag_{2-4}}$ | $P_{3,Q_{3}}$ | $P_3; P_{2-3}; P_{6-11}; P_6$ |
| 2 | | Todas as med. da UTR ₁ | $V_{1;P_{1-2};Q_{1-2};Q_{1-5};P_{5-2};Q_{5-2};} Q_{3};Q_{2-3};Q_{6}$ | $V_{1}; V_{7}; V_{9}; P_{1-2}; Q_{1-2}; P_{1-5}; Q_{1-5}; \vec{I}_{imag_{2-1}};$ $\vec{I}_{imag_{2-5}}; \vec{I}_{real_{2-7}}$ | $V_{1};P_{1.5};Q_{1.5};P_{1.2};Q_{1.2}$ | $V_{1}; P_{1-2}; Q_{1-2}; Q_{1-5}; P_{5-2}; Q_{5-2}; Q_{3}; Q_{2-3}; Q_{6}$ |
| Caso | 5.3.2 | Todas as med. da UTR ₆ | $\begin{array}{c} V_{1;}P_{2:3};Q_{2:3};P_{6:11};Q_{6:11};\\ P_{6:12};Q_{6:12};P_{6:13};Q_{6:13};\\ P_{9:14};Q_{9:14};P_{12:13};Q_{12:13};\\ P_{5:2};P_{3};Q_{3};P_{6};Q_{6};P_{13};Q_{13} \end{array}$ | $\begin{array}{c} P_{6-11}; Q_{6-11}; P_{6-12}; Q_{6-12}; P_{6-13}; Q_{6-13}; P_{6}; Q_{6}; \\ \vec{I}_{real_{2-5}}; \vec{I}_{imag_{6-5}}; \vec{I}_{real_{6-5}}; \vec{I}_{imag_{6-11}}; \\ \vec{I}_{imag_{6-12}}; \vec{I}_{imag_{6-13}} \end{array}$ | $\begin{array}{c}P_{6-12};Q_{6-12};P_{6-13};Q_{6-13};Q_{6-13};Q_{6-13};Q_{6-11};Q_{6-11};Q_{6-11};P_{6};Q_{6}\end{array}$ | $\begin{array}{c} V_{1;}P_{2:3};Q_{2:3};P_{6:11};Q_{6:11};\\ P_{6:12};Q_{6:12};P_{6:13};Q_{6:13};\\ P_{9:14};Q_{9:14};P_{12:13};Q_{12:13};\\ P_{5:2};P_{3};Q_{3};P_{6};Q_{6};P_{13};Q_{13}\end{array}$ |

Tabela 5.1 – Casos 1 e 2 com a ocorrência de EG únicos e múltiplos em medidas convencionais.

| | | Híbrido | | PHASE |
|--------|------------------------------|--|---|---|
| | EG | Med. Marcadas pelo teste $r_{\rm N}$ | Med. Marcadas p/ (sync) teste $r_{N_{conv}}^{(sync)}$ | Med. Marcadas pelo teste $r_{N_{Sync}}^{(conv)}$ |
| Caso 3 | $ \vec{V}_2 , \theta_2$ | $\begin{split} P_{1-4}; P_{5-2}; Q_3; P_6; \mid \vec{V}_2 \mid ; \theta_2; \theta_6; \theta_7; \vec{I}_{imag_{2-1}}; \vec{I}_{real_{2-3}}; \vec{I}_{real_{2-4}}; \\ \vec{I}_{real_{2-5}}; \vec{I}_{imag_{2-5}}; \vec{I}_{real_{6-5}}; \vec{I}_{real_{6-11}}; \vec{I}_{real_{6-13}}; \vec{I}_{real_{7-4}}; \vec{I}_{real_{9-4}} \end{split}$ | P5-2;P6;Q6; P10;Q10;Q13 | $ \vec{v}_2 , \theta_2$ |
| Caso 4 | Todas as med. da PMU 7 | $\begin{array}{c} P_{4-7}; Q_{4-7}; Q_{7-8}; Q_{8-7}; \\ P_{9}; Q_{9}; Q_{10}; P_{10}; \ \theta_{2}; \ \theta_{6}; \ \ \vec{V}_{7} \ , \theta_{7}; \ \theta_{9}; \ \vec{I}_{real_{2-4}}; \ \vec{I}_{imag_{2-4}}; \ \vec{I}_{real_{7-4}}; \\ \vec{I}_{imag_{7-4}}; \ \vec{I}_{imag_{7-8}}; \ \vec{I}_{real_{7-9}}; \ \vec{I}_{imag_{7-9}}; \ \vec{I}_{real_{9-4}}; \ \vec{I}_{imag_{9-4}}; \ \vec{I}_{real_{9-7}}; \\ \vec{I}_{imag_{9-7}}; \ \vec{I}_{real_{9-10}}; \ \vec{I}_{real_{9-10}}; \ \vec{I}_{real_{9-14}} \end{array}$ | P4.7;Q4.7;Q7-8; Q8.7;P9;Q9;Q10 | $ \vec{V_{7}} , \theta_{7}; \vec{I}_{\text{real}_{7-4}}; \vec{I}_{\text{imag}_{7-4}}; \vec{I}_{\text{real}_{7-8}}; \vec{I}_{\text{imag}_{7-8}}; \vec{I}_{\text{real}_{7-9}}; \vec{I}_{\text{imag}_{7-9}} $ |

Tabela 5.2 – Casos 3 e 4 com a ocorrência de EG únicos e múltiplos em medidas fasoriais.

| Convencional | | | Híbrido | | | PHASE | | | | | |
|--------------|---------------------------------|----------------------|---------------|------------|----------------|--------------|-----------------|--------------|----------------|--------------|-----------------|
| Indicadores | | EG em Med. SCADA. | | EC Med. | G em SCADA. | EC Med. I | G em De PMUs | EC Med. S | G em SCADA. | E0 Med. I | G em De PMUs |
| | | único | múltiplo | único | múltiplo | único | múltiplo | único | múltiplo | único | múltiplo |
| ID (%) | | 20.0 | 0.0 | 95.0 | 50.0 | 58.0 | 0.0 | 100. | 100. | 100. | 100. |
| | $r_{\rm N_{conv}}^{\rm (sync)}$ | não aj | não aplicável | | plicável | não a | plicável | 0.0 | 0.0 | 11.3 | 18.9 |
| SmEf | $r_{\rm Nconv}^{\rm (conv)}$ | 16.2 | 28.2 | não a | plicável | não a | plicável | 16.2 | 28.2 | não a | plicável |
| (%) | <i>r</i> _N | não aj | não aplicável | | 5.3 | 17.3 | 32.9 | não a | plicável | não a | plicável |
| | $r_{\rm Nsync}^{\rm (conv)}$ | não aj | olicável | não a | plicável | não a | plicável | não a | plicável | 0.0 | 0.0 |

Tabela 5.3 – Indicadores globais dos resultados das simulações.

Os indicadores da Tabela 5.3 medem o desempenho dos processos de detecção/identificação de medidas espúrias baseando-se no sucesso da identificação em bloco (indicador *ID*) e no efeito de espalhamento do EG (indicador *SmEf*).

$$ID = n_{\rm success} / n_{\rm tests} \tag{5.1}$$

$$SmEf = m_{smear}/m$$
 (5.2)

Onde n_{success} é o número de casos no qual as medidas simuladas como portadoras de EG estão corretamente listadas como as medidas com os maiores resíduos r_{N} ou r_{N} ; n_{tests} é o número de testes realizados contendo EG; m_{smear} é o número de medidas espúrias válidas listadas pelos testes r_{N} ou r_{N} ; m é o número de medidas disponíveis na simulação que não portadoras de EG. Esta tabela mostra como a abordagem PHASE obteve resultados promissores no objetivo proposto por este trabalho.

5.4 Simulações no Sistema IEEE 30 Barras

Para ilustrar uma situação onde os sincrofasores não conseguem observar o sistema como um todo, mostra-se a seguir um exemplo onde isto ocorre, como mostrado na Figura 5.2. Os sincrofasores simulados em barras de fronteira possuem medidas apenas nos ramos que conectam barramentos internos à área observável por sincrofasores. Desta forma são simulados EGs externos ou não à área observável por sincrofasores. Sendo assim, simula-se EG em uma medida crítica P_{10-17} e Q_{10-17} , interna à área observável pelos sincrofasores e avalia-se os processos de depuração de EG.



Figura 5.2 – Sistema IEEE 30 barras, Sistema de Medição SCADA – SM2 (●– fluxos de potencia ativo e reativo; ▲– Injeção de potência ativa e reativa; □ – magnitude de tensão) e Sincrofasores (■) – SMF2.

O estimador convencional (EC) não detecta a presença deste EG e não lista nenhum suspeito em sua etapa de análise residual normalizada. O estimador híbrido (EH), com seu incremento de redundância, transforma a medida crítica P_{10-17} e Q_{10-17} em uma medida pertencente a um conjunto crítico junto com o par de medidas fasoriais $\vec{I}_{real_{10-17}}$, $\vec{I}_{imag_{10-17}}$. Apesar disso, apenas detecta a presença do EG não conseguindo identificar qual das medidas pertencentes ao conjunto efetivamente possui informação espúria. O EC, quando auxiliado pelo método PHASE (teste $r_{N_{conv}}^{(sync)}$) indica apenas o par de medidas críticas P_{10-17} e Q_{10-17} , determina-se então que este par de medidas críticas é efetivamente a medida portadora de EG, conforme conceituação da seção 4.5.3.1.

Simula-se agora, a ocorrência de EG em medida convencional fora da área observável pelos sincrofasores. Nesta situação pode ocorrer espalhamento do EG em medidas observáveis pelos sincrofasores, e o PHASE ainda é capaz de trazer benefícios, como por exemplo, EG no par de medidas P_{22-24} , Q_{22-24} . O EC lista como suspeitas, as medidas Q_{2-4} , Q_3 , Q_{3-4} , P_{22-24} , Q_{22-24} , P_{23-24} , Q_{23-24} , P_{24} , Q_{24} , P_{24-25} , e Q_{24-25} . O EH indica as medidas suspeitas o $\overline{I}_{imag_{12-15}}$, P_{15-23} , Q_{15-23} , P_{21-10} , P_{21-22} , Q_{21-22} , P_{22-24} , Q_{22-24} , P_{24} , Q_{24} , P_{24-25} , Q_{24-25} . O EC, auxiliado pelo método PHASE na área observável por sincrofasores, valida todas as medidas suspeitas Q_{2-4} , Q_3 e Q_{3-4} , podem ser retiradas da lista de medidas suspeitas reduzindo assim o custo computacional do processo de identificação combinatória do EG.

CASO 5: Foram efetuados 30 testes simulando EG simples em medidas e EG múltiplos nas UTRs, todos fora da área observável pelos sincrofasores. Apesar de serem ocorrências desfavoráveis à abordagem proposta, o índice *SmEf* mostra que o custo computacional da etapa de identificação de EG é reduzido. Esta redução é verificada no teste $r_{N_{conv}}^{(conv)}$, validadas no teste $r_{N_{conv}}^{(sync)}$ realizado nas medidas SCADA observadas pelos sincrofasores. A seguir este índice é mostrado para os três estimadores em questão: *SmEf*=5,95% para o EC; *SmEf*=3,52% para o EH; *SmEf*=2,45% para o EC auxiliado pelo método PHASE.

5.5 Simulações no Sistema IEEE 118 Barras

O estágio atual de uso das PMUs não possua a capacidade de observar a rede como um todo, entretanto é muito provável que a disposição atual de PMUs seja capaz de prover observabilidade parcial da rede. Neste sentido, montou-se uma disposição de PMUs que fosse capaz de observar parte do sistema IEEE118 barras e simular algumas ocorrências para se verificar qual seria o benefício da abordagem PHASE nestes casos mais usuais no momento. O sistema de medição SM3 utilizado neste caso é o mesmo utilizado em **[COU13]**, que pode ser visto na Figura 5.3. Na Figura 5.4 pode-se ver a distribuição do Sistema de Medição Fasorial SMF3 que provê observabilidade parcial da rede em questão conforme delineado na própria figura, baseada na distribuição de PMUs de **[ABU05]**.

A quantidade de medidas convencionais no SM2 é de 176, enquanto que a quantidade de PMUs utilizadas são 10, provendo 90 medidas fasoriais ao todo. A ilha observável proporcionada pelas PMU será denominada Área PMU.

Serão executados dois testes nesta disposição de medidas onde os EG serão inseridos no segmento de múltiplos EG (falhas de UTR). Neste caso tem-se a ocorrência de EG dentro e fora da Área PMU. Desta forma foram simulados erros nas UTRs 17 e 19 (dentro e fora da Área PMU respectivamente – *CASOS 6 e 7*).

CASO 6: EG foram inseridos nas medidas convencionais P_{17-113} , Q_{17-113} , P_{13-31} , Q_{17-31} , P_{17-18} , Q_{17-18} . A Tabela 5.4 mostra o resultado desta simulação. Como o EG simulado é interno à Área PMU, ocorre o esperado, a Estimação Híbrida não consegue identificar em bloco as medidas espúrias enquanto o PHASE consegue identificar claramente as medidas portadoras de EG.

Caso 7: EG foram inseridos em medidas convencionais P_{19-30} , Q_{19-34} , P_{19-20} , Q_{19-20} . Como estes EG encontram-se fora da Área PMU, o teste $r_{N_{conv}}^{(sync)}$ não lista nenhuma medida suspeita, porém o teste $r_{N_{conv}}^{(conv)}$ lista várias medidas suspeitas dentro da Área PMU, como o teste $r_{N_{conv}}^{(sync)}$ não acusou violações, então pode-se afirmar que as medidas suspeitas internas à Área PMU são isentas de suspeição, o que reduz a listagem suspeitas consideravelmente. Logo conclui-se que mesmo não observando o



Figura 5.2 – Sistema IEEE 118 barras, Sistema de Medição SCADA – SM32

sistema como um todo, o teste $r_{N_{conv}}^{(sync)}$ traz o benefício de redução do efeito espalhamento do EG em medidas suspeitas internas a Área PMU. Esta redução pode ser constatada na Tabela 5.4.

Confirma-se desta forma que apesar de não possuir PMU observando por completo o sistema em questão, a abordagem PHASE reduz com sucesso o processo de estimação, especificamente o processo de depuração de erros. Nas próximas simulações verificar-se-á o comportamento da abordagem PHASE ante a ocorrência de erros simultâneos em medidas SCADA e fasorial.



Figura 5.4 – Configuração SMF3 utilizada no sistema IEEE11188 Barras, onde • representam pares de medidas de fluxo de potencia ativos/reativos e ☆ representam PMUs.

| | | | Híbrido | PHASE | | | | |
|--------|-------|-------------------|--|---|--|---------------------|---|--|
| | | | Med. Marcados pr teste $r_{N \text{ conv}}^{(\text{conv})}$ | Med. Marcadas pelo teste $r_{N_{conv}}^{(sync)}$ Med. Marcadas pelo teste $r_{N_{conv}}^{(conv)}$ | | | as pelo nv) iv | |
| | | Bad Data | Inside PMU Area | Outside PMU Area | Inside PMU Area | Outside PMU Area | Inside PMU Area | Outside PMU Area |
| Caso 6 | 5.5.6 | UTR ₁₇ | $\begin{split} & P_{17\cdot18;}Q_{17\cdot18;} P_{17\cdot31;}Q_{17\cdot31;} \\ & P_{17\cdot113;}Q_{17\cdot113;} P_{18\cdot19;} P_{29\cdot31;} \\ & \vec{I}_{real_{1}7-18} ; \vec{I}_{imag_{1}7-18} ; \\ & \vec{I}_{imag_{1}7-31} ; \vec{I}_{real_{1}7-113} ; \\ & \vec{I}_{imag_{1}7-113} ; \vec{I}_{real_{2}8-29} \end{split}$ | - | P ₁₇₋₁₈ ;Q ₁₇₋₁₈ ; P _{17- 31} ; Q ₁₇₋₃₁ ; P ₁₇₋₁₁₃ ; Q ₁₇₋₁₁₃ | na | $\begin{array}{c} P_{15\text{-}17};Q_{15\text{-}17};P_{17\text{-}18};\\ Q_{17\text{-}18};P_{17\text{-}31};Q_{17\text{-}31};\\ P_{17\text{-}115};Q_{25\text{-}27};\\ Q_{30\text{-}17};P_{31\text{-}32};Q_{31\text{-}32};\\ P_{32\text{-}113}; \end{array}$ | P ₁₅₋₁₉ ; Q ₁₅₋₁₉ ; P ₁₈₋₁₉ ; Q ₁₈₋₁₉ |
| Caso 7 | 5.5.7 | UTR ₁₉ | $\begin{array}{c} \theta_{21}; Q_{22-23}; Q_{29-31}; \\ \vec{I}_{real_{2-1}}; \vec{I}_{imag_{12-16}}; \\ \vec{I}_{real_{17-18}}; \vec{I}_{real_{21-20}}; \end{array}$ | $\begin{array}{c} Q_{15-19}; \ P_{15-33}; \\ Q_{15-33}; \ P_{18-19}; \\ P_{19-20}; Q_{19-20}; \\ P_{19-34}; \ Q_{19-34}; \\ Q_{30-38}; \ P_{33-37}; \\ Q_{33-37}; \ Q_{38-37}; \end{array}$ | nada | na | $\begin{array}{c} Q_{11-12}; \; Q_{17-31}; \; P_{20-21}; \\ Q_{20-21}; \; P_{21-22}; Q_{21-22}; \\ P_{22-23}; \; Q_{22-23}; Q_{23-32}; \\ Q_{27-28}; \; Q_{28-29}; Q_{29-31}; \\ Q_{30-17}; \end{array}$ | $\begin{array}{c} P_{15.19}; Q_{15.19}; \\ P_{15.33}; Q_{15.33}; \\ P_{19.20}; Q_{19.20}; \\ P_{19.34}; Q_{19.34}; \\ P_{30.38}; Q_{30.38}; \\ P_{33.37}; Q_{33.37}; \\ Q_{38.37} \end{array}$ |

Tabela 5.4 – Casos 6 e 7 de EG em medidas convencionais do SM2 no sistema IEEE 118 barras.

5.6 Erros Simultâneos em Medidas SCADA e Fasoriais

Apesar de ter-se presumido como improvável a ocorrência de erros simultâneos, aborda-se nesta seção uma observação clara de que tal fato ocorre quando avalia-se apenas a área observada pelas PMUs e monta-se um processo de depuração para identificá-lo.

Caso 8: Utilizando novamente o sistema IEEE14 barras (Figura 5.1) para ilustrar tal ocorrência onde as PMUs observam a área desejada do sistema, simula-se então EGs nos pares de medidas P_{6-13} , Q_{6-13} e $\vec{I}_{real_{12-15}}$, $\vec{I}_{imag_{12-15}}$ efetuando o processo de EE nos estimadores EC auxiliado pelo método PHASE e EH.

Neste caso verifica-se para o EH um *SmEf*=23,38% e a presença das quatro medidas espúrias entre os resíduos normalizados com seus limites violados. Isto significa que após efetuar a avaliação combinatória mostrada na Seção 2.5 desta Tese, o EH será capaz de identificar corretamente as medidas portadoras do EG. Apesar dos três maiores resíduos serem as medidas $\vec{I}_{real_{12-15}}$, P_{6-13} e Q_{6-13} , a medida $\vec{I}_{imag_{12-15}}$ é listada com 11º maior resíduo, fazendo com que seja necessário avaliar várias combinações desnecessárias antes da identificação correta. Pode-se ver com mais detalhes o teste de resíduos normalizados do EH na Tabela 5.5.

| Medida | r _N |
|---------------|-----------------------|
| Ireal2-5 | 18,773 |
| P 6-13 | 10,950 |
| Q 6-13 | 10,683 |
| Ireal6-5 | 10,178 |
| θ_{6} | 10,036 |
| θ_2 | 9,256 |
| P5-2 | 7,097 |
| Iimag6-5 | 6,143 |
| Iimag2-4 | 5,124 |
| P_{1-5} | 4,645 |
| Iimag2-5 | 4,375 |
| V_7 | 3,913 |
| Iimag6-13 | 3,796 |
| V_{9} | 3,792 |
| P_{6} | 3,527 |
| Q_{1-5} | 3,419 |
| Iimag9-4 | 3,239 |
| Ireal2-4 | 3,029 |

Tabela 5.5 – Teste r_N do estimador híbrido para o Caso 8 – EGs simultâneos.

Quando utiliza-se o EC com auxilio PHASE verifica-se que os testes $r_{N_{conv}}^{(conv)} e r_{N_{conv}}^{(sync)}$ apresentam listagem de medidas suspeitas. Pela tabela 4.1 suspeitarse-ia de medidas SCADA apenas, porém considerando a possibilidade de EGs simultâneos, tal afirmação não poderia ser feita sem a avaliação de mais uma grandeza: r_N (que ocorre no estimador Sync). Se o teste r_N não apresentar listagem de medidas suspeitas então é o caso de EG em medida SCADA. Caso o teste r_N apresente listagem de medidas suspeitas então o diagnóstico passaria a ser EG simultâneo.

Esta situação pode ser vista na Tabela 5.6 onde o estimador Sync não acusa nenhuma medida como suspeita, logo pode-se considerar apenas medidas SCADA como portadoras de EG. Já na Tabela 5.7 constata-se que, na ocorrência de EGs simultâneos o estimador Sync suspeita de medidas fasoriais.

Tabela 5.6 – Testes r_N , $r_{N_{conv}}^{(conv)}$ e $r_{N_{conv}}^{(sync)}$ do estimador convencional auxiliado pelo

| Medida | r _N - (sync) | Medida | $r_{\rm Nconv}^{\rm (conv)}$ |
|------------|--------------------------------|---------------|---------------------------------|
| Iimag2-4 | 2,991 | P 6-13 | 9,054 |
| θ_2 | 2,671 | Q 6-13 | 8,661 |
| Ireal7-9 | 2,161 | P_{13} | 8,475 |
| Ireal2-4 | 1,966 | P9-14 | 7,307 |
| Iimag7-4 | 1,775 | Q_{I3} | 6,175 |
| Iimag9-4 | 1,767 | P_{10} | 5,369 |
| V_7 | 1,761 | Q_{9-14} | 5,225 |
| V_9 | 1,621 | P9-10 | 5,007 |
| Ireal7-4 | 1,583 | Q_{6-12} | 3,685 |
| Ireal9-7 | 1,436 | Q_6 | 3,425 |
| Iimag7-9 | 1,298 | P_{6-11} | 3,288 |
| Iimag6-5 | 1,139 | Q_{10} | 3,126 |
| θ_9 | 1,049 | Q_{2-3} | 3,107 |
| Ireal2-5 | 1,012 | | |
| $	heta_6$ | 1,007 | Medida | $r_{\rm N_{conv}}^{\rm (sync)}$ |
| Ireal6-5 | 0,990 | P 6-13 | 11,129 |
| V_2 | 0,390 | Q 6-13 | 10,757 |
| | | | |
| Iimag2-3 | 0,000 | | |

PHASE para o EG em P_{6-13} e Q_{6-13}

| | · · · | | |
|-------------|----------------------|---------------|-------------------------------|
| Medida | $r_{\rm N}$ - (sync) | Medida | $r_{\rm Nconv}^{\rm (conv)}$ |
| Ireal2-5 | 15,986 | P 6-13 | 9,054 |
| $	heta_{6}$ | 15,981 | Q 6-13 | 8,661 |
| Ireal6-5 | 15,942 | <i>P</i> 13 | 8,475 |
| Iimag6-5 | 14,355 | P9-14 | 7,307 |
| θ_2 | 10,544 | Q_{I3} | 6,175 |
| Iimag2-5 | 8,459 | P_{10} | 5,369 |
| Iimag2-4 | 5,167 | Q9-14 | 5,225 |
| V_7 | 4,447 | P 9-10 | 5,007 |
| V_{9} | 4,332 | Q6-12 | 3,685 |
| Ireal2-4 | 3,445 | Q_6 | 3,425 |
| Iimag9-4 | 3,211 | P6-11 | 3,288 |
| V_2 | 3,110 | Q_{10} | 3,126 |
| Iimag7-4 | 2,932 | Q2-3 | 3,107 |
| Ireal9-7 | 1,948 | | |
| V_6 | 1,938 | Medida | (sync) r _{N conv} |
| Iimag7-9 | 1,816 | Ireal2-5 | 11,83 |
| Ireal7-9 | 1,659 | Iimag6-13 | 7,287 |
| Ireal9-4 | 1,472 | Iimag2-5 | 5,371 |
| θ_9 | 1,386 | Ireal6-13 | 4,951 |
| Iimag9-7 | 0,821 | Iimag6-5 | 4,290 |
| | | Iimag9-14 | 3,224 |
| <i>q7</i> | 0,000 | Iimag2-4 | 3,116 |

Tabela 5.7 – Testes r_{N} , $r_{N_{conv}}^{(conv)}$ e $r_{N_{conv}}^{(sync)}$ do estimador convencional auxiliado pelo

PHASE para o Caso 8

Para resolver tal situação (EGs simultâneos), o procedimento sugerido pelo método PHASE seria semelhante ao procedimento já utilizado pelo EC e EH, porém utilizando uma listagem mista r_{phase} de $r_{N_{sync}}^{(conv)}$ e $r_{N_{conv}}^{(sync)}$ ordenados decrescentemente conforme Tabela 5.8.

| Medida | $r_{N_{Sync}}^{(conv)}$ | Medida | (sync) r _{N conv} | Medida | r_{phase} |
|---------------|-------------------------|-----------|-------------------------------|---------------|-------------|
| P 6-13 | 10,723 | Ireal2-5 | 11,830 | Ireal2-5 | 11,830 |
| Q 6-13 | 10,570 | Iimag6-13 | 7,287 | P 6-13 | 10,723 |
| P5-2 | 7,656 | Iimag2-5 | 5,371 | Q 6-13 | 10,570 |
| P_{1-5} | 5,300 | Ireal6-13 | 4,951 | P5-2 | 7,656 |
| P_6 | 3,795 | Iimag6-5 | 4,290 | Iimag6-13 | 7,287 |
| Q_{1-5} | 3,701 | Iimag9-14 | 3,224 | Iimag2-5 | 5,371 |
| Q_{10} | 3,302 | Iimag2-4 | 3,116 | P_{1-5} | 5,300 |
| | | | | Ireal6-13 | 4,951 |
| | | | | Iimag6-5 | 4,290 |
| | | | | P_6 | 3,795 |
| | | | | Q_{1-5} | 3,701 |

para o Caso 8

Tal procedimento mostra-se efetivo e em alguns casos até computacionalmente menos dispendioso do que o efetuado pelo EH. O EC auxiliado pelo método PHASE alcançou *SmEf*=18,18% oferecendo um esforço computacional menor como poderá ser visto a seguir na análise da complexidade do algoritmo.

 Q_{10}

Iimag9-14

Iimag2-4

3,302 3,224

3,116

5.7 Complexidade do Algoritmo

A complexidade do algoritmo de EE dá-se pelo custo de um método dos mínimos quadrados ponderados para a estimação efetiva do estado e mais a complexidade da depuração de EGs, teste $r_{\rm N}$ para o EH e os testes $r_{\rm N}$, $r_{\rm Nconv}^{(conv)}$, $r_{\rm Nsync}^{(conv)}$ e $r_{\rm N_{conv}}^{(sync)}$ para o EC auxiliado pelo PHASE.

Como os estimadores Sync e Conv são processados em paralelo o custo do processo efetivo da estimação pode ser considerado como o mesmo para EH e EC auxiliado pelo PHASE. Atualmente o processo Conv possui mais medidas SCADA, consumindo mais tempo que o Sync exclusivamente com PMUs. O EH utiliza a conjunção de medidas SCADA e fasoriais, entretanto será considerado

conservadoramente como tendo o mesmo custo, o que na prática não ocorre. Desta forma efetuar-se-á apenas a análise do custo de depuração de EG.

Sendo assim verificou-se que a complexidade do teste r_N do EH e dos testes r_N , $r_{N_{conv}}^{(conv)}$, $r_{N_{sync}}^{(conv)}$ e $r_{N_{conv}}^{(sync)}$ para o EC auxiliado pelo PHASE são idênticos e de ordem $O(n^3)$. O que deixa toda a vantagem de um método para o outro como sendo a análise combinatória em que serão utilizados pelo processo.

Esta conclusão pode ser melhor percebida avaliando-se as simulações do *Caso8*. Pela Tabela 5.5 pode-se perceber que a depuração de EG do EH avalia erros individuais (18 combinações), depois aos pares (153 combinações), depois em triplas (816 combinações) e por último as 4-tuplas onde pelo posicionamento da medida $\bar{l}_{imag_{2-5}}$ seriam necessárias apenas 8 combinações, totalizando 995 combinações onde se efetua o processo de estimação e o teste de resíduos normalizados r_{N} .

Pela Tabela 5.8 na coluna de r_{phase} pode-se perceber que o processo proposto para o EC com auxílio PHASE, faria a mesma depuração de EG, porém como o efeito de espalhamento foi reduzido, têm-se avaliações de erros individuais (14 combinações), depois aos pares (91 combinações), depois em triplas (364 combinações) e por último as 4-tuplas que pelo posicionamento de $\vec{l}_{imag_{2-5}}$ seriam apenas 3 combinações totalizando 472 combinações.

O EC auxiliado pelo PHASE faz quatro testes, o $r_{\rm N}$, o $r_{\rm N_{conv}}^{(conv)}$, o $r_{\rm N_{sync}}^{(conv)}$ e o $r_{\rm N_{conv}}^{(sync)}$ então seriam 1888 processamentos, porém como os estimadores Conv (que efetua os testes $r_{\rm N_{conv}}^{(conv)}$ e $r_{\rm N_{sync}}^{(conv)}$) e Sync (que efetua os testes $r_{\rm N}$ e $r_{\rm N_{conv}}^{(sync)}$) são independentes, isto é, processados em paralelo, pode-se considerar apenas 944 combinações, o que já é uma avaliação computacional menor.

Entretanto: o teste $r_{N_{conv}}^{(sync)}$ obteve, em média, 67,9% de processamento mais rápido que o teste r_N ; o teste $r_{N_{conv}}^{(sync)}$ é equivalente a um teste $r_{N_{sync}}^{(conv)}$; e um teste r_N é equivalente a um $r_{N_{conv}}^{(conv)}$. Logo, pode-se considerar 472 testes $r_{N_{conv}}^{(sync)} + r_N$ ou 472

77

 $r_{N_{\text{Sync}}}^{(conv)} + r_{N_{\text{Conv}}}^{(conv)}$ devido ao processamento paralelo dos estimadores Conv e Sync da proposta PHASE.

Este processamento em paralelo reduziria o custo computacional dos testes $r_{N_{conv}}^{(sync)} + r_{N}$ ou $r_{N_{sync}}^{(conv)} + r_{N_{conv}}^{(conv)}$ do EC auxiliado pelo método PHASE, em 37,3% quando comparado aos 995 testes r_{N} do EH. Estes valores foram computados efetuando 50 testes em um computador Core I7 de 3,4 GHz e 8Gb de RAM e calculando-se a média destes tempos.

Desta forma, evidencia-se mais um benefício da proposição desta tese, um redução do custo computacional não em complexidade do algoritmo, mas em uma redução combinatória de execuções do processo. A seguir serão efetuadas algumas simulações utilizando algumas alternativas de EE comumente encontradas na literatura, para que se verifique, além do ganho nos custos computacionais do processo e da melhora na capacidade de detecção de medidas espúrias (já demonstrados nas simulações anteriores), se existe um ganho no valor final do estado estimado no processo atual de EE apenas com a inclusão da metodologia PHASE na depuração de EGs.

5.8 Estimação Final

A proposta PHASE mostrou ser bem competitiva nos quesitos capacidade de detecção de medidas espúrias e também na redução do custo computacional do processo de EE, mas agora será mostrado que além destes benefícios pode-se alcançar um estado estimado com maior exatidão se a proposta PHASE for adicionada aos processos usuais de EE.

Como visto na seção 4.6, são encontrados alguns métodos de EE em que são encontradas medidas SCADA e PMUs processadas em separado: Média Aritmética entre os estados estimados pelos estimadores Conv e Sync; Média Ponderada entre os estados estimados por Conv e Sync; e Fusão de dados entre os estados estimados por Conv e Sync. A avaliação do estado estimado final será feita com uma métrica muito utilizada quando PMUs estão envolvidas **[IEE06]**, a se conhecer: Erro Vetorial Total (EVT).

$$EVT = \sqrt{\frac{\left(x_r(n) - x_r\right)^2 + \left(x_i(n) - x_i\right)^2}{x_r^2 + x_i^2}}$$
(4.9)

Onde:

 $x_r(n) e x_i(n)$ são as partes real e imaginária do estado estimado

x^{*r*} e *x*^{*i*} são as partes real e imaginária de valor de referência

O EVT do estado estimado é calculado com a média dos EVTs de cada fasor encontrado no processo de EE.

Na Tabela 5.9 é apresentado o resultado do EVT do estado estimado (com o EC) onde o sistema de medição SCADA utilizado é o mesmo apresentado na Figura 5.1. Na Tabela 5.10 o mesmo sistema de medição SCADA agora tem ajuda de PMUs nas barras 2, 6, 7 e 9 (medindo o fasores de tensão e fluxos de corrente dos ramos ligados a cada barra) agora com o EH.

| | Refe | rência | Estin | | |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Barra | V (pu) | θ (°) | V (pu) | θ (°) | EVT (%) |
| 1 | 1,060 | 0,000 | 1,068 | 0,000 | 0,7253 |
| 2 | 1,045 | -4,980 | 1,053 | -4,900 | 0,7627 |
| 3 | 1,010 | -12,730 | 1,018 | -12,570 | 0,8294 |
| 4 | 1,018 | -10,310 | 1,025 | -10,320 | 0,6527 |
| 5 | 1,020 | -8,770 | 1,028 | -8,710 | 0,7412 |
| 6 | 1,070 | -14,220 | 1,078 | -14,130 | 0,7189 |
| 7 | 1,062 | -13,360 | 1,069 | -13,320 | 0,6204 |
| 8 | 1,090 | -13,360 | 1,097 | -13,330 | 0,6070 |
| 9 | 1,056 | -14,940 | 1,063 | -14,850 | 0,6950 |
| 10 | 1,051 | -15,100 | 1,058 | -15,010 | 0,7118 |
| 11 | 1,057 | -14,790 | 1,065 | -14,680 | 0,7387 |
| 12 | 1,055 | -15,080 | 1,062 | -14,990 | 0,7092 |
| 13 | 1,050 | -15,160 | 1,057 | -15,060 | 0,7241 |
| 14 | 1,036 | -16,030 | 1,043 | -15,930 | 0,7268 |
| EVT Médio | | | | | 0,7111 |

Tabela 5.9 – EC com o sistema de medição SCADA da Figura 5.1

| | | ^ | | ~ | | |
|-----------|---------|------------|---------|-----------|---------|--|
| | Refe | Referencia | | Estimação | | |
| Barra | V (pu) | θ (°) | V (pu) | θ (°) | EVT (%) | |
| 1 | 1,060 | 0,000 | 1,061 | -0,010 | 0,1344 | |
| 2 | 1,045 | -4,980 | 1,047 | -4,980 | 0,1391 | |
| 3 | 1,010 | -12,730 | 1,012 | -12,710 | 0,1499 | |
| 4 | 1,018 | -10,310 | 1,019 | -10,310 | 0,1383 | |
| 5 | 1,020 | -8,770 | 1,021 | -8,750 | 0,1428 | |
| 6 | 1,070 | -14,220 | 1,072 | -14,170 | 0,1619 | |
| 7 | 1,062 | -13,360 | 1,063 | -13,360 | 0,1322 | |
| 8 | 1,090 | -13,360 | 1,091 | -13,360 | 0,1248 | |
| 9 | 1,056 | -14,940 | 1,057 | -14,930 | 0,1365 | |
| 10 | 1,051 | -15,100 | 1,052 | -15,090 | 0,1364 | |
| 11 | 1,057 | -14,790 | 1,058 | -14,740 | 0,1595 | |
| 12 | 1,055 | -15,080 | 1,056 | -15,030 | 0,1636 | |
| 13 | 1,050 | -15,160 | 1,051 | -15,110 | 0,1608 | |
| 14 | 1,036 | -16,030 | 1,037 | -16,010 | 0,1393 | |
| EVT Médio | | | | | 0,1443 | |

Tabela 5.10 – EH com o sistema de medição SCADA da Figura 5.1 e PMUs nas barras 2. 6. 7 e 9

Processando EC auxiliado pelo PHASE com estimação final calculada pela Média Aritmética, o estimador Conv possui os mesmos valores finais, pois processam os mesmos dados através de um mesmo processo de EE. O estimador Sync emite um resultado muito bom, mostrado na tabela 5.11, porém como a redundância de um sistema observado unicamente por PMUs ainda é muito precária, não se pode utilizar este excelente resultado. A existência de medidas fasoriais críticas e pertencentes a conjuntos críticos, cujos EGs são de difícil depuração conforme exposto no Capitulo 2, são muito comuns no estágio atual. Assim faz-se necessário processar os estados estimados independentes, uma destas formas é calcular uma média aritmética entre os estados encontrados em cada estimador (Sync e Conv), conforme Tabela 5.12.

A seguir, na Tabela 5.13 têm-se as mesmas informações dos estimadores Conv e Sync, porém utilizando o método das medias ponderadas ao fim obtendo um resultado melhor que de média aritmética.

Por fim utilizando o método de Fusão de dados, obtém-se o EVT médio mostrado na Tabela 5.14, melhor resultado entre os três métodos propostos de finalização da EE utilizando o método PHASE de depuração de EGs.

| | Refe | rência | Estimação | | |
|-----------|---------|---------|-----------|---------|---------|
| Barra | V (pu) | θ (°) | V (pu) | θ (°) | EVT (%) |
| 1 | 1,060 | 0,000 | 1,061 | -0,010 | 0,0518 |
| 2 | 1,045 | -4,980 | 1,046 | -4,980 | 0,0553 |
| 3 | 1,010 | -12,730 | 1,011 | -12,730 | 0,0605 |
| 4 | 1,018 | -10,310 | 1,019 | -10,300 | 0,0565 |
| 5 | 1,020 | -8,770 | 1,021 | -8,750 | 0,0649 |
| 6 | 1,070 | -14,220 | 1,071 | -14,170 | 0,1049 |
| 7 | 1,062 | -13,360 | 1,063 | -13,360 | 0,0513 |
| 8 | 1,090 | -13,360 | 1,091 | -13,360 | 0,0452 |
| 9 | 1,056 | -14,940 | 1,057 | -14,930 | 0,0563 |
| 10 | 1,051 | -15,100 | 1,052 | -15,090 | 0,0560 |
| 11 | 1,057 | -14,790 | 1,058 | -14,740 | 0,1024 |
| 12 | 1,055 | -15,080 | 1,056 | -15,020 | 0,1078 |
| 13 | 1,050 | -15,160 | 1,051 | -15,110 | 0,1041 |
| 14 | 1,036 | -16,030 | 1,037 | -16,010 | 0,0601 |
| EVT Médio | | | | | 0,0698 |

Tabela 5.11 – Estimador Sync com o sistema de medição PMU nas Barras 2, 6, 7 e 9.

Tabela 5.12 – Média Aritmética entre os estados Conv e Sync das Tabelas 5.9 e 5.11

| | Refe | rência | cia Estimação | | |
|-----------|---------|---------|---------------|---------|---------|
| Barra | V (pu) | θ (°) | V (pu) | θ (°) | EVT (%) |
| 1 | 1,060 | 0,000 | 1,064 | 0,000 | 0,3879 |
| 2 | 1,045 | -4,980 | 1,049 | -4,940 | 0,4087 |
| 3 | 1,010 | -12,730 | 1,014 | -12,650 | 0,4431 |
| 4 | 1,018 | -10,310 | 1,022 | -10,310 | 0,3538 |
| 5 | 1,020 | -8,770 | 1,024 | -8,730 | 0,4010 |
| 6 | 1,070 | -14,220 | 1,074 | -14,150 | 0,3970 |
| 7 | 1,062 | -13,360 | 1,066 | -13,340 | 0,3358 |
| 8 | 1,090 | -13,360 | 1,094 | -13,340 | 0,3261 |
| 9 | 1,056 | -14,940 | 1,060 | -14,890 | 0,3753 |
| 10 | 1,051 | -15,100 | 1,055 | -15,050 | 0,3836 |
| 11 | 1,057 | -14,790 | 1,061 | -14,710 | 0,4058 |
| 12 | 1,055 | -15,080 | 1,059 | -15,010 | 0,3913 |
| 13 | 1,050 | -15,160 | 1,054 | -15,080 | 0,3978 |
| 14 | 1,036 | -16,030 | 1,040 | -15,970 | 0,3922 |
| EVT Médio | | | | | 0,3857 |

| | Referência | | Estin | | |
|-----------|------------|---------|---------|---------|---------|
| Barra | V (pu) | θ (°) | V (pu) | θ (°) | EVT (%) |
| 1 | 1,060 | 0,000 | 1,062 | -0,010 | 0,1492 |
| 2 | 1,045 | -4,980 | 1,046 | -4,970 | 0,1334 |
| 3 | 1,010 | -12,730 | 1,013 | -12,650 | 0,2859 |
| 4 | 1,018 | -10,310 | 1,019 | -10,310 | 0,0976 |
| 5 | 1,020 | -8,770 | 1,021 | -8,740 | 0,1346 |
| 6 | 1,070 | -14,220 | 1,072 | -14,160 | 0,2138 |
| 7 | 1,062 | -13,360 | 1,063 | -13,350 | 0,1049 |
| 8 | 1,090 | -13,360 | 1,092 | -13,350 | 0,1391 |
| 9 | 1,056 | -14,940 | 1,058 | -14,920 | 0,1423 |
| 10 | 1,051 | -15,100 | 1,053 | -15,080 | 0,1464 |
| 11 | 1,057 | -14,790 | 1,058 | -14,730 | 0,1694 |
| 12 | 1,055 | -15,080 | 1,056 | -15,020 | 0,1674 |
| 13 | 1,050 | -15,160 | 1,053 | -15,090 | 0,2670 |
| 14 | 1,036 | -16,030 | 1,037 | -16,000 | 0,1392 |
| EVT Médio | | | | | 0,1636 |

Tabela 5.13 – Média Ponderada entre os estados Conv e Sync das Tabelas 5.9 e 5.11

Tabela 5.14 – Fusão de dados entre os estados Conv e Sync das Tabelas 5.9 e 5.11

| | Refe | rência | Estimação | | |
|-----------|---------|---------|-----------|---------|---------|
| Barra | V (pu) | θ (°) | V (pu) | θ (°) | EVT (%) |
| 1 | 1,060 | 0,000 | 1,061 | -0,010 | 0,1284 |
| 2 | 1,045 | -4,980 | 1,046 | -4,980 | 0,1332 |
| 3 | 1,010 | -12,730 | 1,011 | -12,710 | 0,1441 |
| 4 | 1,018 | -10,310 | 1,019 | -10,310 | 0,1323 |
| 5 | 1,020 | -8,770 | 1,021 | -8,750 | 0,1370 |
| 6 | 1,070 | -14,220 | 1,071 | -14,170 | 0,1567 |
| 7 | 1,062 | -13,360 | 1,063 | -13,360 | 0,1263 |
| 8 | 1,090 | -13,360 | 1,091 | -13,360 | 0,1191 |
| 9 | 1,056 | -14,940 | 1,057 | -14,930 | 0,1306 |
| 10 | 1,051 | -15,100 | 1,052 | -15,090 | 0,1305 |
| 11 | 1,057 | -14,790 | 1,058 | -14,740 | 0,1542 |
| 12 | 1,055 | -15,080 | 1,056 | -15,030 | 0,1583 |
| 13 | 1,050 | -15,160 | 1,051 | -15,110 | 0,1555 |
| 14 | 1,036 | -16,030 | 1,037 | -16,010 | 0,1334 |
| EVT Médio | | | | | 0,1385 |

Entretanto, quando ocorre um erro no par de medidas de P_3 e Q_3 (medidas pertencentes a um conjunto crítico), um impasse na estimação é alcançado pois, o EC não é capaz de identificar qual das medidas possui EG e por conseguinte emite o resultado final contendo um erro, mostrado na Tabela 5.15.

| | Referé | | Estimação | | |
|-----------|---------|---------|-----------|---------|---------|
| Barra | V (pu) | θ (°) | V (pu) | θ (°) | EVT (%) |
| 1 | 1,060 | 0,000 | 1,078 | 0,000 | 1,6580 |
| 2 | 1,045 | -4,980 | 1,063 | -4,840 | 1,6957 |
| 3 | 1,010 | -12,730 | 1,026 | -13,080 | 1,6963 |
| 4 | 1,018 | -10,310 | 1,043 | -9,480 | 2,8515 |
| 5 | 1,020 | -8,770 | 1,038 | -8,470 | 1,8601 |
| 6 | 1,070 | -14,220 | 1,093 | -13,440 | 2,5289 |
| 7 | 1,062 | -13,360 | 1,086 | -12,440 | 2,8152 |
| 8 | 1,090 | -13,360 | 1,114 | -12,450 | 2,7249 |
| 9 | 1,056 | -14,940 | 1,082 | -13,960 | 2,9724 |
| 10 | 1,051 | -15,100 | 1,076 | -14,130 | 2,9603 |
| 11 | 1,057 | -14,790 | 1,081 | -13,910 | 2,7733 |
| 12 | 1,055 | -15,080 | 1,079 | -14,230 | 2,6951 |
| 13 | 1,050 | -15,160 | 1,074 | -14,300 | 2,7185 |
| 14 | 1,036 | -16,030 | 1,062 | -15,010 | 3,0611 |
| EVT Médio | | | | | 2,5008 |

Tabela 5.15 – EC com sistema de medição da Figura 5.1 porém com medidas $P_3 \in Q_3$ portadoras de EG.

Apesar de um EVT razoavelmente bom, o erro do estado da barra três assume um erro de 95,28% maior que o erro médio da estimação. Isto ocorre pois o EH não consegue listar Q_3 como medida suspeita de possuir EG, portanto, ao fim do processo de depuração de EG, EH não consegue uma estimação confiável do estado. Tais resultados são mostrados na Tabela 5.16.

Tabela 5.16 – EH com mesmo sistema de medição da Tabela 5.10, porém com medidas P_3 e Q_3 portadoras de EG.

| | Referência Estimação | | nação | | |
|-----------|----------------------|---------|---------|---------|---------|
| Barra | V (pu) | θ (°) | V (pu) | θ (°) | EVT (%) |
| 1 | 1,060 | 0,000 | 1,062 | -0,020 | 0,2194 |
| 2 | 1,045 | -4,980 | 1,047 | -4,990 | 0,2251 |
| 3 | 1,010 | -12,730 | 1,012 | -12,980 | 0,4920 |
| 4 | 1,018 | -10,310 | 1,020 | -10,290 | 0,2340 |
| 5 | 1,020 | -8,770 | 1,022 | -8,760 | 0,2294 |
| 6 | 1,070 | -14,220 | 1,072 | -14,170 | 0,2441 |
| 7 | 1,062 | -13,360 | 1,064 | -13,350 | 0,2283 |
| 8 | 1,090 | -13,360 | 1,092 | -13,350 | 0,2183 |
| 9 | 1,056 | -14,940 | 1,058 | -14,920 | 0,2331 |
| 10 | 1,051 | -15,100 | 1,053 | -15,080 | 0,2334 |
| 11 | 1,057 | -14,790 | 1,059 | -14,740 | 0,2426 |
| 12 | 1,055 | -15,080 | 1,057 | -15,030 | 0,2459 |
| 13 | 1,050 | -15,160 | 1,052 | -15,110 | 0,2445 |
| 14 | 1,036 | -16,030 | 1,038 | -16,000 | 0,2372 |
| EVT Médio | | | | | 0,2520 |

Utilizando o EC auxiliado pelo PHASE obtém-se um resultado interessante pois o teste $r_{N_{conv}}^{(sync)}$ detecta é identifica corretamente as medidas espúrias podendo eliminálas do processo de estimação ou então substituí-las por pseudomedidas estimadas pelo estimadas com o estado alcançado pelo estimador Sync.

Nas Tabelas 5.17A, B e C mostra-se o resultado do processamento das medidas sem as medidas espúrias para o EC auxiliado por PHASE com médias aritmética, ponderadas e fusão de dados.

| | Defe | rância | C atin | | |
|-----------|---------|---------|---------------|---------|---------|
| | Refe | rencia | Estin | naçao | |
| Barra | V (pu) | θ (°) | V (pu) | θ (°) | EVT (%) |
| 1 | 1,060 | 0,000 | 1,066 | 0,000 | 0,5295 |
| 2 | 1,045 | -4,980 | 1,051 | -4,930 | 0,5534 |
| 3 | 1,010 | -12,730 | 1,016 | -12,620 | 0,5891 |
| 4 | 1,018 | -10,310 | 1,024 | -10,280 | 0,6039 |
| 5 | 1,020 | -8,770 | 1,026 | -8,710 | 0,5603 |
| 6 | 1,070 | -14,220 | 1,076 | -14,100 | 0,6178 |
| 7 | 1,062 | -13,360 | 1,068 | -13,290 | 0,5778 |
| 8 | 1,090 | -13,360 | 1,096 | -13,300 | 0,5555 |
| 9 | 1,056 | -14,940 | 1,062 | -14,840 | 0,6290 |
| 10 | 1,051 | -15,100 | 1,057 | -14,990 | 0,6362 |
| 11 | 1,057 | -14,790 | 1,063 | -14,660 | 0,6431 |
| 12 | 1,055 | -15,080 | 1,061 | -14,950 | 0,6255 |
| 13 | 1,050 | -15,160 | 1,056 | -15,030 | 0,6346 |
| 14 | 1,036 | -16,030 | 1,042 | -15,910 | 0,6547 |
| EVT Médio | | | | | 0.6007 |

Tabela 5.17A – Média Aritmética com EC auxiliado pelo PHASE porém sem medidas P_3 e Q_3 portadoras de EG.

| Tabela 5.17B – Média Ponderada com EC auxiliado pelo PHASE porém sem medida |
|---|
|---|

| | Referência | | Estin | | |
|-----------|------------|---------|---------|---------|---------|
| Barra | V (pu) | θ (°) | V (pu) | θ (°) | EVT (%) |
| 1 | 1,060 | 0,000 | 1,062 | -0,010 | 0,1906 |
| 2 | 1,045 | -4,980 | 1,047 | -4,960 | 0,1606 |
| 3 | 1,010 | -12,730 | 1,012 | -12,670 | 0,2282 |
| 4 | 1,018 | -10,310 | 1,019 | -10,300 | 0,1146 |
| 5 | 1,020 | -8,770 | 1,022 | -8,730 | 0,1721 |
| 6 | 1,070 | -14,220 | 1,073 | -14,140 | 0,3063 |
| 7 | 1,062 | -13,360 | 1,064 | -13,340 | 0,1512 |
| 8 | 1,090 | -13,360 | 1,092 | -13,350 | 0,2148 |
| 9 | 1,056 | -14,940 | 1,058 | -14,910 | 0,2109 |
| 10 | 1,051 | -15,100 | 1,053 | -15,070 | 0,2163 |
| 11 | 1,057 | -14,790 | 1,059 | -14,720 | 0,2304 |
| 12 | 1,055 | -15,080 | 1,057 | -15,000 | 0,2296 |
| 13 | 1,050 | -15,160 | 1,054 | -15,060 | 0,4097 |
| 14 | 1,036 | -16,030 | 1,038 | -15,980 | 0,2043 |
| EVT Médio | | | | | 0,2171 |

 $P_3 \in Q_3$ portadoras de EG.

| | Refere | | Estimação | | |
|-----------|---------|---------|-----------|---------|---------|
| Barra | V (pu) | θ (°) | V (pu) | θ (°) | EVT (%) |
| 1 | 1,060 | 0,000 | 1,061 | -0,010 | 0,1350 |
| 2 | 1,045 | -4,980 | 1,047 | -4,980 | 0,1397 |
| 3 | 1,010 | -12,730 | 1,012 | -12,730 | 0,1461 |
| 4 | 1,018 | -10,310 | 1,019 | -10,300 | 0,1396 |
| 5 | 1,020 | -8,770 | 1,021 | -8,750 | 0,1435 |
| 6 | 1,070 | -14,220 | 1,072 | -14,170 | 0,1625 |
| 7 | 1,062 | -13,360 | 1,063 | -13,360 | 0,1337 |
| 8 | 1,090 | -13,360 | 1,091 | -13,360 | 0,1262 |
| 9 | 1,056 | -14,940 | 1,057 | -14,930 | 0,1380 |
| 10 | 1,051 | -15,100 | 1,052 | -15,090 | 0,1379 |
| 11 | 1,057 | -14,790 | 1,058 | -14,740 | 0,1601 |
| 12 | 1,055 | -15,080 | 1,056 | -15,030 | 0,1642 |
| 13 | 1,050 | -15,160 | 1,051 | -15,110 | 0,1614 |
| 14 | 1,036 | -16,030 | 1,037 | -16,010 | 0,1408 |
| EVT Médio | | | | | 0,1449 |

Tabela 5.17C – Fusão de Dados com EC auxiliado pelo PHASE porém sem medidas P_3 e Q_3 portadoras de EG.

É possível notar que o procedimento de depuração de EG PHASE além de conseguir detectar, identificar e eliminar do processo de estimação as medidas espúrias, o faz com um custo computacional menor é alcança resultados tão precisos quanto estimações sem a presença de EGs.

O procedimento exemplificado utilizou a eliminação das medidas espúrias como evento atenuador do EG, mas poder-se-ia utilizar pseudomedidas oriundas de informações colhidas de instante anterior a EE atual (última informação válida da medida), exatamente por esta razão talvez não seja uma alternativa adequada. Outra possibilidade seria a estimação da medida espúria através do estado estimado no processamento anterior, mas novamente o fato do estado ser de instantes diferentes pode levar a erros indesejáveis.

Entretanto as PMUs instaladas foram coletadas no mesmo instante das medidas espúrias do sistema SCADA, então outra possibilidade seria a estimação da medida portadora de EG com o estado alcançado pelo estimador Sync, onde sua incerteza já foi calculada ao processar o teste $r_{N_{conv}}^{(sync)}$, mais especificamente na diagonal da matriz de covariância das medidas convencionais estimadas pelo estado oriundo do estimador Sync conforme mostrado na equação (4.4). Poder-se-ia inclusive utilizar a abordagem PHASE como uma contribuição no processo de depuração de EG no próprio EH.

Neste capítulo foram apresentadas várias simulações, com EG em medidas SCADA e PMUs, isoladas e simultaneamente, métodos para finalizar a estimação com auxilio PHASE, tempo computacional da abordagem propostas e em situações onde a observabilidade das PMUs eram completas ou parciais. Em todos os testes a abordagem mostrou ser bem competitiva com as abordagens propostas na literatura.

A principal razão deste sucesso deve-se ao fato de que, a independência dos estimadores se mostra eficiente em conter o efeito de espalhamento. Este benefício atenua a influência do EG na estimativa final, reduz a listagem de medidas suspeitas de portarem EGs e como consequência melhorando o desempenho computacional do processo de estimação estado.

De modo geral, nas simulações realizadas, observou-se um bom desempenho da abordagem PHASE. Além de detectar/identificar a medida portadora de EG quando da simulação de EG em uma única medida, a abordagem teve um sucesso bem significativo no que tange a presença de múltiplos EG em cada simulação. Além disso, os resultados obtidos nos sistemas IEEE-30 e 118 barras demonstram ainda a capacidade da abordagem proposta em detectar/identificar eficientemente múltiplos erros grosseiros, mesmo que o número de medições fasoriais disponíveis seja insuficiente para permitir a observabilidade completa.

No próximo Capítulo serão apresentadas as conclusões desta pesquisa e futuros projetos a serem explorados.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E PESQUISAS FUTURAS

Desde sua introdução, há cerca de quarenta e cinco anos, a estimação de estado em sistemas de potência vem se estabelecendo como uma função essencial para se alcançar uma operação segura de redes de transmissão de energia elétrica. Um considerável volume de trabalhos variados neste campo de pesquisa indicam que a EE pode ser vista como uma função avançada sob certos aspectos, mas em outros ainda em construção. Amplamente, adota-se o processo de estimação com base no método dos Mínimos Quadrados Ponderados, realizado de forma centralizada e alimentado por dados adquiridos através de unidades terminais remotas, referentes a uma única varredura de coleta de dados sobre a rede elétrica supervisionada. Com a utilização recente de unidades de medição fasorial, que permitem a obtenção sincronizada de tensões nodais e correntes de ramos da rede (em magnitude e ângulo de fase), diversos aspectos relacionados à estimação de estado devem ser reconsiderados, entre estes: observabilidade e alocação de pontos de medição; precisão e confiabilidade de estimativas; processamento de erros grosseiros em medidas, parâmetros e configuração da rede.

6.1 Considerações Finais

Dentre os aspectos anteriormente mencionados, esta Tese se ocupou em apresentar uma nova abordagem para o processamento de erros grosseiros de medidas através da função estimação de estado, quando se utiliza a conjunção de dados provenientes de unidades de medição originárias de tecnologias distintas, com o objetivo de aperfeiçoar a detecção e identificação de medidas espúrias.

De modo a se construir tal abordagem, optou-se pelo processamento em separado de medidas ditas convencionais e de sincrofasores por meio de estimadores

capazes de processar ambos os tipos de medidas (denominados Conv e Sync, respectivamente), buscando-se explorar fontes independentes de informação. Originalmente, serviu de inspiração para esta proposição a estimação com capacidade de previsão, conhecida na literatura por FASE (*forecasting-aided state estimation*), o que levou à construção de termo análogo, estimação auxiliada por fasores, adotando-se o acrônimo PHASE (phasor-aided state estimation).

Diversos testes foram realizados para demonstrar o desempenho desta nova técnica: (i) erros simples em pares de medidas convencionais; (ii) erros simples em medidas fasoriais; (iii) erros múltiplos em medidas convencionais; (iv) erros múltiplos em medidas fasoriais; (v) erros simultâneos em medidas convencionais e fasoriais.

A utilização de unidades de medição fasorial ainda se encontra em progressivo processo de crescimento, devido a algumas necessidades de ordem técnica e custo: canais de comunicação individualizados; processamento eficiente do volume de dados fornecidos; especificação dos equipamentos fabricados de modo a atender exigências estabelecidas em normas; etc.

De forma a obter resultados realistas diante do exposto, estudos de simulação foram realizados em duas situações básicas no que tange à observabilidade do sistema elétrico sob supervisão da estimação de estado: (1) unidades de medição de sincrofasores foram consideradas de modo a se observar a rede elétrica como um todo, objetivo desejável e que futuramente, admite-se, deverá ocorrer; (2) unidades de medição fasorial capazes de observar apenas parte da rede elétrica, fato que já ocorre atualmente, como indica o projeto MedFase da UFSC, em que algumas ilhas observáveis exclusivamente por tais unidades já se encontram sobre supervisão.

Considerando os resultados obtidos nas simulações realizadas, constatou-se um excelente desempenho de PHASE, no que diz respeito aos seguintes aspectos: redução do efeito de espalhamento de erros; aumento da capacidade de detecção de medidas espúrias em comparação ao verificado pelo processamento de estimadores convencionais e ligeiramente superior quando comparado ao de estimadores híbridos; aumento da capacidade de identificação de medidas portadoras de erros grosseiros, deixando-as claramente destacadas das medidas efetivamente espúrias nas listas de suspeitas; redução do custo computacional do processo de estimação, alcançado pela redução de suspeição sobre as medidas processadas. Certamente, a nova abordagem PHASE poderá ter sua capacidade ainda mais evidenciada com novos testes, principalmente utilizando-se dados reais de unidades de medição fasoriais e do sistema SCADA.

Apesar de não ter sido foco desta pesquisa avaliar a precisão do estado estimado ao final do processo, testes adicionais foram realizados com possíveis estratégias de finalização encontradas na literatura, consistindo basicamente de: (a) estimação em duas etapas, em que após o processamento na primeira destas de blocos dados independentes (originários de unidades de medição fasorial ou convencional), segue-se uma segunda etapa em que os dados restantes (ainda não processados) juntam-se ao resultado da estimação da primeira etapa; (b) estimação híbrida, em que todas as medidas são processadas conjuntamente.

A abordagem PHASE utiliza uma forma de processamento semelhante à descrita em (a), porém com características singulares: na primeira etapa, os blocos de medidas utilizados são processados individualmente, por estimadores executados paralelamente; na segunda etapa, em que o conjunto de medidas já tivesse sido validado, poderia não utilizar nenhum processo de estimação mais elaborado, realizando apenas a conjunção das estimativas da primeira etapa, calculando-se uma média aritmética, média ponderada ou fusão de dados.

Em todas as formas de estimação final, mostrou-se que o emprego de PHASE proporciona uma estimação de estado com melhor precisão do que a obtida apenas com um estimador convencional, e como no caso teste da Seção 5.9, melhor também do que a obtida apenas com o estimador híbrido.

A abordagem PHASE mostra-se também flexível, permitindo sua utilização como ferramenta auxiliar de estimadores convencionais e híbridos já existentes. Como seu desempenho mostrou-se equiparado ao processo de depuração de erros na maioria dos casos, e superior nos casos em que o processo clássico falha na detecção e/ou identificação de medidas portadoras de erros, fica evidente o benefício adicionado ao processo de estimação com PHASE na fase de depuração. Nesta situação, o estimador pré-existente ainda seria responsável pela estimação final porém com PHASE eliminando as medidas espúrias, como exemplificado na Seção 5.9.

6.2 Trabalhos Futuros

Como próximo passo do trabalho destaca-se a realização de testes com sistemas que contenham dados reais, como por exemplo o sistema interligado brasileiro, composto por cerca de 5000 barras, com aproximadamente 80 unidades de medição fasorial instaladas, de acordo com o Operador Nacional do Sistema - ONS.

As condições de criticalidade de dados pode ser ampliada para se verificar o desempenho de PHASE, na eventualidade da presença de erros grosseiros em medidas pertencentes a *k*-tuplas críticas, assim como envolvendo ramos da rede críticos.

Algumas linhas de pesquisa na EE apontam para a necessidade de identificação de erros de parâmetros da rede elétrica do sistema. A investigação da aplicação de PHASE para a depuração de tais tipos de erro também será alvo de futuros trabalhos.

[ABA09] N. H. Abassy; H. M. Ismail; "A Unified Approach for the Optimal PMU Location for Power System State Estimation"; IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 24, No. 2, Maio 2009, pp. 806-813.

[ABU04] A. Abur; A. G. Expósito; "Power System State Estimation – Theory and Implementation"; CRC Press, Marcel Dekker, Inc., 2004.

[ABU05] A. Abur; B. Xu; "Optimal Placement of Phasor Measurement Units for State Estimation"; Final Project Report, Power System Engineering Research Center Publication 05-58, Outubro 2005.

[AHM13] M. Ahmad; "Power system state estimation"; Norwood, MA: Artech, 2013.

[ALL82] J. J. Allemong; L. Radu; A. M. Sasson; "A Fast and Reliable State Estimation Algorithm for AEP's New Control Center"; IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 4, Abril 1982, pp. 933-944.

[ALV99] F. L. Alvarado; "Solving Power Flow Problems with a MATLAB Implementation of the Power System Applications Data Dictionary"; IEEE Proceedings of the 32nd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, HICSS-32, 1999, Vol. 3, pp. 3017, Janeiro 1999.

[BAL93] T. L. Baldwin; L. Mili; M. B. Boisen; R. Adapa; "Power System Observability with Minimal Phasor Measurement Placement"; IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No. 2, Maio 1993, pp. 707-715.

[BAT10] R. Baltensperger; A. Loosli; H. Sauvain; M. Zima; G. Andersson; R. Nuqui; "An Implementation of two Stages Hybrid State Estimation with Limited Number of PMU"; Proceedings Developments in Power System Protection (DPST), Março 2010, pp. 1-5. **[BI08]** T.S. Bi; X. H. Qin; Q. X. Yang; "A Novel Hybrid State Estimator for Including Synchronized Phasor Measurements"; Electric Power Systems Research., Vol. 78, No. 8, Agosto 2008, pp.1343-1352.

[CAR14] B. E. B. Carvalho; N. G. Bretas; "Estimação de Estado em Sistemas Elétricos de Potência: A Interpretação Geométrica Aplicada Ao Processamento De Erros Grosseiros Em Medidas"; XIII Simpósio De Especialistas Em Planejamento Da Operação E Expansão Elétrica, Abril 2014.

[CHE06] J. Chen; A. Abur; "Placement of PMU to Enable Bad Data Detection in State Estimation"; IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 21, No. 4, Novembro 2006, pp. 1608-1615.

[CHN08] F. Chen; X. Han; Z. Pan; L. Han; "State Estimation Model and Algorithm Including PMU"; Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), Abril 2008, pp. 1097-1102.

[CIG07] "Wide Area Monitoring and Control for Transmission Capability Enhancement"; Cigré Report 330, 2007.

[COU83] A. M. Leite da Silva; M. B. Do Coutto Filho; J. F. de Queiroz; "State Forecasting in Electric Power Systems"; IEE Proceedings Generation Transmission and Distribution, Vol. 130, No. 5, Setembro 1983, pp. 237-244.

[COU89] M. B. Do Coutto Filho; J. C. S. de Souza; J. M. C. Calvo Cantera; R. A. Da Silva; "Information Debugging for Real Time Power System Monitoring"; IEE Proceedings, Vol. 136, Maio 1989, pp. 145-152.

[COU99] M. B. Do Coutto Filho; J. C. S. de Souza; R. S. G. Matos; M. Th. Schilling; "*Strategies for Preserving Data Redundancy in Power System State Estimation*"; 13th Power Systems Computation Conference Proceedings, Trodhein, Norway, Julho 1999.

[COU01a] M. B. Do Coutto Filho; J. C. S. de Souza; R. S. G. Matos; M. Th. Schilling; "Revealing Gross Errors in Critical Measurements and Sets Via Forecasting-aided State Estimators"; Electric Power Systems Research, Vol. 57, No. 1, Janeiro 2001, pp. 25-32. **[COU01b]** M. B. Do Coutto Filho; J. C. S. de Souza; F. M. F. Oliveira; M. Th. Schilling; "Identifying Critical Measurements and Sets for Power System State Estimation"; IEEE Porto Power Tech Conference, Setembro 2001.

[COU07] M. B. Do Coutto Filho; J. C. S. de Souza; M. Th. Schilling; "Handling Critical Data and Observability"; Electric Power Components and Systems, Vol. 35, No. 5, Maio 2007, pp. 553-573.

[COU09a] M. B. Do Coutto Filho; J. C. S. de Souza; "Forecasting-Aided State Estimation – Part I: Panorama"; IEEE Transactions on Power Systems, Vol.24, No.4, Novembro 2009, pp. 1667-1677.

[COU09b] M. B. Do Coutto Filho; J. C. S. de Souza; R. S. Freund; "Forecasting-Aided State Estimation-part II: implementation"; IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 24, No. 4, Novembro 2009, pp. 1678–1685.

[COU13] M. B. Do Coutto Filho; J. C. S. de Souza; J. E. Villavicencio Tafur; "Quantifying Observability in State Estimation"; IEEE Transactions on Power Systems Vol. 28, No. 3, Agosto 2013, pp. 2897-2906.

[DEC08] I. C. Decker; D. Dotta; M. N. Agostini et al.; "Installation and Monitoring Experiences of the First Synchronized Measurement System in the Brazilian National Grid"; IEEE Power and Energy Society Transmission and Distribution Conference, Bogotá, Colombia, 2008.

[DEC09] I. C. Decker; M. N. Agostini; B. T. Meyer et al.; "Estudo e Avaliação do Desempenho de um Protótipo de Sistema de Medição Fasorial Sincronizada Instalado no Sistema de Transmissão da Eletrosul"; XX SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Recife, 2009.

[DEN02] G. B. Denegri; M. Invernizzi; F. Milano; "A Security Oriented Approach to PMU Positioning for Advanced Monitoring of a Transmission Grid"; Power System Technology Proceedings, Outubro 2002, Vol. 2, pp. 798-803.

[DOT06] I. C. Decker; D. Dotta; M. N. Agostini; S. L. Zimath; A. S. e Silva; "Performance of a Synchronized Phasor Measurements System in the Brazilian Power System"; Power Systems Conference and Exposition (PSCE 2006), Outubro 2006, pp 150.

[DU14] J. Du; S. Ma; Y. C. Wu; H. V. Poor; "Distributed Hybrid Power State Estimation Under PMU Sampling Phase Errors"; IEEE Transactions On Signal Processing, Vol. 62, No. 16, Agosto , 2014.

[DUA11] D. Duan; L. Yang; L. L. Scharf; "Phasor State Estimation from PMU Measurements with Bad Data"; IEEE 4th International Workshop on Computational Advances in Multi-Sensor Adaptative Processing (CAMSAP), 2011.

[EXP11] A. G. Exposito; A. Abur; P. Rousseaux; A. de la V. Jaén; C. G. Quiles; "On the use of PMU in Power System State Estimation"; Proc. of 17th Power Systems Computation Conference (PSCC), Artigo #211, Suécia, Agosto 2011.

[FAL91] D. M. Falcão; U. H. Bezerra; "Power System Operating State Forecasting for Security Analysis and Applications"; Electric Power & Energy Systems, Vol. 13, No. 6, Dezembro 1991, pp.330–336.

[GEL14] N. Gellerman; P. Ranganathan; R. Vallakati; A. Mukherjee; "User Interface for Situational Awareness of openPDC"; North American Power Symposium (NAPS), 2014, pp. 1-6.

[GIB11] B. P. Gibs; "Advanced Kalman Filtering, Least-Squares and Modeling: a Practical Handbook"; Hoboken, 2011.

[GOL13] M. Gol; A. Abur; "Observability and Criticality Analyses for Power Systems Measured by Phasor Measurements"; IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 28, No. 3, Agosto 2013, pp.3319-3326.

[GOL14] M. Gol; A. Abur; "A Hybrid State Estimator For Systems With Limited Number of PMUs"; IEEE Transactions On Power Systems, Julho 2014, pp. 1-7.

[GRA94] J. J. Grainger; W. D. Stevenson Jr.; "Power System Analysis"; McGraw-Hill, Inc., 1994.

[IEE06] IEEE Power Engineering Society; "IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems"; IEEE C37.118-2005, Março 2006.

[HUA04] S. J. Huang; J. M. Lin; "Enhancement of Anomalous Data Mining in Power System Predicting-Aided State Estimation"; IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 1, Fevereiro 2004, pp. 610–619.

[HUA12] Y. F. Huang; S. Werner; J. Huang; N. Kashyap; V. Gupta; "State Estimation in Electric Power Grids: Meeting New Challenges Presented by the Requirements of the Future Grid"; IEEE Signal Processing Magazine, Vol. 29, No. 5, Setembro 2012, pp. 33-43.

[KAS14] N. Kashyap; S. Werner; Y. F. Huang; T. Riihonen; "Power System State Estimation Under Incomplete PMU Observability—A Reduced-Order Approach"; IEEE Journal Of Selected Topics In Signal Processing, Vol. 8, No. 6, Dezembro 2014, pp. 1051-1062.

[KEZ10] M. Kezunovic, C. Zheng; C. Pang; "Merging PMU, Operational, and Nonoperational Data for Interpreting Alarms, Locating Faults and Preventing Cascades"; Proceedings of the 43rd Hawaii International Conference on System Sciences – 2010.

[KOL14] I. Kolosok; E. Korkina; A. Paltsev; R.Zaika; "Genetic Algorithms for Bad Data Detection at Decomposition of State Estimation Problem" ENERGYCON 2014, pp. 400-406.

[KOR11] G. N. Korres; N. M. Manousakis; "State Estimation and Bad Data Processing for Systems Including PMU and SCADA Measurements"; Electric Power Systems Research, #81, Março 2011, pp. 1514-1524.

[KOR12] G. N. Korres; N. M. Manousakis; "State Estimation and Observability Analysis for Phasor Measurement Unit Measured Systems"; IET Generation, Transmission and Distribution., Vol. 6, No. 9, Setembro 2012, pp. 902–913.

[LIR10] R. Lira; "Influência dos Canais de Instrumentação na Exatidão da Medição Fasorial Sincronizada"; Dissertação de Mestrado, Florianópolis – UFSC, 2010.
[MAZ10] K. Mazlumi; H. Vahedi; S. M. Ezzati; "Optimal Placement of PMU in Power System Using Heuristic Algorithms and Mixed Integer Non Linear Programming Methods"; Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology, Maio 2010, pp. 805-809.

[MEL06] A. P. Meliopoulos; F. Galvan; B. Fardanesh; "GPS-Synchronized Data Acquisition: Technology Assessment and Research Issues"; Proceedings of the 39th Hawaii International Conference on System Sciences, Hawaii, USA,2006.

[MEL07] A. P. Meliopoulos; V. Madani; D. Novosel et al.; "Synchrophasor Measurement Accuracy Characterization"; North American Synchrophasor Iniciative (NASPI), 2007.

[MON99] A. Monticelli; "State Estimation in Electric Power Systems – A Generalized Approach"; Kluwer Academic Publishers, Boston, 1999.

[MOR08] R. M. De Moraes; H. A. R. Volskis; "Challenges for Large-Scale PMU Application for the Brazilian Interconnected Power System"; Monitoring of Power System Dynamics Performance, Saint Petersburg, 2008.

[MOR09] R. M. De Moraes; "Sincrofasores em Sistemas de Potência: Aplicação na Estimação de Estado"; Tese Doutorado Instituto de Computação da Universidade Federal Fluminense, Outubro 2009.

[MOT10] W. M. Motta Jr.; "Utilização de Pseudomedidas em Benefício da Estimação de Estado em Sistemas de Potência"; Dissertação de Mestrado Instituto de Computação da Universidade Federal Fluminense, Junho 2010.

[MUR13] V. Murugesan; "Error Detection and Error Correction for PMU Data as Applied to Power System State Estimators"; Dissertação Mestrado Universidade do Estado do Arizona, Dezembro 2013.

[OPE10] WWW.openPDC.codeplex.com; visitado em março de 2015.

[PHA86] A. G. Phadke; et al.; "State Estimation with Phasor Measurements"; IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRS-1, Fevereiro 1986, pp. 233-241.

[PHA02] A. G. Phadke; "Synchronized Phasor Measurements ~ A Historical Overview"; Proceedings of the Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia/Pacific, Vol. 1, Outubro 2002, pp. 476-479.

[PHA08] A. G. Phadke; J. S. Thorp;"Synchronized Phasor Measurements and Their Applications"; Springer, 2008.

[PSE06] J. Zhu; A. Abur; M. J. Rice; G. T. Heidt; S. Meliopoulos; "Enhanced State Estimators"; Power Systems Engineering Research Center (PSERC), Final Project Report, Publication 06-45, Novembro 2006.

[SCH70] F. C. Schweppe; J. Wildes; D. B. Rom; "Power System Static-State Estimation, Part I: Exact Model, Part II: Approximate Model, Part III: Implementation"; IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-89, No. 1, Janeiro 1970, pp. 120-135.

[SIM11] A. S. Costa; A. Albuquerque; "A Two-Stage Orthogonal Estimator to Incorporate Phasor Measurements into Power System Real-Time Modeling"; Proceedings of 17th Power Systems Computation Conference (PSCC), Agosto 2011, Artigo #455.

[SIM12] A. S. Costa; A. Albuquerque; "Tratamento de Erros Grosseiros em Estimadores de Estado Híbridos Multi-Estágios com Capacidade de Processamento de Medidas Fasoriais"; XII Simpósio De Especialistas Em Planejamento Da Operação E Expansão Elétrica (SEPOPE), Maio 2012, Artigo #155.

[SIM13] A. S. Costa; A. Albuquerque; D. Bez; "An Estimation Fusion Method for Including Phasor Measurements into Power System Real-Time Modeling"; IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 28, No. 2, Maio 2013, pp. 1910–1920.

[TAR12] A. Tarali; "Bad Data Detection in two Stage Estimation using Phasor Measurements"; Electrical and Computer Engineering Master's Theses, Northeastern Univesity, Agosto 2012.

[THO85] J. S. Thorp; A. G. Phadke; K. J. Karimi; "Real Time Voltage-Phasor Measurements for Static State Estimation"; IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 11, pp. 3098-3106, Novembro 1985.

[VAL11] G. Valverde; S. Chakrabarti; E. Kiriakides; V. Terzija; "A Constrained Formulation for Hybrid State Estimation"; IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 26, No. 3, pp. 1102-1109, Agosto 2011.

[YAN11] T. Yang; H. Sun; A. Bose; "Transition to a Two-Level Linear State Estimator-Part I: Architecture, Part II: Algorithm"; IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 26, No. 1, pp. 46-62, Fevereiro 2011.

[ZH06] H. Zhao; "A New State Estimation Model Utilizing PMU Measurements"; International Conference on Power System Technology, 2006.

[ZHA05] L. Zhao; A. Abur; "Multiarea State Estimation Using Synchronized Phasor Measurements"; IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 20, No.2, Maio 2005, pp. 611-617.

[ZHN13] Q. Zhang; Y. Chakhchoukh; V. Vital; G.T. Heydt; N. Logic; S. Sturgill; "Impact of PMU Measurement Buffer Length on State Estimation and its Optimization"; IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 28, No. 2, Maio 2013, pp. 1657–1665.

[ZHO06] M. Zhou; V. A. Centeno; J. S. Thorp; A. G. Phadke; "An Alternative for Including Phasor Measurements in State Estimators"; IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 21, No. 4, Novembro 2006, pp. 1930-1937.

[ZHU07] J. Zhu; A. Abur; "Effect of Phasor Measurements on the Choice of Reference Bus for State Estimation"; IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, FL, USA, Junho 2007.

[ZHU10] J. Zhu; A. Abur; "Improvements in Network Parameter Error Identification via Synchronized Phasors"; IEEE Transactions on Power Systems, Vol.25, No. 1, Fevereiro 2010, pp. 44–50.

[ZIV96] R. Zivanovic; C. Cairns; "Implementation of PMU Technology in State Estimation: an Overview"; IEEE Transactions on Power Systems, Junho 1996, pp. 1006-1011.

[BOS87] A. Bose; K. A. Clements; "Real-Time Modeling of Power Network"; Proceedings of the IEEE, Vol.75, No. 12, pp. 1607-1622, Dezembro 1987.

[CHA09] S. Chakrabarti; E. Kyriakides; "PMU Measurement Uncertainty Considerations in WLS State Estimation"; IEEE Transactions on Power Systems, Vol.24, No.2, Maio 2009,pp. 1062-1071.

[DEP04] J. Depablos; V. Centeno; A. G. Phadke; M. Ingram; "Comparative Testing of Synchronized Phasor Measurement Units"; Power Engineering Society General Meeting, 2004, Vol. 1, pp. 948-954.

[EHR03] J. G. Ehrensperger; "Sistemas de Medição Fasorial: Estudo e Análise do Estado da Arte" Relatório Técnico Interno LabPlan RT 01/2003.

[EXP09] A. G. Exposito; A. de la V. Jaen; "Two Level State Estimation With Local Measurement Pre-Processing"; IEEE Transactions on Power Systems, Vol.24, No.2, Maio 2009, pp. 676-684.

[IEE06] IEEE Power Engineering Society; "IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems"; IEEE C37.118-2005, Março 2006.

[HAU05] J. F. Hauer; W. A. Mittelstadt; K. E. Martin et al.; "Integrated Monitor Facilities for the Western Power System: WAMS Analysis in 2005"; Annual report of the WECC Disturbance Monitoring Work Group, 2005.

[KOL02] A. Z. Gamm; I. N. Kolosok; "Test Equations and Their Use for State Estimation of Electric Power System"; Power and Electrical Engineering: Scientific Proc. of Riga Technical University. Riga: RTU, 2002, pp. 99-105.

[KOL14] I. Kolosok; E. Korkina; A. Paltsev; R.Zaika; "Genetic Algorithms for Bad Data Detection at Decomposition of State Estimation Problem" ENERGYCON 2014, pp. 400-406.

[LEI10] R. da C. Leites; A. S. Costa; Antônio Simões; "Um Estimador de Estado Ortogonal com capacidade para Processar Medidas Fasoriais de tensão e Corrente"; Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos 2010.

[MON83] A. Monticelli; A. Garcia; "Reliable Bad Data Processing for Real-Time State Estimation"; IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS 102, Maio 1983.

[MRI05] R. L. V. Marini; "Uso de Medição Fasorial Sincronizada Visando Melhoria da Estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência"; Dissertação de Mestrado da CPGEE da UFSC, 2005.

[PHA77] A. G. Phadke; M. Ibrahim; T. Hlibka; "Fundamental Basis for Distance Relaying with Symmetrical Components"; IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-96, No. 2, Março/Abril 1977, pp. 635-646.

[PHA79] A. G. Phadke; M. Ibrahim; T. Hlibka; M. G. Adamiak; "A Microcomputer Based Symmetrical Component Distance Relay"; Power Industry Computer Applications Conference 1979, pp. 47-55.

[PHA06] A. G. Phadke; J. S. Thorp; "History and Applications of Phasor Measurements"; Power Systems Conference and Exposition, 2006. PSCE '06. 2006 IEEE, pp. 331-335.

[PHA09] A. G. Phadke; J. S. Thorp; R. F. Nuqui; M. Zhou; "Recent Developments in State Estimation with Phasor Measurements"; Power Systems Conference and Exposition, 2009, pp.1-7.

[SCL08] SCILAB; "The Scilab Consortium"; Julho 2008. http://www.scilab.org/

[SCT05] Schweitzer Engineering Laboratories Incorporation; "Data Sheet of Measurement SEL-734"; 2005, pp. 3.

[MAR12] M. A. R. Guimaraens; M. B. Do Coutto Filho; J. C. S. de Souza; "Utilização de Sincrofasores para Monitoramento do Estado Operativo de Sistemas de Potência"; XII Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, Maio 2012, artigo 63.

[MAR14A] M. A. R. Guimaraens; M. B. Do Coutto Filho; J. C. S. de Souza; "Aperfeiçoamento de Estimadores de Estado através de Medidas de Sincrofasores"; XIII Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, Abril 2014.

[MAR14B] M. A. R. Guimaraens; M. B. Do Coutto Filho; J. C. S. de Souza; "Enhanced Bad Data Processing by Phasor-Aided State Estimation"; IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, pp. 2200 a 2209, Setembro 2014. Obtenção da Matriz de Covariância do Estado - Estimador MQP

Seja o modelo de medida:

 $z = h(x) + \varepsilon$

 $\varepsilon \sim N(0,R)$

A obtenção de x por empregando-se o Estimador MQP é dada por: $minJ(x) = [z - h(x)]^T R^{-1} [z - h(x)]$

Cuja solução iterativa para o modelo não linear é dada por:

 $G(x^k)\Delta x^k = H(x^k)^T R^{-1} [z - h(x^k)]$

Considerando-se que ao final do processo iterativo $\lim_{x^k \to x} |x^k - \hat{x}| \to 0$

Onde \hat{x} é o estado do sistema.

Tem-se que:

 $\Delta x^{k} = G(x^{k})^{-1} H(x^{k})^{T} R^{-1} [z - h(x^{k})]$ Substituindo-se $[z - h(\hat{x})] \cong \varepsilon$ $\Delta x^{k} = G(x^{k})^{-1} H(x^{k})^{T} R^{-1} \varepsilon$ Portanto: $E\{\mathbf{\Delta}x^k\} = E\{G(x^k)^{-1}H(x^k)^T R^{-1}\varepsilon\}$ $E\{\Delta x^k\} = G(x^k)^{-1}H(x^k)^T R^{-1}E\{\varepsilon\}$ $E\{\Delta x^k\} = 0$, pois $\varepsilon \sim N(0,R)$.

Adicionalmente, tem-se que :

$$\begin{aligned} Var\{\Delta x^{k}\} &= E\{\Delta x^{k}[\Delta x^{k}]^{T}\} \\ &E\{\Delta x^{k}[\Delta x^{k}]^{T}\} = E\{G(x^{k})^{-1}H(x^{k})^{T}R^{-1}\varepsilon[G(x^{k})^{-1}R^{-1}^{T}R^{-1}\varepsilon]^{T}\} \\ &E\{\Delta x^{k}[\Delta x^{k}]^{T}\} = E\{G(x^{k})^{-1}H(x^{k})^{T}R^{-1}\varepsilon[\varepsilon]^{T}[R^{-1}]^{T}H(x^{k})[G(x^{k})^{-1}]^{T}\} \end{aligned}$$

 $E\{\Delta x^k[\Delta x^k]^T\} = G(x^k)^{-1}H(x^k)^TR^{-1}E\{\varepsilon\varepsilon^T\}[R^{-1}]^TH(x^k)[G(x^k)^{-1}]^T$

Como $E\{ss^{T}\} = R$ tem-se, portanto: $E\{\Delta x^{k}[\Delta x^{k}]^{T}\} = G(x^{k})^{-1}H(x^{k})^{T}R^{-1}R[R^{-1}]^{T}H(x^{k})[G(x^{k})^{-1}]^{T}$ $E\{\Delta x^{k}[\Delta x^{k}]^{T}\} = G(x^{k})^{-1}H(x^{k})^{T}R^{-1}H(x^{k})[G(x^{k})^{-1}]^{T}$ $E\{\Delta x^{k}[\Delta x^{k}]^{T}\} = G(x^{k})^{-1}G(x^{k})[G(x^{k})^{-1}]^{T}$ $E\{\Delta x^{k}[\Delta x^{k}]^{T}\} = G(x^{k})^{-1}G(x^{k})[G(x^{k})^{-1}]^{T}$

Como $\left[G(x^k)^{-1}\right]^T = \left[G(x^k)^T\right]^{-1} e^{-G(x^k)}$ é simétrica, portanto:

 $Var{\Delta x^{k}} = G(x^{k})^{-1}$ O que leva a concluir que: $\Delta x^{k} \sim N(0, G(x^{k})^{-1})$ Ou considerando que $\lim_{x^{k} \to x} |x^{k} - \hat{x}| \to 0$: $\hat{x} = x^{k} + \Delta x^{k}$ $\hat{x} \sim N(x^{k}, G(x^{k})^{-1})$

Assim explica-se a dependência do Estado em relação à inversa da matriz G do processo de estimação do estado.

APÊNDICE C

EGs em medidas de UMFs

O Departamento de Energia dos Estados Unidos no verão de 2003 desenvolveu o projeto "Eastern Interconnection Phasor Project" (EIPP) com o objetivo de implementar um canal de comunicação específico com a então nova tecnologia (PMU) capaz de atualizar dados de 10 a 60 vezes por segundo, que inundaria o sistema de comunicação do então atual sistema SCADA se fosse compartilhado. Medidas SCADA têm sua função de coleta de informações com o objetivo de monitorar o regime permanente do SE enquanto a PMU apesar de poder monitorar o regime permanente também pode monitorar as características dinâmicas do SE, isto é, um canal de comunicação diferenciado se faz necessário.

Este sistema separado de comunicação foi denominado como Sistema de Medição Fasorial Sincronizada (Synchronized Phasor Measurement System – SPMS) segundo **[DEC09]**. Esta tecnologia utiliza avanços nas comunicações, tais como: rede alta capacidade de processamento e armazenamento de dados e GPS.

Este nível de quantidade e velocidade de transmissão de dados deixa bem claro a grande utilizadas das medições Fasoriais, porém como elas estão e estarão disponíveis para fornecerem informações precisas do sistema, certamente é possível adequá-las para a utilização desta informação no processo de EE enquanto esta nova tecnologia não é instalada em todo o SEE.

No Brasil, a Universidade Federal de Santa Catarina iniciou os estudos de uma SPMS em 2003 com o início do Projeto MedFasee, o qual teve, em sua primeira fase, três medições fasoriais instaladas em Porto Alegre, Florianópolis e Curitiba através da internet a um Concentrador de Dados Fasoriais (Phasor Data Concentrator - PDC). Desde então diversos projetos tais como MedFasee Eletrosul e MedFasee CTEEP instalaram várias PMUs em diversas localidades **[LIR10]**.

O Operador Nacional do Sistema (ONS) desenvolve também, desde 2009, projetos relacionados à tecnologia SPMS com o objetivo de registro adequado e seguro do desempenho dinâmico bem como melhorias no processo de EE. Este novo canal de comunicação está sendo concebido separadamente, justamente pelo fato do sistema SCADA não ser capaz de atender os requisitos em tempo real necessários a tomada de decisões sobre condições dinâmicas anormais do sistema, um dos objetivos do uso de PMUs no SEE [MOR08].

Nesta seção serão apresentados alguns erros oriundos das medições fasoriais e também analisado se é possível que estes erros influenciem na adequação destes dados para o processo de EE.

B.1 Erros de Desempenho de PMUs

O desempenho da PMU é diferente de acordo com seu fabricante, o uso de diferentes tecnologias precisa ser verificado, pois a exatidão do equipamento segue algoritmos específicos no fornecimento dos fasores mensurados de acordo com a utilização designada pelo fabricante, bem como efeitos de filtros analógicos e digitais utilizados específicos [LIR10]. Outra diferença na exatidão dos dados mensurados, utilizando-se diversos fabricantes, é a tecnologia utilizada no processo de sincronização da medida de cada fabricante. A diferença nesta tecnologia pode levar até 47 milissegundos de diferença. Segundo Meliopoulos, o mesmo teste realizado com equipamentos do mesmo fabricante não apresentava nem de perto a mesma magnitude de diferença, podendo inclusive ser considerada irrelevante [MEL06, MEL07]. Uma observação importante atestada nos estudos de [LIR10] foi a detecção de que PMUs estavam sendo instaladas em Tem de classe diferentes às classe normalizadas para o objetivo da medição fasorial e a instalação de múltiplos equipamentos em paralelo, como numa sobrecarga ao TI em questão. Ao não observar tais detalhes técnicos aumenta-se a exatidão de uma PMU em até 5%.

Outra possibilidade seria erro de fase entre as medidas oriunda de PMUs diferentes, pois são dependentes de mecanismo de sincronização compartilhado, entretanto esforços do Departamento de Energia dos Estados Unidos em conjunto com North American Electric Reliability Corporation mostraram que erros de fase entre medidas de PMU oriunda de diferentes unidades são principalmente devido aos instrumentos individuais de obtenção do sinal do sistema elétrico [DU14], logo é uma presunção razoável serem independentes.

B.2 Erros de Desempenho de PDCs

Os PDCs atuais têm seu projeto e arquitetura particulares a seu fabricante, para que desempenhem suas funcionalidades corretamente o **[IEE06]** especifica alguns requisitos básicos de desempenho tais como: Alto desempenho computacional (tempo real); Sistema eficiente para armazenamento de dados; confiabilidade; disponibilidade; capacidade de comunicação; modularidade; expansibilidade; atendimento a diversidade de aplicações; interface padronizada e equipamento dedicado. Existe um projeto de fonte aberta, o openPDC da empresa TVA, como uma tentativa de padronização do software operacional do equipamento **[OPE10]**. O Software, atualmente, está em sua versão 2.1 e tem sido utilizado na literatura para muitos experimentos, como é o exemplo de **[GEL14]** que utiliza uma interface com tecnologia SMS, email e GoogleMaps.

B.3 Erros no canal de comunicação

Este canal é considerado crítico, pois é responsável pela comunicação entre PMU e PDC, pode ser de qualquer natureza desde que atendam aos requisitos do objetivo da SPMS conforme **[IEE06]**. A largura da banda não se faz crítica, mas o protocolo de comunicação sim, pois de acordo com o objetivo do uso de PMU os 200ms de atraso de um protocolo TCP/IP podem ser ou não toleráveis **[CIG07]**, o monitoramento dinâmico do sistema, por exemplo, já não poderia aceitar tais dimensões.

A perda de informações tem sido estudada por **[DEC08]**, mas redundância na comunicação pode suprir estas deficiências, além do uso de canais dedicados, cujo desempenho apresentou-se significativamente maior do que a internet por exemplo. Demonstrou-se também, em seus estudos, que apenas 0,05% dos dados foram perdidos.

Em seu trabalho, Kezunovic mostra um sistema capaz de utilizar dados oriundos de SPMSs (PMUs), do sistema SCADA e de IEDs (Intelligent Electronic Devices) tais como relés de proteção digital, monitores de disjuntores, gravadores digitais de faltas, monitores de qualidade e até UTRs. Cada equipamento mencionado possui um propósito distinto e, por conseguinte necessidades técnicas diferentes, mas podem, dependendo destas especificações, ou não compartilhar tecnologias de comunicação. O autor deixa claro que o sistema SCADA não precisa dos mesmos

106

requisitos das PMUs e IEDs, sendo considerados como equipamentos com necessidades distintas **[KEZ10]**, portanto é uma presunção razoável a utilização de canais distintos. Esta presunção tem sido verificada nos EUA, Brasil e China, por exemplo, segundo **[LIR10]**. A presunção de canais distintos então torna a coleta de informações entre PMUs e medidas SCADA como sendo independentes tornando a possibilidades de erros simultâneos reduzidas.

Após análise das possíveis falhas oriundas de um SPMS, pode-se observar que todas as fontes de falha podem ser removidas se devidamente compensadas, como redundâncias nos canais de comunicação, atenção para especificações técnicas de TIs, uso do mesmo equipamento no sistema ou compatibilização dos instrumentos de fabricantes diferentes. Entretanto no que tange informações para o processo de EE pode-se verificar claramente que o volume de dados disponíveis pode ser usado a favor de um trabalho estatístico do dado desejado conforme técnicas implementadas por **[KOL14]** e **[CAR14]**.

No próximo capítulo, serão apresentados alguns resultados onde há a ocorrência de EG nas medidas convencionais ou nas medidas fasoriais dos sistemas de medição, de forma a verificar a capacidade de detecção e identificação das medidas portadoras de tais erros pelo procedimento proposto. Este será comparado com o procedimento usual combinatório descrito no Capítulo 2 e para tal, serão utilizados os sistemas IEEE 14, 30 e 118 barras.

Resultados de simulações com erros simultâneos de medidas SCADA e fasoriais (ocorrência extrema e altamente improvável devido ao fato dos canais de comunicação dos sistemas serem independentes) também serão mostrados no próximo capítulo, bem como medições do custo computacional do procedimento proposto em comparação ao modelo combinatório usual.

Para efeito obtenção de um valor final para o estado estimado, também será mostrado no capítulo seguinte, o estado estimado de três formas diferentes (média aritmética, média ponderada e fusão de dados) com o objetivo de mostrar os benefícios do procedimento PHASE proposto.