

ELIZANDRA PEREIRA ROQUE COELHO

**PROCESSAMENTO SIMULTÂNEO DE ERROS NA
ESTIMAÇÃO DE ESTADOS GENERALIZADA**

CURITIBA

2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**PROCESSAMENTO SIMULTÂNEO DE ERROS NA
ESTIMAÇÃO DE ESTADOS GENERALIZADA**

ELIZANDRA PEREIRA ROQUE COELHO

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica PPGEE, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Elizete Maria Lourenço

CURITIBA

2012

C672p

Coelho, Elizandra Pereira Roque

Processamento simultâneo de erros na estimação de estados generalizada [manuscrito] / Elizandra Pereira Roque Coelho. – Curitiba, 2012.

117f. : il. [algumas color.] ; 30 cm.

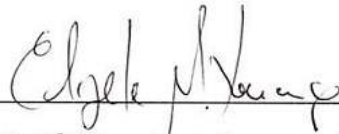
Impresso.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, 2012.

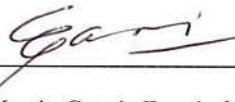
**PROCESSAMENTO SIMULTÂNEO DE ERROS NA ESTIMAÇÃO DE
ESTADOS GENERALIZADA**

ELIZANDRA PEREIRA ROQUE COELHO

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná.

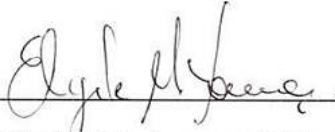


Prof.^a Elizete Maria Lourenço, D.Eng.
Orientadora



Prof. Evelio Martín García Fernández, D.Eng.
Coordenador do Programa de Pós- Graduação em Engenharia

Banca Examinadora



Prof.^a Elizete Maria Lourenço, D.Eng. (UFPR)
Presidente



Prof.^a Thelma Solange Piazza Fernandes, D.Eng. (UFPR)



Prof. Clodomiro Unsuhay-Vila, D.Eng. (UFPR)



Prof. João Bosco Augusto London Junior, D.Eng. (EESC-USP)

Curitiba, 28 de fevereiro de 2012

Aos meus pais e aos meus irmãos, amores incondicionais. E ao meu esposo, companheiro de todas as horas.

AGRADECIMENTOS

É impossível concluir uma jornada sozinha, por isso, agradeço a professora Elizete Maria Lourenço, por sua orientação acadêmica e pessoal durante esses dois anos, e por seu apoio e dedicação que foram fundamentais para a realização desse trabalho.

Agradeço a professora Thelma por suas palavras de incentivo e por sua contribuição para melhorias deste trabalho. Ao professor Clodomiro pelo incentivo e colaboração. Ao professor João Bosco por ter aceitado participar da banca de defesa e por suas palavras de engrandecimento e agregação à finalização desta pesquisa.

Agradeço aos meus pais por todo o apoio e incentivo a buscar sempre mais, aos meus irmãos por sua admiração e confiança, ao meu esposo, fiel companheiro de todas as horas, por acreditar e incentivar-me a todo instante.

Agradeço aos amigos que torceram por mim e me deram apoio nos momentos em que precisei.

A Capes pelo apoio financeiro para a realização da pesquisa.

Por fim, e mais importante agradeço a Deus, pelo dom da vida e por me dar forças e sabedoria nos momentos de dificuldade, permitindo que a jornada fosse cumprida.

“Qualquer coisa que você possa fazer ou sonhar, você pode começar. A coragem contém em si mesma, o poder, o gênio e a magia.”

Goethe

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	ii
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	x
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Objetivos	16
1.2. Revisão Bibliográfica	17
1.2.1. <i>Estimação de Estados Generalizada</i>	17
1.2.2. <i>Identificação de Erros Grosseiros em Medidas</i>	18
1.2.3. <i>Identificação de erros de Topologia</i>	20
1.2.4. <i>Identificação de Erros de Topologia e Erros Grosseiros em Medidas</i>	22
1.2.5. <i>Medição Fasorial na Estimação de Estados</i>	23
1.3. Contribuições deste Trabalho	24
1.4. Estrutura da Dissertação	25
2. ESTIMAÇÃO DE ESTADOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA.....	26
2.1. Introdução.....	26
2.2. Modelagem do Estimador de Estados	27
2.2.1. <i>Estimação de Estados pelo Método dos Mínimos Quadrados Ponderados</i>	28
2.2.2. <i>Equação Normal de Gauss Aplicada a Solução de EESP</i>	29
2.3. Estimação de Estados Generalizada	30
2.3.1. <i>Modelagem de Ramos com Impedância Nula</i>	30
2.4. Formulação EEG como um problema de Otimização Restrito	32
2.4.1. <i>Restrições Operacionais</i>	32
2.4.2. <i>Restrições Estruturais</i>	33
2.4.3. <i>Modelagem das Medidas Analógicas</i>	33
2.4.4. <i>Formulação da Estimação de Estados Restrita</i>	33
2.4.5. <i>Solução EEG via Método Tableau Esparso</i>	34
2.5. Multiplicadores de Lagrange Normalizados	36
2.6. Criticidade em Medidas e Conjuntos Críticos	37

2.7.	Estimação de Estados Generalizada Restrita com Informações <i>A Priori</i>	38
2.7.1.	<i>Avaliação do Impacto da inclusão das informações a priori no processo de EEG</i>	40
2.8.	Estimador de Estados Generalizado Considerando o Modelo Linear da Rede.....	41
2.9.	Plataforma para Estudos da Estimação de Estado Generalizada.....	44
2.10.	Considerações Finais do Capítulo.....	46
3.	UNIDADES DE MEDIÇÃO FASORIAL NA ESTIMAÇÃO DE ESTADOS.....	47
3.1.	Introdução.....	47
3.2.	Unidades de Medição Fasorial.....	48
3.3.	Tendências de Implementação das PMUs na EE.....	50
3.3.1.	<i>Considerações sobre as Tendências Apresentadas</i>	52
3.4.	Formas de Incorporação das Medidas Sincrofasoriais na Formulação da EEG.....	53
3.4.1.	<i>Incorporação Conjunta às Medidas Tradicionais</i>	54
3.4.2.	<i>Medidas Sincrofasoriais como potência complexa na EEG</i>	60
3.5.	Considerações Finais do Capítulo.....	61
4.	PROCESSAMENTO SIMULTÂNEO DE ERROS NA ESTIMAÇÃO DE ESTADOS GENERALIZADA.....	63
4.1.	Introdução.....	63
4.2.	Multiplicadores de Lagrange Normalizados na Detecção de Erros e na Determinação das Informações Suspeitas.....	64
4.3.	Teste Geométrico.....	65
4.3.1.	<i>Formulação para erro simples</i>	66
4.4.	Processamento de Erros Simultâneo via teste Geométrico.....	70
4.4.1.	<i>Confirmação do Conjunto dos Suspeitos (1ºestágio)</i>	71
4.4.2.	<i>Verificação da Natureza do Erro (2ºestágio)</i>	72
4.4.3.	<i>Verificações das Informações Errôneas a Partir de Sua Natureza (3ºestágio)</i>	73
4.5.	Algoritmo Implementado (EEG).....	74
4.6.	Considerações Finais do Capítulo.....	79
5.	SIMULAÇÕES E RESULTADOS.....	80
5.1.	Sistema Teste 24 barras.....	80
5.1.1.	<i>Caso A</i>	81
	<i>Erros de topologia</i>	81
	<i>Erros em medidas</i>	82
	<i>Presença Simultânea de Erros</i>	83
5.1.2.	<i>Resultados: Caso A</i>	83
5.1.3.	<i>Análise presença de PMUs no Processamento Simultâneo de Erros</i>	88
5.1.4.	<i>Caso B</i>	88

<i>Erros de topologia</i>	89
<i>Erros em medidas</i>	89
<i>Presença Simultânea de Erros</i>	90
5.1.5. <i>Resultados: Caso B</i>	91
5.1.6. <i>Análise presença de PMUs no Processamento Simultâneo de Erros</i>	95
5.2. Sistema de 30 barras do IEEE	95
<i>Erros de Topologia</i>	97
<i>Erros em medidas</i>	98
<i>Presença Simultânea de Erros</i>	98
5.2.1. <i>Resultados Sistema teste 30 barras</i>	99
5.3. <i>Análise casos A e B: Informações A Priori</i>	103
5.4. <i>Considerações Finais do Capítulo</i>	104
6. CONCLUSÕES FINAIS	106
6.1. <i>Sugestões para Trabalhos Futuros</i>	107
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
APÊNDICES	114
A. <i>Informações a priori no Problema de Estimação Restrita</i>	114
A.1. <i>Cálculo dos valores da matriz P</i>	114
A.2. <i>Conclusões</i>	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1: Condições operacionais para as simulações de erros de topologia Caso A ..	82
Tabela 5.2: Erros em medidas simulados para o Caso A.....	82
Tabela 5.3: Resultados dos disjuntores suspeitos selecionados no primeiro estágio para o caso A	83
Tabela 5.4: Resultados para o segundo estágio considerando apenas erros de topologia para o Caso A.....	84
Tabela 5.5: Resultados para o segundo estágio considerando apenas erros em medidas para o Caso A.....	85
Tabela 5.6: Resultados para erros simultâneos simulados para o caso A	85
Tabela 5.7: Localização erro de topologia para o caso A.....	86
Tabela 5.8: Identificação das medidas errôneas para o caso A.....	86
Tabela 5. 9: Resultados do terceiro estágio para o Caso A.....	87
Tabela 5.10: MLNs das restrições operacionais com e sem PMU para o caso A considerando erro simples de topologia.....	88
Tabela 5.11: condições operacionais para as simulações de erros de topologia do Caso B.....	89
Tabela 5.12: Erros em medidas simulados para o Caso B.....	90
Tabela 5.13: Resultados dos disjuntores suspeitos selecionados no primeiro estágio para o Caso B.....	91
Tabela 5.14: Resultados para o segundo estágio considerando apenas erros de topologia para o Caso B.....	92
Tabela 5.15: Localização erro de topologia para o caso B.....	92
Tabela 5.16: Resultados para o segundo estágio considerando apenas erros em medidas para o Caso B.....	93
Tabela 5. 17: Resultados para erros simultâneos simulados para o caso B.....	93
Tabela 5.18: Detecção informações topológicas errôneas para erros simultâneos simulados para o caso B.....	93
Tabela 5.19: Detecção das medidas errôneas para erros simultâneos simulados para o caso B	94

Tabela 5.20: Resultados do terceiro estágio para o caso B.....	94
Tabela 5.21: MLNs das restrições operacionais com e sem PMU para o caso B considerando erro de topologia múltiplo.....	95
Tabela 5.22: condições operacionais para as simulações de erros de topologia para CO1 e CO2.....	97
Tabela 5.23: Erros em medidas simulados para CO1 e CO2	98
Tabela 5.24: Resultados dos disjuntores suspeitos selecionados no primeiro estágio para CO1 e CO2.....	99
Tabela 5.25: Resultados para o segundo estágio considerando apenas erros de topologia.....	100
Tabela 5.26: Resultados para o segundo estágio considerando apenas erros em medidas.....	101
Tabela 5.27: Resultados para erros simultâneos simulados para os casos CO1 e CO2....	102
Tabela 5.28: Resultados do terceiro estágio para alguns casos de CO1 e CO2.....	102
Tabela 5.29: Quadro comparativo dos MLN associados erros de topologia caso A com e sem info <i>a priori</i>	103
Tabela 5.30: Quadro comparativo dos MLN associados erros de topologia caso A com e sem info <i>a priori</i>	104

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Plataforma de estudo de EEG.....	45
Figura 3.1: Arquitetura básica de uma PMU (LIRA, 2010).....	49
Figura 3.2: PMUs conectadas ao PDC (LIRA, 2010).....	49
Figura 3.3: PMU associada a programas de EE já existentes.....	51
Figura 3.4: Novo EE agregando dados do SCADA conjuntamente aos dados das PMUs...	51
Figura 3.5 : PMU como base de dados para o EE.....	52
Figura 3.6: Modelo π completo de uma LT.....	55
Figura 3.7: Conexão na rede de múltiplos canais de uma PMU.....	58
Figura 3.8: Conexão na rede de dois canais de uma PMU.....	58
Figura 3.9: Processo estimação de estados com dados de PMU.....	59
Figura 4.1: MLN dentro do subespaço vetorial gerado pelas colunas de W_s	68
Figura 4.2: MLN fora do subespaço vetorial gerado pelas colunas de W_s	68
Figura 4.3: Fluxograma do algoritmo implementado.....	78
Figura 5.1: Diagrama unifilar sistema 24 barras do IEEE.....	80
Figura 5.2: Sub-rede relevante subestações 15 e 24 (Caso A).....	81
Figura 5.3: Sub-rede relevante subestações 14 e 16 (Caso B).....	89
Figura 5.4: Diagrama unifilar sistema 30 barras do IEEE.....	96
Figura 5.5: Sub-rede relevante condição de operação 1 (CO1).....	96
Figura 5.6: Sub-rede relevante condição de operação 2 (CO2).....	97

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EEG – Estimação de Estado Generalizada

EEGSP- Estimação de Estado Generalizada do Sistema de Potência

MLN- Multiplicador de Lagrange Normalizado

MQP – Mínimos Quadrados Ponderados

PMU – *Phasor Measurement Unit*

SG – *Smart Grid*

RESUMO

A demanda cada vez maior por energia elétrica requer operações cada vez mais eficientes e seguras de monitoração e análise das condições de operação do sistema. A busca por melhorias nas ferramentas de análise do sistema de potência têm feito surgir o conceito denominado *Smart Grid* (SG), pois agrega diferentes tecnologias e vem como uma necessidade, sobretudo para que se evite o colapso nas redes de energia.

Dentre as ferramentas necessárias para se evoluir para a SG pode-se incluir a estimação de estados generalizada (EEG), que fornece um estado mais confiável da rede, evitando tomadas de decisões errôneas pelo operador. A EEG apresenta como atrativo sua capacidade de processar redes modeladas no nível de seção de barras, explicitando os ramos chaveáveis, o que garante maior eficiência no processamento de erros de topologia.

Este trabalho propõe um novo algoritmo de processamento de erros simultâneos em medidas analógicas e de topologia na EEG, que permite a modelagem direta de chaves e disjuntores. A metodologia proposta neste trabalho baseia-se no uso do teste do cosseno, resultante da interpretação geométrica dos multiplicadores de Lagrange. Na abordagem proposta um novo estágio de aplicação do teste geométrico é inserido a fim de contornar as dificuldades relacionadas à determinação da natureza do erro e à identificação do erro propriamente dito quando da presença simultânea com erros de topologia. O problema de criticidade em medidas é considerado e informações *a priori* são empregadas e avaliadas.

A inserção das unidades de medição fasorial na estimação de estados generalizada garante aumento da redundância de informações do sistema e pode auxiliar na eliminação de restrições operacionais críticas, resultando impacto direto no processamento de erros de topologia. Resultados de simulações envolvendo diferentes tipos de erros no sistema teste de 24 barras do IEEE ilustram a eficácia da nova abordagem e a relevância da inclusão de PMUs no processamento de erros da EEG.

Palavras chave: Smart Grids, estimação de estados generalizada, processamento de erros, unidade de medição fasorial

ABSTRACT

The increasing demand for electricity requires operations more efficient and reliable monitoring and analysis of system operating conditions. The search for improvements in the tools of analysis of power system have given rise to the concept called Smart Grid (SG), because it provides different technologies and comes as a necessity, especially in order to avoid the collapse in energy networks.

Among the tools necessary to progress to the SG can include generalized state estimation (GSE), which provides a more reliable network, avoiding erroneous decisions taken by the operator. The GSE shows how attractive their ability to process networks modeled on the level of section bars, indicating the switchable branches, which ensures greater efficiency in the processing of topology errors. This paper proposes a new algorithm for error handling simultaneous analog measurements and topology in the GSE, which allows direct modeling of switches and circuit breakers. The methodology proposed in this paper is based on the use of the test cosine, resulting from the geometric interpretation of Lagrange multipliers. In this approach a new stage of application of the test locus is inserted in order to circumvent the difficulties related to determining the nature of the error and the identification of the error itself when the simultaneous presence of topology errors. The problem of criticality measures is considered and information *a priori* are used and evaluated.

The insertion of phasor measurement units in the state estimation generalized increase in redundancy ensures system information and can help eliminate critical operational constraints resulting direct impact on the processing of topology errors. Results of simulations involving different types of errors are illustrated on a power network from the IEEE 24-bus system, and the relevance of including PMU in the error processing the GSE are shown.

Keywords: Smart Grids, generalized state estimator, error processing, phasor measurement unit

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

É vertiginoso o crescimento pela demanda de energia elétrica em todo o mundo, devido ao desenvolvimento tecnológico e ao crescimento econômico. Portanto, é necessário desenvolvimento de tecnologias para garantir uma geração, transmissão e distribuição de energia elétrica eficiente, de qualidade e sustentável. A operação do sistema de energia elétrica deve apresentar cada vez mais segurança e eficiência no processo de monitoração e análise das condições de operação. Conhecer o sistema e suas várias formas de operação é essencial a fim de garantir uma operação estável, mesmo sob distúrbios de diversas naturezas. É necessário, portanto que haja um bom sistema de supervisão em tempo real da rede.

Dentro do novo contexto mundial, na busca por melhorias no sistema de potência, surgem as *Smart Grids* (SG), ou redes inteligentes, compreendidas mais como um conceito do que tecnologia ou instrumento específico (FALCÃO, 2010). Tal conceito baseia-se na utilização intensa de tecnologias de automação, bem como de meios computacionais e comunicação do sistema elétrico, visando controlar e monitorar a rede.

A evolução dos sistemas atuais para o patamar, das *Smart Grids*, vem como uma necessidade, sobretudo para que se evite o colapso nas redes de energia (JAY e outros 2009). As SG apresentam inúmeras propostas, tais como: descentralizar a geração de energia, auto recuperação da rede, qualidade de energia entre outras.

A Estimação de Estados em Sistemas de Potência (EESP) desde seus primeiros estudos publicados em (SCHWEPPE, 1970), passou a exercer papel fundamental na modelagem em tempo real da rede, por ser uma ferramenta computacional capaz de determinar a melhor estimativa das variáveis de estado (magnitude e ângulo de fase da tensão nas barras do sistema) a partir de um conjunto redundante de medidas.

Os estimadores de estados foram desenvolvidos para compensar pequenos erros aleatórios das leituras das informações da rede, detectar erros de medição e complementar, por meio de estimativas, as medições que faltarem devido a falhas de comunicação (SIMÕES COSTA, 2002). Os resultados fornecidos pelo estimador de estados, dentre outras funções, são aplicados na monitoração de segurança do sistema, evitando riscos de colapso na rede, tal

como os blackouts. Devido a essas características o estimador de estados constitui uma ferramenta importante para as *Smart Grids*.

O processo de estimação de estados possui a capacidade de manipular dados redundantes e sujeitos a erros, o que possibilita a partir das variáveis de estado, obter um estado de operação mais confiável da rede. Entre os atrativos dessa ferramenta, destaca-se sua capacidade de detectar e identificar erros nas informações processadas pelo estimador. Algoritmos de processamento de erros apresentados na literatura abordam o processamento de erros grosseiros em medidas analógicas, provocados principalmente por falhas no processo de aquisição e transmissão dessas informações, erros de topologia, ocasionados por falhas na modelagem de status de chaves e disjuntores e erros em parâmetros, provocados por falhas na determinação dos parâmetros de linhas de transmissão e transformadores na estimação de estados.

Até o início da década de 90, a modelagem barra-ramo da rede foi adotada na formulação do problema de estimação de estados. Nessa abordagem convencional o configurador de redes é utilizado, agrupando as barras e seções de barras conectadas por disjuntores fechados nas subestações, formando uma única barra/nó. O carregamento dos equipamentos nas subestações é processado, os posicionamentos de chaves e disjuntores são assumidos como corretos e define-se o diagrama unifilar da rede no qual será processada a estimação de estados.

O uso da modelagem barra-ramo da rede na estimação de estados simplifica a análise e evita a representação explícita de chaves e disjuntores e os consequentes problemas numéricos causados pela utilização de valores muito pequenos ou muito grandes de impedância para representar os status aberto e fechado de tais dispositivos (RIBEIRO, 2005). Algoritmos eficientes de processamento de erros grosseiros em medidas foram propostos considerando essa modelagem como, por exemplo, o algoritmo apresentado em (MILI e outros, 1984). Esforços também têm sido despendidos no processamento de erros em parâmetros da rede, para os quais a estimação de estados convencional, que adota a modelagem barra-ramo da rede, é também adequada como visto em (CASTILLO, 2006), (CASTILLO e outros, 2011).

No entanto, as informações pertencentes aos arranjos das subestações e todas as informações contidas dentro das subestações são perdidas e assim, possíveis erros nos posicionamentos de chaves e disjuntores são em geral desprezados na estimação de estados convencional (RIBEIRO, 2005). O não processamento desses erros leva a redução do grau de confiabilidade dos resultados estimados, o que levou ao desenvolvimento de algoritmos

capazes de inferir sobre a existência desse tipo de erro a partir do processamento das medidas analógicas. Porém, essa abordagem nem sempre é eficiente, como relatado na literatura.

A representação de ramos de impedância nula proposta em (MONTICELLI e GARCIA, 1991) e (MONTICELLI, 1993) permitiu a modelagem da rede no nível de seção de barras, iniciando uma nova fase no processo de estimação de estados, chamada Estimação de Estados Generalizada. O surgimento da Estimação de Estados Generalizada (EEG) permitiu o aprimoramento das propriedades de processamento de anomalias na EESP, uma vez que fundamentou uma nova geração de algoritmos mais eficientes de identificação de erros de topologia, tais como (CLEMENTS e SIMÕES COSTA, 1998), (LOURENÇO e outros, 2006). Tais algoritmos modelam regiões pré- selecionadas da rede e suspeitas de conterem erros no nível de seção de barras, onde as posições de chaves e disjuntores são explicitamente representadas. Como resultado, procedimentos sistemáticos podem ser aplicados para validar topologias previamente definidas para a rede.

O processamento de erros grosseiros em medidas analógicas, provenientes, por exemplo, de erros em calibração de medidores, falha de transmissão de dados, defeitos nos equipamentos, foi amplamente investigado no passado e apresenta hoje algoritmos eficientes para detecção e identificação de tais erros como visto em (CLEMENTS e outros, 1982) e (MILI e outros, 1984).

No entanto, a maioria dos algoritmos de processamento de erros grosseiros em medidas analógicas considera que a topologia da rede está correta. De forma similar, os algoritmos recentes de identificação de erros de topologia geralmente descartam a possibilidade da ocorrência simultânea com erros grosseiros em medidas. Alguns esforços foram apresentados na literatura, como em (SOUZA, 2007), (LOURENÇO e outros, 2008), na busca por modelos capazes de realizar a análise simultânea de erros de topologia e erros grosseiros em medidas na EEG, tema pouco explorado na literatura.

A proposta de tratamento de erros em medidas analógicas e erros de topologia de forma independente, como se verifica na maior parte da literatura como, por exemplo, em (WU e LIU, 1989), não é adequada uma vez que a ocorrência de erros na topologia da rede afeta o processamento de erros em medidas. Ou seja, um sistema livre de erros grosseiros em medidas pode, equivocadamente, detectar e até eventualmente identificar medidas corretas como errôneas devido à existência ignorada de erros na topologia. O problema se agrava quando da ocorrência simultânea de ambos os erros, dificultando ainda mais a detecção e identificação dos mesmos.

Incentivado pela problemática exposta, esse trabalho propõe um novo algoritmo capaz de processar erros simultâneos em medidas analógicas e de topologia, aprimorando e consolidando os esforços iniciados em (SOUZA, 2007) e (LOURENÇO e outros, 2008), onde são apresentados os primeiros resultados colhidos a partir desses esforços, os quais se revelaram promissores e servem de base para o presente trabalho. Apesar da importância do processamento de erros em parâmetros, o atual estágio dessa pesquisa não contempla esse tipo de erro.

As unidades de medição fasorial sincronizada (PMUs - do inglês *Phasor Measurement Unit*) estão inseridas no processo de evolução para as SG (FALCÃO, 2010). A inserção das medidas fornecidas pelas PMUs no processo de estimação de estados representa uma fonte adicional de informações, que, uma vez considerada juntamente com as medidas convencionais, garante aumento de redundância e, conseqüentemente, melhoria no processamento de erros.

A incorporação das informações provenientes de PMUs na estimação de estados convencional, que adota a modelagem barra-ramo da rede, é abordada de diferentes formas na literatura, e as referências (ABUR, 2010) e (ATANACKOVIC, 2008) são alguns exemplos de formas de incorporação de PMUs na estimação de estados abordados no presente trabalho.

A inserção de PMUs na formulação da EEG apresenta como característica particular, além do aumento da redundância do plano de medição, a possibilidade de eliminar restrições operacionais críticas, até então ditadas pela topologia da rede e, portanto, invariantes perante o aumento da redundância do plano de medição, como discutido em (KREFTA e LOURENÇO, 2009). Essa questão tem impacto direto no processamento de erros de topologia justificando sua abordagem nesse trabalho.

1.1. Objetivos

O objetivo específico deste trabalho é desenvolver uma metodologia para o processamento simultâneo de erros na topologia da rede e erros grosseiros em medidas analógicas. A abordagem proposta deve ser capaz de identificar previamente as informações suspeitas de conterem erros e o tipo de erro existente (natureza do erro) e após essas verificações, realizar o processo de identificação das informações errôneas.

Outro objetivo é apresentar algumas formas de incorporação de PMUs na formulação do problema de EEG e avaliar o impacto dessa inclusão no processamento simultâneo de erros.

1.2. Revisão Bibliográfica

Nesta seção uma breve revisão bibliográfica das contribuições mais relevantes para processamento de erros em medidas e de topologia será apresentada. Alguns trabalhos envolvendo PMUs também são aqui apresentados.

1.2.1. *Estimação de Estados Generalizada*

Os primeiros estudos sobre estimação de estados em sistemas elétricos de potência surgiram no início da década de 70, com (SCHWEPPE, 1970), e desde então vêm sendo alvo de inúmeras pesquisas tais como (MONTICELLI e GARCIA, 1991), (MONTICELLI, 1999), (LOURENÇO, 2001).

Com a proposta de (MONTICELLI e GARCIA, 1991) de realizar a modelagem em ramos de impedância nula, que foi formalizada em (MONTICELLI, 1993a; 1993b) deu-se início a uma nova fase no processo de estimação de estados. O processo de estimação de estados ficou mais completo, pois a modelagem das chaves e disjuntores em subestações passou a ser possível. Esta modelagem mais completa foi denominada estimação de estados generalizada.

Monticelli (1999) definiu as quatro etapas envolvidas no processo de estimação de estados, que são obter o modelo barra ramo da rede, através do configurador de rede; efetuar a análise de observabilidade do sistema, verificando se há número de medidas suficientes para o processamento da estimação de estados; estimar os estados da rede; processar erros grosseiros em medidas. No entanto, erros provenientes das configurações de chaves e disjuntores também afetam a estimação de estados, sendo necessário processá-los.

O tratamento de erros na estimação de estados sempre representou um desafio, pois para obter um modelo correto da rede é necessário que as informações topológicas, as medidas analógicas e os parâmetros não contenham erros. Sendo assim a identificação correta das informações portadoras de erros representa uma tarefa urgente (ASADA, 2004).

1.2.2. Identificação de Erros Grosseiros em Medidas

Vários métodos para o processamento de erros em medidas foram apresentados, dentre eles em (MILI e outros, 1984) foi proposto um novo método de identificação de erros em medidas no processo de estimação de estados baseado em teste de hipóteses, no qual todas as medidas errôneas foram identificadas simultaneamente. Neste método, primeiramente foi realizado um teste de detecção, que revelou a presença de erros em medidas nos resíduos computados, para depois seguir pelas cinco etapas do teste de hipóteses, sendo a primeira responsável por selecionar as medidas suspeitas através de seus resíduos normalizados, posteriormente foi estimada a medida errônea pelo processo de estimação linear. A etapa seguinte consistia em verificar cada medida reconhecendo, as falsas e verdadeiras através do teste de hipóteses. Se necessário, a próxima etapa efetuava o refinamento do teste de hipótese. Por fim, foi realizada a correta estimação de estados. Anterior a esse procedimento análises de erros grosseiros eram realizadas por procedimentos de eliminação das medidas ou pela utilização de critérios não quadráticos citados em Mili (1984).

Foi realizado em (MILI, 1985) uma análise comparativa entre os métodos de identificação de erros grosseiros em medidas utilizados até o momento que eram o de identificação por eliminação, critério não quadrático, e o método do teste de hipóteses apresentado em (MILI e outros, 1984). Neste artigo, foram realizados diversos testes e simulações no sistema teste 30 barras do IEEE, considerando os diferentes tipos de erros em medidas que se classificam em relacionados, não-relacionados e não identificáveis, averiguando o critério de seleção de cada método.

Como conclusão dessas verificações, pode-se perceber que o método menos eficaz, ou o que apresentou pior resultado, foi o de critério não quadrático, por ser muito sensível quando há baixa redundância local e a interação entre medidas errôneas, apresentou uma convergência lenta e vícios de comportamento. Já o método por eliminação apresentou características atrativas na sua implementação, como simplicidade de uso e implementação. Mostrou-se eficiente para erros não interativos e localizados em regiões com moderada redundância. Porém, foi ineficiente quando o número de erros e seu espalhamento aumentaram e a redundância diminuiu. Finalmente, o método baseado em testes de hipóteses pareceu combinar eficiência, confiabilidade e compatibilidade com as implementações em tempo real requeridas a um método aplicado a estimadores de estado.

O mesmo autor comprovou em trabalho posterior a eficiência do teste de hipóteses quando utilizado para averiguação em tempo real, o que pode ser visto em seu artigo (MILI e

VAN CUTSEM, 1988).

Tanaka, em 1985 realizou em sua dissertação de mestrado uma análise de desempenho de três métodos para processamento de erros grosseiros em medidas e propôs uma nova maneira de se obter o limiar de decisão do teste de hipóteses. Os testes foram realizados para erro grosseiro em uma única medida. O primeiro método efetuou a estimação e eliminação de uma medida, re-estimou o estado e em ocorrendo erros em medidas o processo de identificação e detecção era refeito continuando até eliminar todas as medidas com erros grosseiros. O segundo método foi baseado na determinação do maior resíduo normalizado e verificação se o resíduo podia ou não ser considerado uma variável com distribuição normal, comparado a um parâmetro pré-calculado. O terceiro método foi também baseado em resíduo normalizado, verificaram-se todas as medidas e selecionou-se o maior resíduo normalizado, em valor absoluto, estimando o erro grosseiro da medida, em seguida testou-se a hipótese de existência de erros grosseiros. O segundo e terceiro métodos apresentaram resultados semelhantes entre si e foram superiores ao primeiro método.

Em (CLEMENTS e DAVIS, 1986) foi proposto um método para detecção e identificação de múltiplos erros em medidas, utilizando a interpretação geométrica do vetor resíduo das medidas. A identificação dos erros grosseiros, nesta proposta, foi realizada através do teste de colinearidade entre o vetor resíduo das medidas e as colunas da matriz de sensibilidade dos resíduos. A verificação de detectabilidade e identificabilidade dos erros foi realizada pela verificação de dependência linear entre as colunas da matriz sensibilidade.

Foi proposto na tese de doutorado de Asada (2004) um método de análise de observabilidade e processamento de erros grosseiros conformativos, que são difíceis de identificar, utilizando metaheurística Busca Tabu. A busca Tabu permite a identificação mais provável de erros através de critérios probabilísticos. A metodologia para identificação de erros foi apresentada como um problema combinatório. A análise foi realizada utilizando estimação de estado generalizada.

Em (IRVING, 2009) foi proposto um algoritmo robusto para identificação e rejeição de erros grosseiros na estimação de estados generalizada, em seu artigo ele descreveu a nova metodologia que utiliza variáveis binárias para aceitar ou rejeitar medidas, onde a base foi encontrar uma estimativa consistente que minimizasse a hipótese de erros grosseiros. O problema foi formulado como um programa não-linear inteiro misto. Apresentou elevado esforço computacional o que permite sua utilização apenas em redes pequenas.

Em (BRETAS, 2010) foi proposto um método de detecção e identificação de erros grosseiros na estimação de estados, feita pela análise geométrica do estimador de mínimos

quadrados ponderados, e nesta abordagem os erros foram decompostos em detectáveis e não detectáveis, atribuindo no final o índice de indectabilidade (UI) das medidas. Segundo Bretas, quanto maior o índice mais difícil é de se detectar tal medida errônea, pois os erros não são refletidos nos seus resíduos, ou seja, são mascarados.

1.2.3. Identificação de erros de Topologia

Quanto aos erros de topologia, Lugtu (1980), foi quem primeiro abordou esta questão, onde a identificação do erro foi realizada pela mudança de chaves e disjuntores associados a ramos conectados a barras cuja medida de injeção tenha sido considerada errônea pelo estimador (baseado em métodos heurísticos).

Em (SIMÕES COSTA e LEÃO, 1993), baseando-se na estimação de estados convencional e em índices de correlação associados às medidas suspeitas de conterem erros, os autores propuseram um método de identificação de erros de topologia. O índice de correlação variou de 0 a 1, sendo que quanto mais próximo de 1 o valor, mais intensa era a correlação entre a informação analisada e o elemento da rede em análise. As simulações incluíram o processamento de diferentes erros topológicos.

Em (CLEMENTS e SIMÕES COSTA, 1998) foi apresentada uma proposta baseada na utilização de multiplicadores de Lagrange normalizados como ferramenta para identificação de erros de topologia na estimação de estados generalizada. Nesta nova proposta as chaves e disjuntores foram modelados como proposto por (MONTICELLI, 1991) e passaram a ser incluídos como restrições operacionais no problema de estimação de estados. Os multiplicadores de Lagrange associados às restrições operacionais foram normalizados e empregados no processamento de erros de topologia, de forma similar a utilização de resíduos normalizados no processamento de medidas errôneas.

Em (SIMÕES COSTA e VIEIRA, 2001) foi apresentada uma proposta com base em estimadores ortogonais via rotação de Givens para a detecção e identificação de erros de topologia. Utilizando testes de hipóteses via teorema de Bayes, proposto inicialmente por (LOURENÇO E SIMÕES COSTA, 2000), os erros de topologia foram identificados, onde cada possibilidade de combinação de posicionamento suspeito compôs uma alternativa para o teste.

Lourenço apresentou em sua tese de doutorado (LOURENÇO, 2001) um método para identificação de erros de topologia via estimação de estados generalizada. O processo de estimação foi realizado em dois estágios. O trabalho propôs a inclusão de informações a

priori na formulação do problema de estimação de estados. Nesta proposta, baseada em teste de hipóteses via teorema de Bayes, a detecção de erros foi dividida em três etapas, onde a primeira verificava existência de erros de topologia, depois as chaves e disjuntores suspeitos eram selecionados, através da aplicação do teste de colinearidade, finalmente a detecção dos erros foi realizada pelo teste de hipóteses. Através desse método reestimações de estados são evitadas e conseqüentemente o processo de identificação de erros é mais rápido, tornando viável sua aplicação em tempo real.

Em (LOURENÇO e outros, 2004) foi proposto um método de detecção e identificação de erros de topologia na estimação de estado generalizada, baseado no teste de hipóteses via teorema de Bayes. Assume-se que as chaves e disjuntores podem ser distribuídos em dois conjuntos, o suspeito e o verdadeiro, através da verificação do multiplicador de Lagrange normalizado. O teste de hipóteses permitiu que a estimação dos estados fosse realizada de uma única vez, sem a necessidade de re-estimação. O teste geométrico foi utilizado para verificar se todos os elementos suspeitos estavam inseridos no conjunto e foi realizada análise de criticidade, processada quando o erro envolve elementos de conjunto crítico. Essas verificações e análises garantiram o bom desempenho do teste de hipóteses apresentado.

Em (VEMPANTI e outros, 2005) foi apresentado um estimador de topologia generalizado, capaz de formular e analisar dados analógicos, informações das impedâncias e posicionamento de chaves e disjuntores, como um único conjunto de informações. Como consequência, apenas algumas partes da rede necessitaram ser modeladas no nível de seção de barras, o estimador proposto possibilitou uma determinação confiável da conectividade da rede.

Em (LOURENÇO e outros, 2006), foi apresentado um método de identificação de erros de topologia baseado unicamente nos testes de colinearidade, envolvendo o vetor dos multiplicadores de Lagrange e a coluna correspondente da matriz de covariância. O método pode ser considerado uma extensão de técnicas previamente apresentadas por (CLEMENTS e DAVIS, 1986). A base deste método foi realizar a interpretação geométrica dos multiplicadores de Lagrange associados às restrições de igualdade, que modelam o disjuntor na estimação de estado generalizada. O método foi aplicado em dois estágios, no primeiro estágio o teste de colinearidade identificou o conjunto de disjuntores suspeitos. No segundo estágio o teste de colinearidade foi aplicado a fim de verificar se todos os disjuntores selecionados como suspeitos estão mesmo erroneamente modelados, verificando-se disjuntor por disjuntor, até que restasse no conjunto apenas os erroneamente modelados.

Em (LUKOMSKI e WILKOSZ, 2009) foi apresentado um método de identificação de

erros de topologia baseado em índices de desequilíbrio e redes neurais artificiais, aplicado a erros de topologia simples e múltiplos. Os índices de desequilíbrio criam conjuntos característicos para os diferentes casos de modelagem de ramos e nós do sistema, os tipos de erros de topologia podem ser distinguidos através do índice de desequilíbrio da rede. A identificação dos tipos de erros apresentou sucesso para alguns tipos de erros tais como erro *bus-split*, exclusão e quando cessa injeção de potência em uma barra. Para os demais ainda faltam melhorias.

1.2.4. Identificação de Erros de Topologia e Erros Grosseiros em Medidas

Para identificar erros de topologia na presença de erros grosseiros Abur (1995), utilizou estimadores baseados no Mínimo Valor Absoluto (LAV). Como sugerido por (MONTICELLI, 1993), a estimação de estados foi realizada em dois estágios, primeiramente aplicou-se o estimador LAV no modelo barra-ramo do sistema, selecionando a região suspeita de conter erros nos posicionamentos dos ramos chaveáveis, posteriormente, no segundo estágio, obtidas as regiões suspeitas no nível de seção de barras, modelou-se os disjuntores selecionados e o restante da rede continuou a ser modelado no nível barra ramo. Com a rede estendida, rodou-se novamente o estimador de estados, que através dos resíduos normalizados, identificaram erros grosseiros em medidas, os ramos chaveáveis tiveram seus posicionamentos corretos identificados pela normalização dos fluxos nos disjuntores. Para a utilização deste método foi necessário que houvesse redundância suficiente de medidas.

Em (SOUZA, 2007), foi proposta uma nova metodologia para processamento simultâneo de erros grosseiros em medidas e erros de topologia, baseada na análise conjunta dos multiplicadores de Lagrange normalizados e testes de colinearidade. Apesar da importância do trabalho, que aborda um tema ainda em aberto na literatura, relacionado ao tratamento simultâneo de erros em medidas e de topologia, dificuldades relacionadas com a determinação da natureza do erro, relatadas também em (LOURENÇO e outros, 2008), indicam a necessidade de aprimoramento e de novos desenvolvimentos para consolidação do método apresentado.

1.2.5. Medição Fasorial na Estimação de Estados

Em (THORP e PADKE, 1985) foi proposta a estimação de estados com medidas fasoriais, apresentou-se a vantagem de se utilizar medidas em tempo real provenientes de fasores de tensão de sequência positiva na melhoria da estimação de estados. Foi descrita a necessidade de sincronizar as medições realizadas em barramentos diferentes. As análises foram realizadas utilizando estimador de estados estático.

Já em (PADKE e THORP, 1986), apresentou-se técnicas de sincronização das amostragens e método de obtenção de fasores de sequência positiva nas amostras são analisados. Reforçou-se que os relógios de amostragem nas diferentes subestações devem ser sincronizados a fim de colocar os fasores sob uma base de tempo comum. Foi proposta a reformulação do processo de estimação de estados, através da inserção direta das medidas de tensão e corrente fasoriais.

Em (ZHOU, 2006) foi apresentada uma alternativa para a inclusão de medidas fasoriais na estimação de estados. Neste artigo foram apresentadas duas alternativas para inserção de medidas fasoriais, a primeira foi inserir medidas fasoriais junto às tradicionais no estimador de estados, a segunda alternativa foi adicionar medidas fasoriais no pós-processamento da estimação de estados. Testes foram realizados e os resultados foram apresentados de modo a verificar as duas alternativas propostas. A segunda alternativa demonstrou-se mais interessante.

Em (ZHAO, 2006) foi proposto um novo modelo de estimação de estados utilizando medidas provenientes exclusivamente das Unidades de Medição Fasorial diretamente no estimador de estados. A convergência do estimador de estados melhorou com a implementação deste método.

Em (KREFTA, 2008) foi realizada em sua dissertação de mestrado uma avaliação da inclusão de PMUs na estimação de estados em sistemas elétricos de potência. Krefta fez uma revisão sobre a tecnologia das PMUs e sua aplicação na estimação de estados. Foram apresentados os conceitos teóricos e citadas duas formas de inclusão das medidas sincrofatorias no processo de estimação de estados, sem, contudo apresentar uma formulação para tal inserção.

Em (LEITES e SIMÕES COSTA, 2010) foi apresentado um estimador de estados ortogonal com capacidade para processar medidas fasoriais de tensão e corrente. A proposta foi baseada em um estimador híbrido ortogonal, que efetua a modelagem das medidas fasoriais de corrente em coordenadas retangulares. Três abordagens foram apresentadas para

ponderação dos resíduos de medição: *convencional*, *bloco diagonal* e *diagonal-BD*. A última apresentou melhores resultados.

Em (CIPRIANI e SIMÕES COSTA, 2010) foram apresentados métodos quadráticos que permitiram a análise de observabilidade criticidade considerando medidas sincrofasoriais de tensão e corrente no plano de medição.

1.3. Contribuições deste Trabalho

Baseado nos esforços iniciados em (SOUZA 2007) e (LOURENÇO e outros, 2008) este trabalho visa consolidar e aprimorar as técnicas antes apresentadas, a fim de definir um algoritmo robusto que permita a realização mais efetiva do processamento simultâneo de erros. Os multiplicadores de Lagrange normalizados são utilizados para detectar a presença de erros no processo de estimação. A análise da natureza do erro e a definição da ordem de processamento dos erros são baseadas na metodologia do teste geométrico, apresentado em (LOURENÇO, 2006).

A questão relacionada com a criticidade das informações e seus impactos nos testes de colinearidade é abordada, buscando esclarecer os procedimentos adotados quando da presença de conjuntos críticos associados aos testes do cosseno.

O trabalho apresenta uma breve revisão da inclusão das Unidades de Medição Fasorial na estimação de estados, buscando apontar as atuais tendências, uma vez que essa tecnologia deve desempenhar um papel importante na operacionalização das Smart Grids, por representarem um grande avanço na disponibilização de informações para a determinação do estado operativo da rede em pontos distantes do sistema elétrico.

Esforços iniciais relacionados à incorporação dessas informações sincrofasoriais na estimação de estados generalizada e seu impacto no processamento simultâneo de erros são realizados no presente trabalho.

O trabalho leva em consideração o uso de informações *a priori*, proposta em (LOURENÇO, 2001), buscando quantificar os impactos ocasionados pela inserção dessas informações *a priori* no processo de estimação de estados e no processamento simultâneo de erros.

Simulações e testes para validação do método são realizados com os sistemas teste de 30 e 24 barras do IEEE, que apresentam particularidades, como ligação em anel.

1.4. Estrutura da Dissertação

Este trabalho apresenta 6 capítulos. O Capítulo 1 apresenta a introdução do trabalho, mostra os objetivos e uma breve revisão bibliográfica, além das contribuições da dissertação.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão da EEG. Conceitos básicos e necessários para o entendimento da estimação de estados e desenvolvimento deste trabalho são apresentados. A inclusão das informações *a priori* e seu impacto na EEG é discutida. É realizada uma revisão de fluxo de potência no nível de seção de barras, ferramenta importante para a aplicação da EEG, inserida em uma plataforma para estudos da EEG.

No Capítulo 3 é apresentado o tema de Unidades de Medição fasorial, descrevendo as principais tendências relacionadas às formas de uso das medidas provenientes dessas unidades no processo de estimação de estados, além de alguns detalhes relacionados à sua inclusão na formulação na EEG.

O Capítulo 4 apresenta a metodologia proposta para o processamento simultâneo de erros grosseiros em medidas e de topologia, baseado em técnicas consolidadas associadas ao emprego dos multiplicadores de Lagrange normalizados e testes geométricos apresentados na literatura e também descritos nesse capítulo.

As simulações e resultados obtidos em consequência da aplicação da metodologia proposta aos sistemas de 24 e 30 barras do IEEE são apresentados no Capítulo 5.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões gerais do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

2. ESTIMAÇÃO DE ESTADOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

2.1. Introdução

O processo de Estimação de Estados em Sistemas Elétricos de Potência constitui uma ferramenta computacional poderosa que permite a modelagem em tempo real do sistema, o que torna o estimador de estados uma ferramenta fundamental para operação em tempo real. O estimador de estados apresenta um conjunto de algoritmos, com base estatística, que permite minimizar os erros provenientes das telemidas coletadas em toda a rede pelo *Sistema Supervisório de Controle e de Aquisição de Dados* (SCADA - *Supervisory Control and Data Acquisition*).

O estimador de estados fornece uma base de dados confiável em tempo real. As grandezas monitoradas são processadas pelo estimador de estados, que fornece estimativas confiáveis para variáveis de estados da rede. As variáveis de estado são as tensões complexas nas barras do sistema. As variáveis de entrada são os parâmetros da rede, informações digitais referentes às posições de chaves e disjuntores, geralmente processadas pelo configurador de redes, e medidas analógicas de magnitudes de tensão nas barras, injeções de potência ativa e reativa, fluxos de potência ativa e reativa, corrente e, mais recentemente, fasor de tensão e corrente provenientes de PMUs.

Dentro do escopo de subprogramas pertencentes ao estimador tem-se:

- i) configurador de redes: permite a identificação da topologia da rede e a correspondente configuração dos medidores;
- ii) análise de observabilidade: verifica se há número suficiente de medidas para a estimação de todos os estados do sistema;
- iii) pré-filtragem: verifica medições com grandes erros e as elimina, a fim de não comprometer a modelagem em tempo real;

iv) estimador de estados: a partir da topologia da rede, da análise de observabilidade e informações pré-filtradas são determinadas as variáveis de estados (tensões complexas) de todas as barras do sistema;

v) processamento de erros grosseiros: efetua a detecção e identificação de erros grosseiros em medidas analógicas.

No entanto, podem ocorrer erros em parâmetros (CASTILLO, 2006) e erros nas medidas digitais do sistema, que correspondem às informações provenientes ao posicionamento de chaves e disjuntores (LOURENÇO, 2001).

Para que o estimador de estados apresente um bom desempenho é necessário que o conjunto de medidas a serem processadas seja suficiente para obtenção de todas as variáveis de estado. Esse processo de verificação denomina-se análise de observabilidade, que representa uma condição necessária para o êxito da estimação de estados e corresponde a fase inicial do processo.

2.2. Modelagem do Estimador de Estados

Considere um sistema de potência qualquer, com N_b barras, no qual a quantidade de medidas N_m , a topologia e os parâmetros do sistema são conhecidos. Com esses dados obtém-se a tensão complexa nas barras e conseqüentemente os fluxos de potência para todas as linhas de transmissão e a injeção de potência em qualquer barra. O vetor de variáveis de estado da rede é dado por $(N_b - 1)$ variáveis correspondentes aos ângulos de fase das tensões nas barras (a barra de referência apresenta valor conhecido do ângulo) e N_b variáveis correspondentes aos módulos de tensões nas barras. A dimensão do vetor de estados da rede é dada por $n = 2N_b - 1$.

O modelo de medição que relaciona o conjunto de medidas da rede, as variáveis de estado do sistema e os erros de medição, é dado por:

$$z_m = z_0 + \varepsilon_m \quad (2.1)$$

onde:

z_m : vetor correspondente às $N_m \times 1$ quantidades medidas;

z_0 : vetor correspondente aos $N_m \times 1$ valores reais medidos;

ε_m : vetor correspondente aos $N_m \times 1$ erros aleatórios de medição.

As imprecisões provenientes de medidores, erros nos transformadores, erros de comunicação, erros de conversão analógica digital, dentre outros, são representadas pelo vetor ε_m . Adotando média zero para ε_m e erros de medição não correlacionados, tem-se que a matriz de variância correspondente (R_m) é diagonal e seus elementos são definidos pelas variâncias (σ^2) dos erros de medição, que tem como base de cálculo a precisão dos instrumentos que aferem as medidas.

Dessa forma:

$$E\{\varepsilon_m\} = 0; \quad (2.2)$$

$$E\{\varepsilon_m \varepsilon_m^T\} = R_m \quad (2.3)$$

onde:

$E\{.\}$: valor esperado ou a média

R_m : matriz diagonal de variância $N_m \times N_m$

Uma forma de representar o vetor dos valores reais medidos é através de uma função não linear que relaciona as variáveis de estado às quantidades medidas, esta função tem como base as leis de Kirchhoff e a lei de Ohm, dada por:

$$z_0 = h_m(x) \quad (2.4)$$

onde:

x : vetor $n \times 1$ de variáveis de estado;

$h_m(.)$: vetor $N_m \times 1$ de funções não lineares que relaciona as quantidades medidas as variáveis de estado x .

Sendo assim o modelo de medição pode ser escrito como:

$$z_m = h_m(x) + \varepsilon_m \quad (2.5)$$

2.2.1. Estimação de Estados pelo Método dos Mínimos Quadrados Ponderados

O critério estatístico utilizado neste trabalho para a realização da estimação de estados é o Mínimo Quadrados Ponderados. Esta formulação é considerada clássica para a estimação de estados, onde se determina o vetor de estados estimados \hat{x} de forma a minimizar a soma ponderada dos quadrados dos resíduos. A definição dos resíduos da estimação é dada por:

$$r_m = z_m - h_m(\hat{x}) \quad (2.6)$$

A estimativa para os valores dos estados pelo Método dos Mínimos Quadrados Ponderados é dada pela minimização da função objetivo dada por:

$$J(x) = [z_m - h_m(x)]^T R_m^{-1} [z_m - h_m(\hat{x})] \quad (2.7)$$

A função objetivo é ponderada pelo inverso da matriz variância R_m^{-1} , na qual os elementos da diagonal principal são iguais a covariância $((\sigma^2)^{-1})$ de cada medidor, por consequência quanto mais precisa for à medição maior é o valor de $R_{m,ii}^{-1}$. Sendo assim os medidores que fornecem leituras mais confiáveis recebem maior peso na formulação do problema de Mínimos quadrados ponderados.

2.2.2. Equação Normal de Gauss Aplicada a Solução de EESP

Na década de 70 foi proposta por Schweppe a utilização da Equação Normal de Gauss para auxiliar na solução de problemas de Estimação de Estados. A equação de Normal de Gauss pode ser aplicada ao problema de EESP, pois a função apresentada pela equação (2.7) é de natureza quadrática e não apresenta restrições, devendo apenas ser linearizada em torno de um valor conhecido do vetor de estados x^k (SCHWEPPE e WIELDS, 1970). A função custo a ser minimizada para o problema linearizado é dada por (SCHWEPPE e WIELDS, 1970), (GJELSVIK e outros, 1985):

$$J(x) = [\Delta z - H(x^k)\Delta x]^T R_m^{-1} [\Delta z - H(x^k)\Delta x] \quad (2.8)$$

onde:

$\Delta z = z_m - h_m(x^k)$: vetor de resíduos de medição, permite atualizar as medidas;

$\Delta x = x - x^k$: vetor de resíduos dos estados, permite atualizar o vetor de estados;

$H(x^k) = \frac{\partial h_m(x^k)}{\partial x^k}$: matriz Jacobiana das funções das medidas.

A condição necessária de otimalidade é dada pela equação:

$$\left. \frac{\partial J}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}} = 0 \quad (2.9)$$

A condição de otimalidade leva a Equação Normal de Gauss (SCHWEPPE e WIELDS, 1970), (GJELSVIK e outros, 1985):

$$G\Delta x^k = H^T R_m^{-1} \Delta z \quad (2.10)$$

onde G é matriz quadrada ($n \times n$) dada por:

$$G = H^T R_m^{-1} H \quad (2.11)$$

A matriz G é denominada matriz de informação ou matriz ganho, simétrica e definida positiva se, e somente se, o número e a distribuição das medidas do plano de medição sejam tais que assegurem a observabilidade da rede. Se forem satisfeitas estas condições a equação

(2.10) apresenta uma solução única (KRUMPHOLZ e outros 1981), (SIMÕES COSTA e MANDEL, 1986).

Embora este método seja de fácil formulação e implementação, ele apresenta problemas de condicionamento numérico. Assim outro método de solução para o problema de estimação de estados será abordado no presente trabalho a ser apresentado na subseção 2.4.5.

2.3. Estimação de Estados Generalizada

Com o intuito de aprimorar o processamento de anomalias na Estimação de Estados dos Sistemas Elétricos de Potência surgiu a Estimação de Estados Generalizada, onde chaves e disjuntores são explicitamente representados, garantido assim maior confiabilidade para o processamento de erros de topologia.

Na Estimação de Estados convencional o sistema é modelado no nível barra-ramo, desprezando possíveis erros de configuração de chaves e disjuntores, já na Estimação de Estados Generalizada as áreas suspeitas da rede são modeladas no nível de seção de barras. Os fluxos nos ramos chaveáveis são inseridos no problema como novas variáveis de estado, o que aumenta o número de variáveis a serem estimadas, porém, através deste nível de detalhamento é possível incluir informações de medidas de fluxo em disjuntores, injeção de potência nula em seções de barras e diferença angular e de potencial nulas em disjuntores fechados, o que garante maior precisão no processamento dos erros e no fornecimento de estados da rede.

Para evitar problemas de condicionamento numérico na modelagem de ramos chaveáveis na estimação de estados generalizada utiliza-se a representação de ramos com impedância nula como proposto em (MONTICELLI, 1991;1993), tal procedimento será descrito com mais detalhes nas próximas seções.

2.3.1. Modelagem de Ramos com Impedância Nula

Chaves e disjuntores apresentam impedância nula quando fechados ou impedância infinita quando abertos, o que os difere dos demais ramos do sistema. Tal característica causa problemas de condicionamento numérico ao processamento de dados do sistema, tornando inviável a estimação de estados.

Uma alternativa para contornar este problema foi proposta por (MONTICELLI e GARCIA, 1991; 1993), que consiste em representar os ramos chaveáveis como ramos de impedância nula no modelo matemático da rede. Para se aplicar essa modelagem é necessário inserir algumas alterações na formulação convencional da estimação de estados. O primeiro passo é incluir os fluxos de potência ativa e reativa nos ramos chaveáveis como novas variáveis de estado. De modo que, tomando um ramo chaveável entre os nós i e j da rede, as medidas dos fluxos de potência ativa t_{ij} e reativa u_{ij} deste ramo devem ser incluídas no vetor de variáveis de estado. Sendo assim, além dos ângulos das tensões nas barras e das magnitudes de tensão, o vetor de estados x passa a ser formado também pelos fluxos nos ramos chaveáveis.

As informações referentes ao posicionamento das chaves e disjuntores devem ser incluídas na estimação de estados, pois se sabe que quando um disjuntor estiver fechado, a diferença angular e a queda de tensão entre seus terminais são nulas. Em contrapartida se o disjuntor estiver aberto os fluxos de potência ativa e reativa são nulos. A inclusão dos fluxos nos ramos chaveáveis como novas variáveis de estado, implica que eventuais medidas de fluxo de potência em disjuntores são expressas em função das novas variáveis e não em função de tensões complexas. Os fluxos de potência ativa e reativa para um disjuntor ligado entre os terminais i e j da rede são dados por:

$$z_{t_{ij}} = t_{ij} + \varepsilon_{t_{ij}} \quad (2.12)$$

$$z_{u_{ij}} = u_{ij} + \varepsilon_{u_{ij}} \quad (2.13)$$

onde:

$\varepsilon_{t_{ij}}$ e $\varepsilon_{u_{ij}}$: representam os erros aleatórios das medidas dos fluxos de potência ativa e reativa no disjuntor i - j , respectivamente.

As medidas de injeções de potência ativa e reativa que envolvem os disjuntores podem ser expressas pela soma dos fluxos de potência nos ramos incidentes à barra onde a injeção é medida.

Nos ramos convencionais os fluxos são calculados de forma usual, como função das variáveis de estados nodais. Para os ramos que contém disjuntores os fluxos são expressos em função das novas variáveis de estado, t_{ij} e u_{ij} .

Portanto, se as injeções de potência ativa e reativa da barra i são medidas, logo as medidas de injeção de potência ativa z_{pi} e reativa z_{qi} podem ser expressas por:

$$z_{pi} = \sum_{k \in \Omega_i} t_{ik}(\theta_i, \theta_k, V_i, V_k) + \sum_{l \in \Gamma_i} t_{il} + \varepsilon_{pi} \quad (2.14)$$

$$z_{qi} = \sum_{k \in \Omega_i} u_{ik}(\theta_i, \theta_k, V_i, V_k) + \sum_{l \in \Gamma_i} u_{il} + \varepsilon_{qi} \quad (2.15)$$

onde:

t_{ik} : fluxo de potência ativa no ramo $i-k$;

t_{il} : fluxo de potência ativa no ramo chaveável $i-l$;

u_{ik} : fluxo de potência reativa no ramo $i-k$;

u_{il} : fluxo de potência reativa no ramo chaveável $i-l$;

Ω_i : conjunto de ramos convencionais incidentes à barra i ;

Γ_i : conjunto de ramos chaveáveis incidentes à barra i ;

ε_{pi} : erros aleatórios das medidas de potência ativa;

ε_{qi} : erros aleatórios das medidas de potência reativa.

2.4. Formulação EEG como um problema de Otimização Restrito

A Estimação de Estados Generalizada pode ser tratada como um problema de otimização restrito como proposto por (CLEMENTS e SIMÕES COSTA, 1998). O procedimento se dá pela inclusão no problema de minimização da soma ponderada dos quadrados dos resíduos da representação de ramos de impedância nula e das equações de medidas analógicas. Esse processo de inclusão será descrito nas subseções a seguir.

2.4.1. Restrições Operacionais

De acordo com o descrito na seção 2.3.1., tem-se que se um disjuntor conectado aos nós i e j da rede estiver fechado, sua representação é dada pelas seguintes restrições:

$$\theta_i - \theta_j = 0 \quad (2.16)$$

$$V_i - V_j = 0 \quad (2.17)$$

Ao passo que se o disjuntor conectado aos nós i e j da rede estiver aberto, será representado pelas restrições seguintes:

$$t_{ij} = 0 \quad (2.18)$$

$$u_{ij} = 0 \quad (2.19)$$

As restrições supracitadas são chamadas restrições operacionais, uma vez que os *status* do disjuntor podem ser modificados de acordo com o comportamento operacional da rede. A formulação genérica que inclui todas as restrições operacionais é dada por:

$$h_o(x) = 0 \quad (2.20)$$

2.4.2. Restrições Estruturais

A configuração física da rede define outras restrições, que são definidas como restrições estruturais, onde barras/ou nós de passagem com injeção de potência ativa e reativa nulas são representadas. Essas barras/seções de barra com injeções de potência nula são encontradas mais freqüentemente na modelagem no nível de seção de barras. As restrições a serem modeladas pelo estimador são dadas por:

$$p_i = 0 \quad (2.21)$$

$$q_i = 0 \quad (2.22)$$

onde p_i e q_i : injeção de potência ativa e reativa, respectivamente, na barra i ;

A definição de barra de referência angular em ilhas ou barras isoladas da rede representa uma restrição estrutural do tipo $\theta_r=0$ (referência nula), que é incluída no problema de estimação. Genericamente as restrições nas barras de injeção nula e as restrições nas barras de referência são dadas por:

$$h_s(x) = 0 \quad (2.22)$$

2.4.3. Modelagem das Medidas Analógicas

As telemidas analógicas provenientes do sistema de aquisição de dados são incluídas na formulação do problema de EEG a partir do modelo de medição apresentado na seção 2.2.1., onde:

$$z_m = h_m(x) + \varepsilon_m \quad (2.23)$$

Conforme descrito na seção 2.3.1., o vetor de medidas z_m e o vetor de funções não lineares $h_m(x)$ são estendidos para que as equações de medidas de fluxo e injeção de potência em ramos chaveáveis possam ser incluídas.

2.4.4. Formulação da Estimação de Estados Restrita

O problema que minimiza a soma ponderada dos quadrados dos resíduos da estimação de estados, torna-se um problema de otimização restrito se considerada as restrições

operacionais e estruturais (CLEMENTS e SIMÕES COSTA, 1998), que pode ser descrito por:

$$\text{minimizar} \quad \frac{1}{2} r_m^T R_m^{-1} r_m \quad (2.24)$$

$$\text{sujeito a:} \quad r_m = z_m - h_m(\hat{x}) \quad (2.25)$$

$$h_o(\hat{x}) = 0 \quad (2.26)$$

$$h_s(\hat{x}) = 0 \quad (2.27)$$

onde:

r_m : vetor $N_m \times 1$ de resíduos das medidas;

R_m : matriz $N_m \times N_m$ suposta diagonal de covariância dos erros de medição;

\hat{x} : vetor $n \times 1$ de estimativas dos estados

$h_o(\cdot)$: vetor restrições operacionais;

$h_s(\cdot)$: vetor restrições estruturais.

2.4.5. Solução EEG via Método Tableau Esperso

A fim de garantir um melhor condicionamento e estabilidade numérica ao Estimador de Estados, diversos métodos alternativos à Equação Normal de Gauss foram propostos, o utilizado na metodologia deste trabalho é o Método de Tableau Esperso ou método da matriz aumentada de Hachtel, apresentado em (GJELSVIK, 1985).

Este método apresenta estabilidade numérica superior ao método de Gauss. Multiplicadores de Lagrange são atribuídos para as restrições, fazendo com que a função Lagrangeana necessária para a resolução do problema de otimização representado pelas Eqs (2.24) a (2.27) seja dada por:

$$L = \frac{1}{2} r_m^T R_m^{-1} r_m + \lambda_m^T (z_m - h_m(\hat{x}) - r_m) + \lambda_s^T (-h_s(\hat{x})) + \lambda_o^T (-h_o(\hat{x})) \quad (2.28)$$

Efetuando a derivada primeira dessa equação têm-se as condições de primeira ordem necessárias para a obtenção da solução ótima, sendo essas condições conhecidas por condições de Karush-Kuhn-Tucker, que resultam nos sistemas não lineares dados a seguir:

$$\frac{\partial L}{\partial r} = R_m^{-1} r_m - \lambda_m = 0 \quad (2.29)$$

$$\frac{\partial L}{\partial x} = -H_m^T(\hat{x})\lambda_m - H_s^T(\hat{x})\lambda_s - H_o^T(\hat{x})\lambda_o = 0 \quad (2.30)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_m} = z_m - h_m(\hat{x}) - r_m = 0 \quad (2.31)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_s} = -h_s(\hat{x}) = 0 \quad (2.32)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_o} = -h_o(\hat{x}) = 0 \quad (2.33)$$

onde:

$$H_m(x) = \frac{\partial h_m(\hat{x})}{\partial \hat{x}} \quad (2.34)$$

$$H_s(x) = \frac{\partial h_s(\hat{x})}{\partial \hat{x}} \quad (2.35)$$

$$H_o(x) = \frac{\partial h_o(\hat{x})}{\partial \hat{x}} \quad (2.36)$$

Com dimensões $N_m \times n$, $N_s \times n$, $N_o \times n$, respectivamente, sendo que N_m , N_s e N_o representam números de medidas, restrições estruturais e restrições operacionais respectivamente.

Pela equação (2.29) tem-se que:

$$r_m = R_m \lambda_m \quad (2.37)$$

Linearizando-se o problema em relação a um dado vetor de estados \hat{x}^k , eliminando-se a variável r_m e utilizando (2.37), as condições de otimalidade são descritas por:

$$z_m - h_m(\hat{x}^k) - H_m(\hat{x}^k)\Delta\hat{x} - R_m\lambda_m = 0 \quad (2.38)$$

$$h_s(\hat{x}^k) - H_s(\hat{x}^k)\Delta\hat{x} = 0 \quad (2.39)$$

$$h_o(\hat{x}^k) - H_o(\hat{x}^k)\Delta\hat{x} = 0 \quad (2.40)$$

$$H_m^T(\hat{x}^k)\lambda_m - H_s^T(\hat{x}^k)\lambda_s - H_o^T(\hat{x}^k)\lambda_o = 0 \quad (2.41)$$

A representação matricial do método do tableau esparso, baseada no conjunto de equações supracitado é dada por (GJELSVIK, 1985):

$$\begin{bmatrix} 0 & H^T \\ H & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\hat{x} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ r^{(k)} \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

onde:

$$H = \begin{bmatrix} H_m(\hat{x}^k) \\ H_s(\hat{x}^k) \\ H_o(\hat{x}^k) \end{bmatrix}; \quad R = \begin{bmatrix} R_m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \lambda = \begin{bmatrix} \lambda_m \\ \lambda_s \\ \lambda_o \end{bmatrix} \text{ e } r^{(k)} = \begin{bmatrix} z_m - h_m(\hat{x}^k) \\ -h_s(\hat{x}^k) \\ -h_o(\hat{x}^k) \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

Pode-se observar que além de λ_m o vetor λ contém os multiplicadores de Lagrange λ_s e λ_o referentes às restrições estruturais e operacionais respectivamente, onde os valores destes multiplicadores determinam a sensibilidade da função objetivo com relação às restrições. As estimativas dos estados são atualizadas, até a convergência por :

$$\hat{x}^{k+1} = \hat{x}^k + \Delta\hat{x} \quad (2.44)$$

2.5. Multiplicadores de Lagrange Normalizados

Os erros na estimação de estados analisados neste trabalho são erros em medidas analógicas e erros nas restrições operacionais que determinam a topologia da rede, as restrições estruturais são assumidas livres de erros. O vetor de erros na estimação de estados é dado por (CLEMENTS e SIMÕES COSTA, 1998):

$$\tilde{x} = \hat{x} - x \quad (2.45)$$

onde x é o vetor de estados verdadeiro.

Os vetores de erros na estimação de estados e o vetor dos multiplicadores de Lagrange podem ser relacionados ao vetor de erros nas medidas e/ou restrições por (CLEMENTS e SIMÕES COSTA, 1998):

$$\begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\Sigma & C^T \\ C & W \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \varepsilon \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

onde:

$$\begin{bmatrix} -\Sigma & C^T \\ C & W \end{bmatrix} \triangleq \begin{bmatrix} 0 & H^T \\ H & R \end{bmatrix}^{-1} \quad (2.47)$$

De (2.46) tem-se que os multiplicadores de Lagrange são representados por:

$$\lambda = W\varepsilon \quad (2.48)$$

Na ausência de erros grosseiros, considerando que os erros aleatórios nas medidas têm média zero e que as restrições operacionais e estruturais modelam corretamente a rede, tem-se que os multiplicadores de Lagrange (λ) são variáveis aleatórias de média zero, o que permite concluir, sob essas mesmas condições, que o multiplicador de Lagrange normalizado (MLN) é uma variável aleatória também Gaussiana, de média zero e variância unitária.

Os MLNs constituem uma ferramenta para a detecção e identificação de erros grosseiros em medidas e de topologia, como se pode observar na literatura (CLEMENTS e SIMÕES COSTA, 1998; LOURENÇO, 2001; VIEIRA, 2001; SOUZA, 2007), e são definidos por (CLEMENTS e SIMÕES COSTA, 1998):

$$\lambda_i^N = \frac{\lambda_i}{\sqrt{w_{ii}}} \quad (2.49)$$

onde W é a matriz de covariância do vetor λ e w_{ii} é o i -ésimo elemento da diagonal de W .

2.6. Criticidade em Medidas e Conjuntos Críticos

A análise de criticidade é realizada no conjunto de medidas a fim de localizar medidas críticas e conjuntos críticos contidos no plano de medição. Por definição uma medida é considerada crítica quando sua retirada do plano de medição tornar o sistema observável em não-observável (CLEMENTS e DAVIS, 1981), inviabilizando o processo de estimação de estados.

Matematicamente a perda de uma medida crítica reduz o posto da matriz Jacobiana H de uma unidade, pois as linhas de H correspondem às equações de medidas e as colunas as variáveis de estados a serem estimadas. Uma constatação é que as medidas críticas são associadas as linhas linearmente independentes de H , logo sua retirada reduz o posto da matriz.

A definição para conjunto crítico é a de um subconjunto que apresenta medidas do plano de medição e a retirada de qualquer medida do subconjunto torna todas as medidas restantes críticas (CLEMENTS e DAVIS, 1981) e (SIMÕES COSTA, 1988). Determinar medidas e/ou conjuntos críticos no plano de medição é importante para o processamento de erros na estimação de estado, visto que tais informações comprometem a eficiência do estimador, pois erro em medidas críticas são não-detectáveis (CLEMENTS e DAVIS, 1981).

Além disso, é possível demonstrar que o resíduo de estimação normalizado associado a uma medida crítica é nulo (CLEMENTS e DAVIS, 1981), fato esperado por não haver nenhuma medida redundante com esse tipo de medida. Sobre conjuntos críticos tem-se que os resíduos normalizados associados às medidas contidas no conjunto apresentam valores absolutos iguais entre si, sendo assim, embora o erro em uma das medidas pertencentes ao conjunto crítico possa ser detectado, a medida portadora de fato não pode ser identificada (CLEMENTS e DAVIS, 1981; SIMÕES COSTA, 1988).

Portanto, é fundamental dispor de ferramentas que identifiquem medidas e conjuntos críticos no plano de medição a fim de garantir um correto processamento de erros.

2.7. Estimação de Estados Generalizada Restrita com Informações *A Priori*

Informações previamente disponíveis sobre as magnitudes das tensões e os ângulos em todas as barras e seções de barras do sistema, e também pré-informações sobre fluxos de potência ativa e reativa nos ramos chaveáveis da rede caracterizam as informações *a priori* na estimação de estados generalizada.

Informações *a priori* são modeladas como variáveis aleatórias e através de suas variâncias pode-se representar a incerteza sobre cada valor (LOURENÇO, 2001). Pode-se considerar um sistema estável em regime permanente com intervalos de $[-\pi/2; \pi/2]$ para os ângulos e intervalos de $[0,90; 1,10]$ para os módulos das tensões nas barras e para os ramos chaveáveis pode-se definir os intervalos de fluxo de potência pelos limites de capacidade de transmissão de cada elemento chaveável ou da linha de transmissão a eles conectadas. As variâncias possuem densidade uniforme dentro de um determinado intervalo (PAPOULIS, 1991) que variam de acordo com a natureza de cada variável. Esta consideração sobre densidade uniforme permite que se obtenha a estimativa *a priori* dos estados. A função densidade das informações *a priori* pode ser expressa por (PAPOULIS, 1991; LOURENÇO, 2001):

$$f(x) \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{1}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 0, & x > b \end{cases} \quad (2.50)$$

Os valores médios das informações *a priori* são dados por:

$$\bar{x} = \frac{1}{2}(a + b) \quad (2.51)$$

A representação genérica para a variância ou dispersão é dada por (PAPOULIS, 1991):

$$\sigma^2 = E\{x^2\} - [E\{x\}]^2 \quad (2.52)$$

onde $E\{x\}$ é o valor esperado ou expectância de x .

As variâncias das informações *a priori* podem ser obtidas pela aplicação de (2.50) à distribuição uniforme, donde:

$$\sigma^2 = \frac{(b-a)^2}{12} \quad (2.53)$$

As informações *a priori* são modeladas na função objetivo do problema de otimização restrito, acrescentando-se o termo (LOURENÇO, 2001):

$$\frac{1}{2} (\hat{x} - \bar{x})^T P^{-1} (\hat{x} - \bar{x}) \quad (2.54)$$

onde:

\hat{x} : vetor de estados verdadeiros, de dimensão $nx1$;

\bar{x} : vetor de estimativas *a priori* para os estados, de dimensão $nx1$;

P : matriz de covariância dos estados *a priori*, de dimensão nxn , definida por:

$$P = E\{(\hat{x} - \bar{x})(\hat{x} - \bar{x})^T\} \quad (2.55)$$

Este procedimento é equivalente a modelar a função densidade *a priori* para as estimativas de estado como uma função Gaussiana de média \bar{x} e matriz de covariância P . A função objetivo da EEG formulada como um problema de otimização restrito com a inclusão das informações *a priori*, passa a ser descrita por:

$$J(x) = \frac{1}{2} r_m^T R_m^{-1} r_m + \frac{1}{2} (\hat{x} - \bar{x})^T P^{-1} (\hat{x} - \bar{x}) \quad (2.56)$$

Tomando-se a equação (2.56), aplicando-se as KKT's (KARUSH, 1939; KUHN e TUCKER, 1950) e efetuando as alterações necessárias, obtém-se a forma matricial do conjunto de equações (LOURENÇO, 2001):

$$\begin{bmatrix} -P^{-1} & H_m(\hat{x}^k) & H_s(\hat{x}^k) & H_o(\hat{x}^k) \\ H_m(\hat{x}^k) & R_m & 0 & 0 \\ H_s(\hat{x}^k) & 0 & 0 & 0 \\ H_o(\hat{x}^k) & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \lambda_m \\ \lambda_s \\ \lambda_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -P^{-1}(\hat{x} - \bar{x}^k) \\ z_m - h_m(\hat{x}^k) \\ -h_s(\hat{x}^k) \\ -h_o(\hat{x}^k) \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

A inclusão de informações *a priori* no problema de estimação de estados permite que haja um melhor condicionamento numérico do sistema de equações, devido ao fato de fortalecer a diagonal da matriz de coeficientes do método de Tableau Esparsos. Esta afirmação pode ser verificada pela comparação entre as matrizes de coeficientes obtidas antes e depois da inclusão das informações *a priori*. Nota-se que o estado anterior da rede pode ser utilizado como informação *a priori*. Maiores considerações sobre inclusão de informações *a priori* no problema de estimação restrito podem ser vistas no apêndice A.

Análises mais detalhadas sobre o impacto da inclusão de informações *a priori* no processo de EEG serão descritas na subseção 2.7.1. a seguir.

2.7.1. Avaliação do Impacto da inclusão das informações *a priori* no processo de EEG

Essa seção busca descrever e esclarecer não apenas pontos consolidados na literatura referente à modelagem e influência das informações *a priori* no processo de estimação de estados, mas também apresenta novos pontos que devem auxiliar no entendimento dessa importante fonte de informações.

A representação explícita de chaves e disjuntores pode gerar ilhamento de algumas partes da rede ou de algumas barras, que podem ficar isoladas. Tais ocorrências de ilhamento podem ocorrer devido a erros nos posicionamentos de disjuntores que mesmo fechados são modelados como abertos, sendo assim a estimação de estados deve ser capaz de lidar com tais ocorrências, pois o sistema mesmo contendo ilhas deve ser considerado como uma única rede a fim de garantir a eficácia do processamento de erros de topologia. A utilização de uma barra de referência para cada ilha apresenta-se como uma solução para contornar o problema de ilhamento. Porém, uma alternativa mais eficiente é a utilização das informações *a priori* sobre os estados referentes aos ângulos das barras. As informações *a priori* atuam como medidas virtuais para os ângulos das barras da rede, eliminando a necessidade de se definir uma referência para cada ilha. Assim, evita-se a necessidade de verificação da conexão da rede para cada nova configuração a ser avaliada, ressaltando a importância maior dessa questão na modelagem de redes no nível de seção de barras.

As informações *a priori* no processo de EEG poderiam também ser modeladas como pseudomedidas, com valores dados por \bar{x} e covariâncias definidas por P . Esse procedimento é equivalente à modelagem apresentada na seção 2.7. Entretanto, os efeitos de melhoria de condicionamento numérico, discutidos naquela seção, somente são obtidos com a modelagem das informações *a priori* diretamente na função objetivo, não deixando dúvidas quanto à escolha da forma de inclusão dessas informações na formulação do problema de estimação de estados.

A forma alternativa de modelagem das informações *a priori* como pseudomedidas, apresentada acima, permite concluir que a inclusão dessas informações exerce influência na redundância do plano de medição e, portanto, alivia os efeitos degradantes das informações críticas e conjuntos críticos no processamento de erros. Quanto mais forem essas informações,

maior sua contribuição no aumento da redundância do plano de medição. Como a estimação de estados é uma ferramenta de operação em tempo real, cuja execução é realizada em curtos intervalos de tempo, de acordo com a taxa de amostragem do sistema de aquisição de dados, os estados do caso anterior podem ser utilizados como informações *a priori* para o próximo caso, permitindo o uso de valores mais precisos. Nesse caso, os valores da matriz de covariância podem também ser ajustados, podendo assumir valores mais próximos daqueles usados em pseudomedidas, o que permite explorar melhor essa característica de aumento da redundância do plano de medição.

2.8. Estimador de Estados Generalizado Considerando o Modelo Linear da Rede

Neste trabalho será abordada a modelagem linear da rede, a fim de simplificar o processo de avaliação da proposta. Nesse caso e considerando a abordagem no nível de seção de barras, tem-se o estimador de estados generalizado linear que despreza as perdas e considera as demais aproximações decorrentes da abordagem linear, apresentadas na sequência. Sendo assim apenas as medidas de injeções de potência ativa nas barras e de fluxos de potência ativa nas linhas de transmissão são consideradas. Além disso, as novas variáveis referentes a modelagem no nível de seção de barras se restringe aos fluxos de potência ativa nos ramos chaveáveis. O EEG Linear permite estimar os valores dos ângulos de todas as barras do sistema e os fluxos de potência ativa em todos os disjuntores modelados, que permitem o cálculo de todas as demais variáveis de interesse da rede linearizada.

Este método de estimação tem como base as hipóteses simplificadas utilizadas para o processo de fluxo de potência linearizado mostrado em (MONTICELLI, 1983) e dadas por:

- A. Os módulos das tensões nas barras do sistema são todos iguais e com valor de 1 p.u.;
- B. As resistências e admitâncias das linhas de transmissão são supostas desprezíveis;
- C. A diferença angular entre os ângulos de tensão nas barras são supostos pequenos o suficiente para justificar a aproximação:

$$\sin(\theta_i - \theta_j) = (\theta_i - \theta_j) \quad (2.58)$$

De acordo com as hipóteses acima, tem-se que (SOUZA, 2007):

$$\text{Ramo convencional:} \quad z_{t_{ij}} = \frac{(\theta_i - \theta_j)}{x_{ij}} \quad (2.59)$$

$$\text{Ramo chaveável:} \quad z_{t_{ij}} = t_{ij} + \varepsilon_{t_{ij}} \quad (2.60)$$

De forma que:

$$z_{pi} = \sum_{k \in \Omega_i} t_{ik}(\theta_i, \theta_k) + \sum_{l \in \Gamma_i} t_{il} + \varepsilon_{pi} \quad (2.61)$$

onde:

θ_i e θ_j : representam ângulos de tensão nas barras i e j respectivamente;

$z_{t_{ij}}$: fluxo de potência ativa entre as barras i e j ;

z_{pi} : injeção de potência ativa na barra i ;

t_{ik} : fluxo nos ramos convencionais;

t_{il} : fluxo nos ramos chaveáveis;

$\varepsilon_{t_{ij}}$ e ε_{pi} : erro aleatório no fluxo de potência e na injeção de potência ativa, respectivamente;

Ω_i : conjunto de ramos convencionais incidentes a barra i ;

Γ_i : conjunto de ramos chaveáveis incidentes a barra i .

As variáveis a serem estimadas pelo estimador linearizado são os ângulos de tensões nas barras e as medidas de fluxo de potência nos ramos chaveáveis, pois as tensões são constantes conhecidas iguais a 1 p.u.. Sendo assim o vetor de estados passa a ser composto pelas medidas de fluxo t_{ij} nos disjuntores e pelos ângulos das tensões, cuja dimensão é $n = N_b - 1 + n_D$, devido a barra de referência que apresenta ângulo conhecido, ou seja:

$$\hat{x} = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{N_b}, t_{disj1}, t_{disj2}, \dots, t_{disj(n_D)}]^T \quad (2.62)$$

onde:

\hat{x} : vetor de estados da rede;

N_b : número de barras da rede;

n_D : número total de disjuntores da rede;

t_{disj} : fluxo de potência ativa nos disjuntores;

O vetor de medidas z envolve apenas injeções de potência ativa e medidas de fluxo convencionais e no nível de seção de barras. Logo:

$$z = [z_t^T : z_{t_{disj}}^T : z_p^T]^T \quad (2.63)$$

onde:

z_t : vetor de medidas de fluxo de potência ativa nos ramos convencionais;

$z_{t_{disj}}$: vetor de medidas de fluxo de potência ativa nos ramos chaveáveis;

z_p : vetor de medidas de injeção de potência ativa.

O modelo de medição para o estimador de estados linearizado é dado por:

$$z = H_m X + \varepsilon_m \quad (2.64)$$

$$E\{\varepsilon_m\} = 0; \quad E\{\varepsilon_m \varepsilon_m^T\} = R_m$$

$$E\{\varepsilon_m \varepsilon_m^T\} = \text{diag}\{\sigma^2, \dots, \sigma_m^2\} \quad (2.65)$$

onde:

σ_m^2 : variância da medida m ;

H_m : matriz ($N_m \times n$) de observação dos modelo de medição;

X : vetor de estados da rede;

ε_m : vetor ($N_m \times 1$) que simula os erros de medição;

R_m : matriz de covariância ($N_m \times N_m$) dos erros de medição .

De acordo com a equação (2.64) é importante observar que a relação entre as quantidades medidas e os estados é linear. Sendo assim, a matriz de observação H do modelo de medição é constante e seus elementos são combinação linear dos parâmetros dos ramos do sistema.

No modelo de estimação de estados generalizada linear as estimativas para \hat{x} são obtidas de forma não iterativa. Aplicando-se o método do Tableau esparsa para solução do problema linear, tem-se:

$$\begin{bmatrix} -P^{-1} & H_m & H_s & H_o \\ H_m & R_m & 0 & 0 \\ H_s & 0 & 0 & 0 \\ H_o & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \hat{x}^k \\ \lambda_m \\ \lambda_s \\ \lambda_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ z_m \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.66)$$

onde:

H_m, H_s e H_o : matrizes de observação correspondentes as medidas, restrições estruturais e restrições operacionais, com dimensões ($N_m \times n$), ($N_s \times n$) e ($N_o \times n$), respectivamente;

R_m : matriz de covariância ($N_m \times N_m$) dos erros de medição;

$\lambda_m, \lambda_s, \lambda_o$: multiplicadores de Lagrange correspondentes as medidas, restrições estruturais e restrições operacionais, respectivamente, com dimensões ($N_m \times 1$), ($N_s \times 1$) e ($N_o \times 1$), respectivamente;

z_m : vetor de medidas, dimensão ($N_m \times 1$)

P : matriz covariância dos estados *a priori*, dimensão $(n \times n)$

$\Delta \hat{x}^k$: vetor de estados com dimensão $(n \times 1)$

Para efeito de estudo de métodos e técnicas ligados a EEG, como por exemplo, processamento de erros de topologia, o estimador linear é de grande importância. Essas hipóteses simplificadoras do processo de estimação de estados permitem um fácil entendimento dos métodos aplicados.

2.9. Plataforma para Estudos da Estimação de Estado Generalizada

A primeira etapa necessária para efetuar o processo de estimação de estados é ter um banco de dados que forneça informações da rede para serem processadas. Como não é possível dispor do sistema supervisor do sistema elétrico para fornecer dados ao estimador estudado, tal como nos centros de operações, desenvolveu-se uma plataforma que simula os dados de uma rede elétrica e que gera informações tanto para a estimação de estados convencional, quanto para a estimação generalizada. Dentro da plataforma de estudos há passos que devem ser seguidos, onde, após a escolha do sistema teste a ser simulado para fornecer os dados e parâmetros da rede e do plano de medição, que indica tipo e localização das medidas, inicializa-se o simulador de medidas com o programa de fluxo de potência. Para possibilitar o uso de medidas em elementos internos das subestações, o presente trabalho faz uso do fluxo de potência estendido desenvolvido em (RIBEIRO, 2005), que permite o processamento de redes modeladas no nível de seção de barras.

É importante ressaltar as dificuldades associadas ao uso do fluxo de potência convencional na preparação dos dados para a EEG. Isso se deve ao fato da formulação tradicional considerar o modelo barra-ramo para a rede elétrica, onde o configurador agrupa as barras e seções de barras conectadas por disjuntores fechados nas subestações, formando uma barra/nó. O carregamento dos equipamentos nas subestações é processado, os posicionamentos de chaves e disjuntores são assumidos como corretos e define-se o diagrama unifilar da rede onde será processada a estimação de estados. Portanto, chaves e disjuntores não são explicitados, as barras ou nós, representam as subestações e os ramos são as representações das linhas de transmissão e transformadores, elementos que interligam as barras do sistema.

Esta forma de representação faz com que a disposição interna das subestações não seja especificada impossibilitando a consideração e representação direta de medidas nos elementos

internos das subestações no plano de medição e, conseqüentemente, na plataforma de estudos para o EEG. Antes do desenvolvimento do fluxo de potência estendido (no nível de seção de barras), era necessário dispor de processamentos adicionais e tediosos, para determinação da distribuição dos fluxos nos elementos internos das subestações.

O algoritmo de (RIBEIRO, 2005) foi baseado na modelagem de ramos com impedância nula, proposta para o problema de estimação de estados, mostrada na seção 2.3.1., do presente trabalho. A determinação do fluxo de potência no nível de subestação é uma extensão da análise de fluxo de potência convencional, porém com particularidades necessárias para se evitar problemas numéricos provenientes das representações explícitas dos ramos chaveáveis.

A exemplo do EEG, os fluxos de potência ativa e reativa nas chaves e disjuntores são tratados como novas variáveis do problema, em conjunto com as variáveis convencionais que são magnitudes e ângulos das tensões nas barras. Fazendo com que os ramos chaveáveis sejam representados por suas variáveis de estado e não por suas impedâncias, contornando assim problemas numéricos. A formulação completa do fluxo de potência estendido e os impactos na matriz Jacobiana podem ser encontrados em (RIBEIRO, 2005).

A partir do plano de medição e do fluxo de potência estendido, é possível determinar os valores perfeitos das medidas. A partir do vetor gerado de medidas perfeitas, passa-se a última etapa do simulador que consiste em inserir erros aleatórios de baixa magnitude nessas quantidades, que representam os erros advindos do processo de medição e transmissão das medidas analógicas. A Figura 2.1 ilustra a plataforma de estudos desenvolvida para a EEG que contempla o *Gerador de Medidas no Nível de Subestação*:

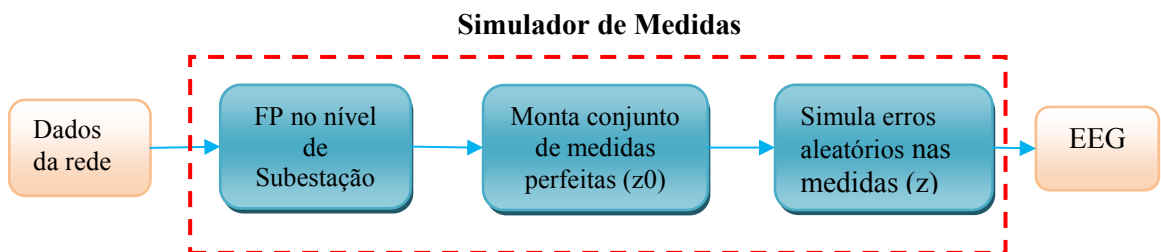


Figura 2.1: Plataforma de estudo de EEG

2.10. Considerações Finais do Capítulo

Este capítulo apresentou a conceituação básica envolvida nos estudos de estimação de estados, com especial atenção à estimação de estados generalizada e sua formulação como um problema de otimização restrito. O capítulo apresentou as variações na formulação da EEG quando da inserção de informações *a priori*, e as implicações e vantagens decorrentes do uso dessas informações no condicionamento numérico e criticidade do plano de medição.

Questões e definições apresentadas na literatura com relação à relevância da determinação de medidas críticas e conjuntos críticos foram abordadas nesse capítulo, uma vez que exercem influência no processamento de erros.

A fim de simular um sistema de aquisição de medidas, de forma similar ao SCADA disponível nos centros de operação, foi utilizada uma plataforma de estudos capaz de gerar um vetor de medidas correspondente a rede e plano de medição, desejados. A ferramenta desenvolvida faz uso do fluxo de potência no nível de seção de barras, que simplifica a simulação de medidas nos elementos internos das subestações.

CAPÍTULO 3

3. UNIDADES DE MEDIÇÃO FASORIAL NA ESTIMAÇÃO DE ESTADOS

3.1. Introdução

Os avanços tecnológicos ocorridos em meados da década de 80 permitiram a inclusão de medidas fasoriais no sistema elétrico de potência. Devido ao fato de a maioria dos sistemas de energia elétrica apresentar baixa redundância no conjunto de medidas, trabalhos como (PHADKE, 1986) sugerem o emprego de medidas fasoriais no processo de estimação de estados, pois estas seriam uma nova fonte de dados, que permitiria maior redundância de medidas de ângulo e magnitudes, levando conseqüentemente a uma melhoria no processo de estimação de estados.

Alguns trabalhos afirmam que as medidas sincrofasoriais são indispensáveis, a fim de elevar o patamar do processo de estimação de estados para um estágio mais evoluído e mais completo. E dentro do novo contexto na busca por SG, essa é uma ferramenta que se apresenta como uma das peças fundamentais na parte de transmissão, como citado em (FALCÃO, 2010).

No Brasil os esforços para implementação das medidas sincrofasoriais no sistema elétrico foram iniciados em 2001 pelo programa Medfasee (Medição fasorial sincronizada em sistemas de energia elétrica), que permite o monitoramento do sistema interligado nacional em tempo real através das informações fasoriais da rede.

Este capítulo faz uma breve revisão sobre as unidades de medição fasorial (*PMU*- do inglês *Phasor Measurement Unit*), descrevendo o que são e como são coletadas as medidas fasoriais. Há diversos trabalhos e considerações sobre a melhor forma de se empregar as PMUs no processo de estimação de estados, sendo que as principais tendências são levantadas e descritas na Seção 3.3. A inclusão de PMUs na formulação da EEG é também abordada nesse capítulo, buscando identificar seu impacto no processamento de erros de topologia.

No Brasil alguns trabalhos referem-se às PMUs também como UMFs (Unidades de Medição Fasorial), sendo que nesse trabalho optou-se pela primeira.

3.2. Unidades de Medição Fasorial

Para uma estimação de estados ser bem sucedida, é necessário que as informações fornecidas ao estimador sejam confiáveis. Os centros de operação, desde a década de 60, fazem uso do sistema supervisorio *SCADA*, responsável pela supervisão e aquisição dos dados do sistema. O *SCADA* possui uma taxa de atualização em torno de 2 a 4 segundos. Os dados não são sincronizados, impedindo a utilização de informações provenientes de PMUs. Como em todo sistema de aquisição, as informações provenientes do *SCADA* estão sujeitas a erros no processo de aquisição e transmissão das telemedidas. Os dados provenientes do *SCADA* permitem apenas a análise estática do sistema, uma vez que, além das informações digitais associadas às posições de chaves e disjuntores, correspondem também às medidas convencionais de magnitude de tensão, injeções de potência, fluxo de potência e corrente.

Por outro lado têm-se as PMUs, que coletam medidas da rede e tornam disponíveis informações de ângulo e fase sincronizadas no tempo, permitindo a utilização de tais sincrofases (de tensão e corrente) no processo de estimação de estados. De acordo com (CHACRABARTI e outros, 2009), a tecnologia de medidas sincronizadas tem potencial para se tornar a “espinha dorsal” para a monitoração em tempo real. A maior vantagem proveniente da utilização de medidas sincronizadas está no fato de permitirem a obtenção de medidas localizadas em pontos geograficamente distantes, devido ao uso do GPS como sincronizador.

Com as PMUs os ângulos de fase das tensões e correntes podem ser medidos diretamente. Sua aplicação no sistema de gerenciamento de energia permitiu um aumento exponencial de precisão e velocidade de aquisição de dados da rede (CHACRABARTI e outros, 2009), pois o sincrofase tem uma taxa de atualização de dados de 30 fasores por segundo e precisão de $1\mu\text{s}$.

As unidades de medição fasorial sincronizadas são instrumentos que realizam a aquisição de sinais nominais senoidais de tensão e correntes nas barras e linhas do sistema, processam os dados amostrados, obtendo valores complexos, fasores de tensão e correntes nos elementos, que são disponibilizados para o operador.

A sincronia dos dados processados, essencial para garantir a utilidade de tais informações, é feita via GPS (do inglês *Global Positioning System*) (EHRENSPERGER, 2004). As pesquisas para utilização de medidas fasoriais no processo de estimação de estados foram iniciadas no final da década de 80. No entanto, a viabilização do uso das informações

fasoriais e a criação das PMUs passaram a ser possível a partir do desenvolvimento de sistemas de sincronização (PHADKE, 1993). A arquitetura básica de medição fasorial sincronizada é mostrada na Figura 3.1 a seguir:

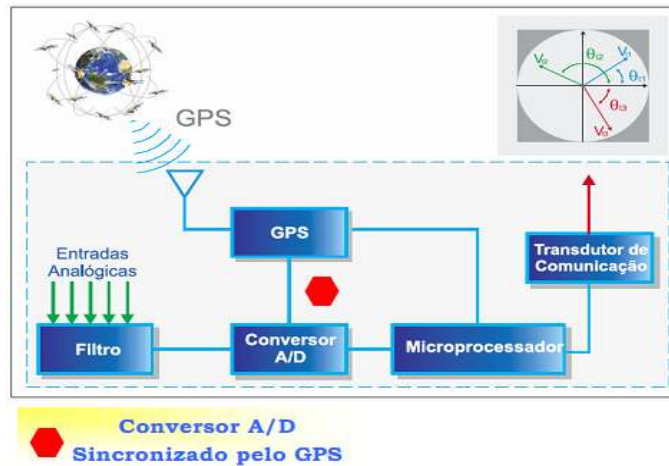


Figura 3.1: Arquitetura básica de uma PMU (LIRA, 2010)

A definição de sincrofasor é fornecida pela norma IEEE C37.118/2005. O formato das medidas fasoriais formatadas pela PMU também é definido pela norma IEEE C37.118/2005. Esta norma é que define o modo de apresentação das informações fornecidas pela PMU, que é em forma de quadros (frames). Os tipos de mensagens são definidos pela norma, sendo essas mensagens: dados, configuração, cabeçalho e comando. Os quadros têm tamanhos variáveis de acordo com a quantidade de informações que serão enviadas pela PMU. Maiores detalhes podem ser encontrados na norma IEEE C37.118/2005.

Os dados provenientes das PMUs são enviados a um concentrador de dados remoto denominado PDC (do inglês- *Phasor Data Concentrator*). A Figura 3.2 ilustra o processo.

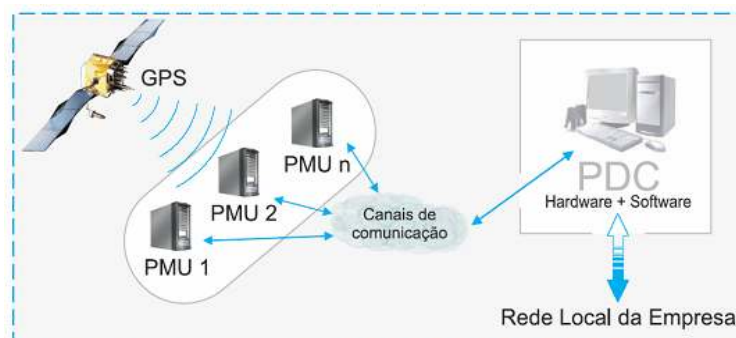


Figura 3.2: PMUs conectadas ao PDC (LIRA, 2010)

O PDC é responsável por receber os dados das PMUs, tratar os erros de transmissão, organizar os dados, disponibilizar e distribuir as medidas fasoriais enviadas e é responsável por armazenar de forma centralizada os dados. Possui operação contínua em tempo real e permite a interface da PMU com o sistema SCADA.

Maiores detalhes sobre conceitos teóricos e formulação básica de PMU, PDC e outros podem ser obtidos, por exemplo, em (KREFTA, 2008 - Capítulo 5).

Sabe-se nos dias de hoje, ao contrário das primeiras expectativas quando da criação de tal tecnologia, que as PMUs estão sujeitas a erros, associados ao processo de aquisição e comunicação. Trabalhos na área vêm abordando o tema, tal como a dissertação de mestrado apresentada por (LIRA, 2010), onde foi descrita a influência dos canais de comunicação sobre a exatidão das medidas sincrofasoriais e influências do uso de transformadores de corrente (TC) e transformadores potenciais capacitivos (TP) foram analisadas e verificou-se a possibilidade de erros significativos.

O presente trabalho pretende apresentar um breve estudo bibliográfico referente às principais evoluções na incorporação e uso de PMUs nos estudos de estimação de estados. Existem muitas questões envolvidas no tema, tal como a proposta de alguns autores, como (JAY, 2009) que defende a substituição do SCADA pelas PMUs, por serem mais rápidas no fornecimento de dados e permitirem uma modelagem mais dinâmica do sistema elétrico. Outros trabalhos, como (ABUR, 2010), partem em defesa da inclusão conjunta das informações da PMU aos dados fornecidos pelo SCADA. Essas discussões são apresentadas na próxima seção.

3.3. Tendências de Implementação das PMUs na EE

Nesta seção serão apresentadas as principais tendências de incorporação das PMUs na estimação de estados, que tem se apresentado como uma ferramenta importante na viabilização das desejadas *Smart Grids*. As metodologias de inclusão de PMUs encontradas na literatura são, neste trabalho, divididas em três categorias, a serem discutidas e ilustradas na sequência, estas formas de representação das metodologias foram apresentadas em (ROQUE, 2010).

A primeira categoria agrupa os métodos que associam as PMUs a programas de estimação de estados já existentes, incapazes de processar por si só tais informações. Neste caso as informações provenientes da PMU que serão enviadas ao estimador de estados serão

inseridas em um módulo a parte. O fluxograma ilustrado na Figura 3.3 mostra o esquema atual de aquisição de dados do estimador, que contempla o modelo completo da rede (estimador de estados não linear), disponível nos modernos centros de operação de sistemas. Com o intuito de agregar dados provenientes das PMUs aloca-se na saída do estimador de estados não linear um estimador de estados linear que processa as informações provenientes do estimador existente em conjunto com as PMUs disponíveis no sistema, fornecendo ao operador, estados mais confiáveis e precisos.

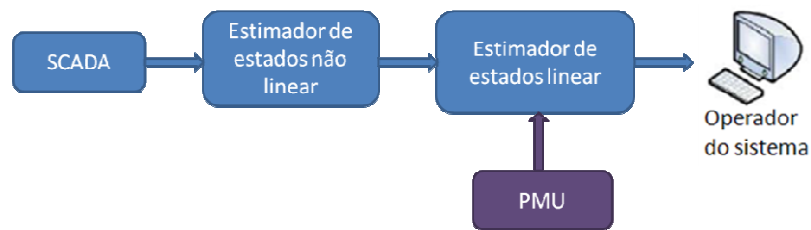


Figura 3.3: PMU associada a programas de EE já existentes

A segunda categoria agrupa os métodos que se baseiam no desenvolvimento de um estimador de estados capaz de incorporar ao mesmo tempo informações do SCADA e PMUs e, portanto, consideram investimentos de maior porte, relativos à aquisição de novos pacotes computacionais pelos centros de operação. A Figura 3.4 ilustra essa proposta.

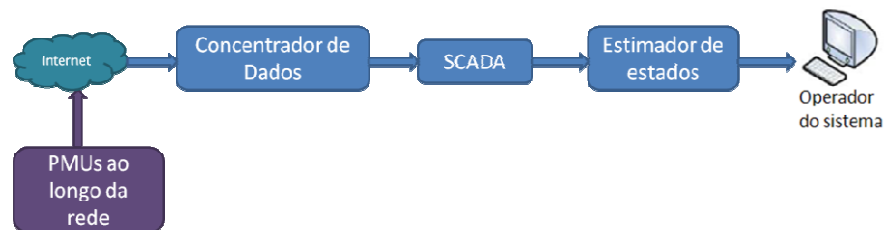


Figura 3.4: Novo EE agregando dados do SCADA conjuntamente aos dados das PMUs

O fluxograma apresentado na Figura 3.4 mostra que os dados provenientes de várias PMUs alocadas ao longo da rede necessitam de um concentrador de dados, que posteriormente serão enviados ao sistema SCADA, armazenados e, finalmente, enviados ao novo estimador de estados capaz de processar dados provenientes de medidas fasoriais e medidas convencionais de tensão, potência, fluxo e corrente, de acordo com o plano de medição disponível na rede (VALVERDE, DEYU, FITCH e TERZIJA, 2009)

Finalmente, a Figura 3.5 apresenta a possibilidade do uso exclusivo de informações provenientes de PMU como base de dados do estimador de estados. Essa proposta verifica-se

como um meio para redução de escala do EE, redução do número de equações condicionais para o EE e aumento na velocidade processamento do EE (ZHAO, 2006).

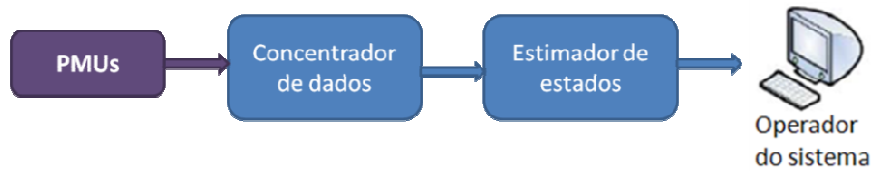


Figura 3.5: PMU como base de dados para o EE

Através dos estudos realizados e da observação da evolução dos meios de melhorias na garantia de um sistema elétrico mais confiável e eficiente pode-se observar que as soluções aqui apresentadas permitem que se inicie a busca por redes controláveis. Os estimadores de estados são baseados em critérios estatísticos, como forma de avaliar o valor mais provável comparado ao valor real, das variáveis de estado, geralmente minimizando o critério selecionado. Sua adequação às PMUs permite que o processamento de dados seja realizado de forma mais rápida, evitando ações tardias dos operadores a fim de corrigir falhas no sistema. Sendo assim as redes se tornarão mais confiáveis. A subseção a seguir apresenta as considerações realizadas sobre cada uma das tendências, ou categorias, apresentadas.

3.3.1. Considerações sobre as Tendências Apresentadas

Cada uma das três categorias apresenta características próprias, sendo que sua aplicação depende das necessidades e disponibilidades atuais do centro de operação no qual serão instaladas. As vantagens e desvantagens de cada tendência e quando utilizá-las são sumarizadas a seguir:

- Inclusão da PMU como um módulo a parte: é vantajosa quando se tem disponível um programa de estimação de estados eficiente, porém incapaz de processar tais informações, permitindo uma melhoria significativa na qualidade dos dados estimados pelo EE convencional, agregando tecnologia sem descartar o programa já existente.
- PMU associada ao SCADA: aconselhável para o desenvolvimento de novos pacotes computacionais que irão permitir o aproveitamento de todo o sistema de medição convencional disponível nos sistemas elétricos de potência e, ao mesmo tempo, incorporar as informações proveniente de PMUs que passam a ser processadas conjuntamente com as medidas convencionais.

- PMU como única fonte de dados para o EE: essa alternativa torna o processo de estimação de estados extremamente rápido. No entanto, todo o sistema de medição atual é ignorado/descartado, resultando numa perda de informações relevantes que hoje estão disponíveis a custo zero. Portanto, vislumbra-se que sua utilização venha a ser empregada apenas em um futuro um pouco mais distante, quando a instalação de PMUs tenha atingido patamares capazes de permitir a “paralisação” da instalação de novos medidores convencionais, os quais passarão a ser descartados gradativamente à medida que forem apresentando defeitos ou que não sejam mais úteis frente às novas tecnologias.

Sendo assim apesar de viável teoricamente, estimadores de estados baseados exclusivamente no uso de medidas fasoriais sincronizadas não é limitado apenas pela infraestrutura atual e alto custo de implementação, erros decorrentes de instrumentos de medição e falha de comunicação comprometem tal abordagem, uma vez que essa seria muito vulnerável (ABUR e EXPÓSITO, 2004).

3.4. Formas de Incorporação das Medidas Sincrofasoriais na Formulação da EEG

Nesta seção serão apresentados dois modelos de inserção de medidas sincrofasoriais na estimação de estados. Uma delas foi apresentada em (ABUR, 2010) que exprime um modo de inserção das medidas sincrofasoriais de tensão e corrente conjuntamente ao vetor de medidas tradicionais (SCADA) da estimação de estados e faz uma análise sobre a conexão dos canais da PMU na rede. Este método é descrito na subseção 3.4.1.

O outro modo de inclusão de medidas sincrofasoriais na estimação de estados é apresentado na subseção 3.4.2.. O artigo (ATANACKOVIC e outros, 2008) propõe converter as medidas sincrofasoriais em potências complexas equivalentes, de tal forma a possibilitar o uso de suas componentes ativa e reativa como medidas independentes de fluxo de potência para o estimador. Alguns métodos e modelos são discutidos nas subseções seguintes.

3.4.1. Incorporação Conjunta às Medidas Tradicionais

Baseado no modelo de medição apresentado na seção 2.4., pode-se inserir as medidas fasoriais no processo de estimação de estados. O modelo de medição na estimação de estados incluindo fasores é dado por (ABUR, 2010):

$$\text{Medidas convencionais: } z = h(x) + \varepsilon \quad (3.1)$$

$$\Delta \hat{x} = ((H^T R^{-1} H)^{-1} R^{-1} \Delta z) \quad (\text{iterativo}) \quad (3.2)$$

$$\text{Medidas fasoriais: } z = H \cdot x + \varepsilon \quad (3.3)$$

$$\hat{x} = (H^T R^{-1} H)^{-1} R^{-1} z \quad (\text{não iterativo}) \quad (3.4)$$

O vetor modelo de medição com a inserção de PMU na EE convencional, de acordo com (ABUR, 2010) passa a ser:

$$\begin{bmatrix} z_{trad} \\ z_{|V|} \\ z_{\theta} \\ z_{Re(I)} \\ z_{Im(I)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{trad}(x) \\ h_{|V|}(x) \\ h_{\theta}(x) \\ h_{Re(I)}(x) \\ h_{Im(I)}(x) \end{bmatrix} + r \quad (3.3)$$

onde:

z_{trad} : vetor de medidas convencionais utilizadas na EEG;

$z_{|V|}$: vetor com as medidas de magnitude de tensão;

z_{θ} : vetor com as medidas angulares dos fasores das tensões;

$z_{Re(I)}$: vetor parte real das medidas de corrente;

$z_{Im(I)}$: vetor parte imaginária das medidas de corrente.

O presente trabalho utiliza esses conceitos para realizar a inclusão de PMUs na formulação da EEG. A partir da Equação 3.3. e a fim de apresentar de forma mais clara o método de obtenção das relações de inserção das correntes complexas na EEG, considera-se o modelo π da rede:

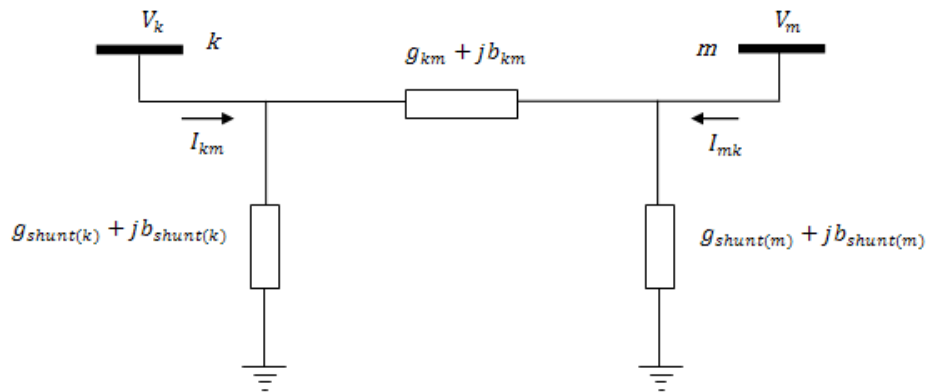


Figura 3.6: Modelo π completo de uma LT

A partir deste modelo analisa-se o ramo $k-m$:

$$\dot{I}_{km} = I_{km} \angle \theta_{km} \quad (3.4)$$

onde:

$\theta_{km} = \theta_k - \theta_m$: defasagem angular no ramo onde está sendo medida a corrente;

I_{km} : magnitude da corrente fasorial.

Porém para o vetor de medidas a corrente é decomposta em:

$$\dot{I}_{km} = I_{kmRe} + jI_{kmIm} \quad (3.5)$$

onde:

I_{kmRe} : parte real da corrente no ramo $k-m$;

I_{kmIm} : parte imaginária da corrente no ramo $k-m$.

Tem-se que:

$$I_{km} = (g_{km} + jb_{km}) * [(V_k \cos \theta_k + jV_k \sin \theta_k) - (V_m \cos \theta_m + jV_m \sin \theta_m)] + (g_{shunt(k)} + jb_{shunt(k)}) * (V_k \cos \theta_k + jV_k \sin \theta_k) \quad (3.6)$$

Após algumas manipulações vem que:

$$I_{km} = g_{km} V_k \cos \theta_k + jg_{km} V_k \sin \theta_k + jb_{km} V_k \cos \theta_k - b_{km} V_k \sin \theta_k - g_{km} V_m \cos \theta_m - jg_{km} V_m \sin \theta_m - jb_{km} V_m \cos \theta_m + b_{km} V_m \sin \theta_m + g_{shunt(k)} V_k \cos \theta_k + jg_{shunt(k)} V_k \sin \theta_k + jb_{shunt(k)} V_k \cos \theta_k - b_{shunt(k)} V_k \sin \theta_k \quad (3.7)$$

Separando a parte real e imaginária e rearranjando a equação tem-se:

$$I_{kmRe} = g_{km} (V_k \cos \theta_k - V_m \cos \theta_m) - b_{km} (V_k \sin \theta_k - V_m \sin \theta_m) + g_{shunt(k)} V_k \cos \theta_k - b_{shunt(k)} V_k \sin \theta_k \quad (3.8)$$

$$I_{kmIm} = g_{km} (V_k \sin \theta_k - V_m \sin \theta_m) + b_{km} (V_k \cos \theta_k - V_m \cos \theta_m) + g_{shunt(k)} V_k \sin \theta_k + b_{shunt(k)} V_k \cos \theta_k \quad (3.9)$$

A corrente é expressa na forma retangular, pois a inserção da corrente no estimador de estados na forma polar apresenta problemas na matriz Jacobiana (H), tornando alguns pontos indefinidos no processo iterativo e quando colocada na forma retangular esse problema é solucionado (VALVERDE e outros, 2009).

Os novos elementos pertencentes à matriz Jacobiana H, provenientes das informações da PMU são apresentados a seguir. Os fasores da tensão têm uma relação linear com as variáveis de estado correspondentes de forma que:

$$\frac{\partial V_k}{\partial \underline{V}} \Rightarrow \begin{cases} 0 & \text{se } V \neq V_k \\ 1 & \text{se } V = V_k \end{cases} \quad \text{e} \quad \frac{\partial \theta_k}{\partial \underline{\theta}} \Rightarrow \begin{cases} 0 & \text{se } \theta \neq \theta_k \\ 1 & \text{se } \theta = \theta_k \end{cases} \quad (3.10)$$

Os elementos da matriz Jacobiana associados às correntes real e imaginária do fasor corrente obtido pela PMU são apresentados a seguir:

Parte real com relação à θ e V:

$$\frac{\partial I_{kmRe}}{\partial \theta_k} = -(V_k (g_{km} + g_{shunt(k)}) \text{sen}\theta_k + (b_{km} + b_{shunt(k)}) \text{cos}\theta_k) \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial I_{kmRe}}{\partial \theta_m} = V_m (g_{km} \text{sen}\theta_m + b_{km} \text{cos}\theta_m) \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial I_{kmRe}}{\partial V_k} = (g_{km} + g_{shunt(k)}) \text{cos}\theta_k - (b_{km} + b_{shunt(k)}) \text{sen}\theta_k \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial I_{kmRe}}{\partial V_m} = -g_{km} \text{cos}\theta_m + b_{km} \text{sen}\theta_m \quad (3.14)$$

Parte Imaginária com relação à θ e V:

$$\frac{\partial I_{kmIm}}{\partial \theta_k} = V_k ((g_{km} + g_{shunt(k)}) \text{cos}\theta_k - (b_{km} + b_{shunt(k)}) \text{sen}\theta_k) \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial I_{kmIm}}{\partial \theta_m} = V_m (-g_{km} \text{cos}\theta_m + b_{km} \text{sen}\theta_m) \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial I_{kmIm}}{\partial V_k} = (g_{km} + g_{shunt(k)}) \text{sen}\theta_k + (b_{km} + b_{shunt(k)}) \text{cos}\theta_k \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial I_{kmIm}}{\partial V_m} = -g_{km} \text{sen}\theta_m - b_{km} \text{cos}\theta_m \quad (3.18)$$

De forma geral a matriz Jacobiana para a EEG fica:

$$H = \begin{bmatrix} H_m(\hat{x}^k) \\ H_s(\hat{x}^k) \\ H_o(\hat{x}^k) \\ H_{PMU}(\hat{x}^k) \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

onde:

$$H_{PMU}(\hat{x}^k) = \begin{bmatrix} \frac{\partial V_k}{\partial V} \\ \frac{\partial \theta_k}{\partial \theta} \\ \frac{\partial I_{kmRe}}{\partial V_k} \\ \frac{\partial I_{kmRe}}{\partial \theta_k} \\ \frac{\partial I_{kmIm}}{\partial V_k} \\ \frac{\partial I_{kmIm}}{\partial \theta_k} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

O presente trabalho propõe o processamento simultâneo de erros a partir do uso da versão linear do EEG. Nesse caso, para o modelo linear da rede, tem-se que:

$$g_{km} = 0; V_k = V_m = 1; b_{shunt} = 0; g_{shunt} = 0; \text{sen}\theta_k - \text{sen}\theta_m \approx \theta_k - \theta_m$$

Dessa forma, as equações (3.8) e (3.9) são simplificadas para:

$$I_{kmRe} = \frac{\theta_k - \theta_m}{x_{km}} \quad (3.21)$$

$$I_{kmIm} = 0 \quad (3.22)$$

Pode-se observar pela Equação (3.21) que a medida de corrente, no caso do modelo linear, é equivalente ao fluxo de potência na linha, ou seja, $I_{ij} = t_{ij}$. Assim, para os ramos convencionais essa informação é modelada de forma idêntica à medida de fluxo no ramo. Já para os ramos chaveáveis, podem-se relacionar essas quantidades diretamente à variável de estado associada a esse elemento, como é feito no caso de medida de fluxo em disjuntor (EXPÓSITO, 2005).

Esta é a forma de inserção de medidas provenientes de PMU adotada na implementação do algoritmo do presente trabalho.

Quando há presença de PMUs as medidas angulares de tensão e corrente são sincronizadas por GPS, eliminando a necessidade de adotar artificialmente uma barra para ser referência angular do sistema. Sendo assim quando há medidas fasoriais conjuntas às medidas convencionais no processo de estimação de estados a escolha da barra de referência não é arbitrária.

Em (ZHU e ABUR, 2007) é apresentada uma formulação para obtenção de barras de referência quando da presença de medidas convencionais e PMUs na estimação de estados convencional. Algumas observações relevantes apontadas em (ABUR, 2010) em decorrência das verificações realizadas em (ZHU e ABUR, 2007) são elencadas a seguir:

A) Dado um conjunto de PMUs, os ângulos de fase são fornecidos pela diferença angular entre cada PMU e a referência escolhida.

B) Se a barra de referência escolhida não tiver PMU o ângulo de referência na barra escolhida e o ângulo de fase atual provenientes da PMU com outras barras não serão consistentes.

C) Se a barra de referência escolhida tem PMU e a medida de fase tem um erro este não poderá ser detectado.

Os fasores de tensão são medidos nas barras do sistema e os fasores de corrente são obtidos dos ramos, a PMU apresenta vários canais de conexão que permitem as medições fasoriais (KORKALI e ABUR, 2009). As figuras a seguir ilustram exemplos de conexão de PMUs uma com múltiplos canais e outra com apenas dois canais, mostrando as formas de ligação do equipamento na rede.

A Figura 3.7 mostra a ligação de uma PMU com múltiplos canais, o canal que mede fasor de tensão está conectado a barra e os canais que medem os fasores de corrente estão conectados a todos os ramos adjacentes a barra.

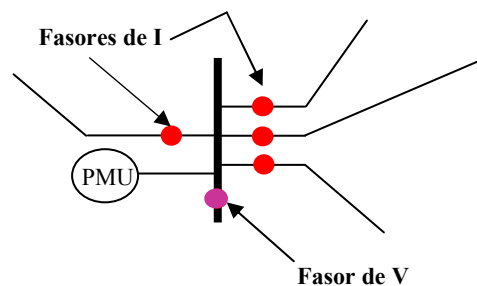


Figura 3.7: Conexão na rede de múltiplos canais de uma PMU

Ao conectar uma PMU com múltiplos canais na rede busca-se obter maior redundância e aumentar a observabilidade do sistema, porém é um método caro, pois quanto mais canais tiver uma PMU, mais elevado será seu custo.

A Figura 3.8 mostra a conexão de uma PMU de dois canais que farão as medidas de fasor de tensão na barra e fasor de corrente ao longo de um único ramo.

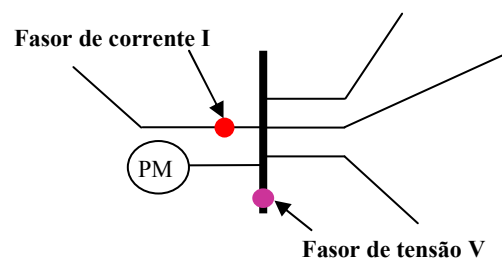


Figura 3.8: Conexão na rede de dois canais de uma PMU

Mesmo com apenas dois canais de PMU conectados a rede, pode-se garantir observabilidade satisfatória da rede, lembrando que medidas de corrente não podem garantir observabilidade, apesar de contribuírem para aumento da redundância (GEISLER, 1984). Considerações sobre alocação ótima de PMUs considerando limite de canais de conexão pode ser visto em (KORKALI e ABUR, 2009).

Na literatura encontram-se métodos de alocação ótima das PMUs na rede a fim de propiciar melhor determinação das condições de operação do sistema. Testes apresentados em (LEITES e SIMÕES COSTA, 2010) comprovam ainda que um número pequeno de PMUs é suficiente para melhorar a qualidade dos resultados obtidos pelo EE. No entanto, não entraremos nesta abordagem, um exemplo de método de alocação ótima pode ser visto em (XU e ABUR, 2004).

A Figura 3.9 mostra o processo de estimação de estados, não linear, com as medidas provenientes das PMUs descrito em (ABUR, 2010):

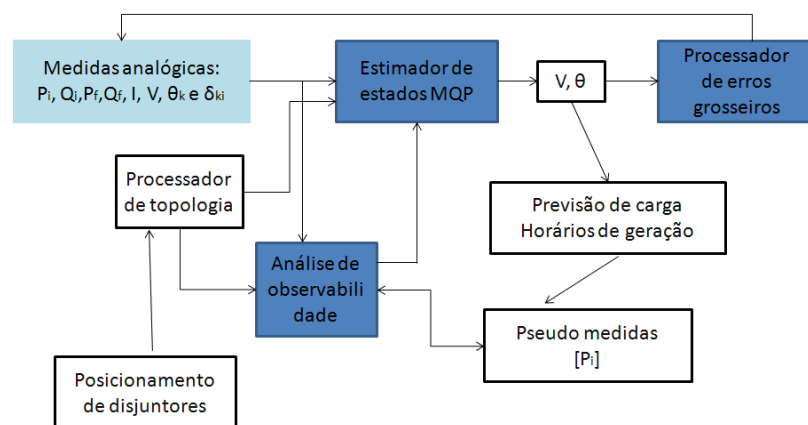


Figura 3.9: Processo estimação de estados com dados de PMU

onde:

P_i : medidas de potências de injeção;

P_f : medidas de fluxo de potência;

I : magnitude da corrente fasorial;

V : magnitude da tensão fasorial;

θ_k : ângulos dos fasores das tensões;

δ_{ki} : ângulos dos fasores de corrente;

θ e V : estados estimados.

3.4.2. Medidas Sincrofasoriais como potência complexa na EEG

Outra maneira de inserir as medidas provenientes de PMU na estimação de estados consiste no uso dessas informações para realizar o cálculo dos fluxos de potência ativa e reativa nos ramos correspondentes e utilizar as quantidades obtidas como medidas disponibilizadas para o estimador (ATANACKOVIC e outros, 2008). Esta aproximação por conversão de potência não implica mudanças no programa de estimação de estados pelo fato de possibilitar a modelagem das novas informações como medidas convencionais de fluxo de potência ativa e reativa. A potência complexa pode ser calculada pelo fasor, baseada nas PMUs conectadas a rede e nos parâmetros das linhas.

O processo para cálculo e inserção das potências ativas e reativas provenientes dos fasores de tensão e corrente fornecidos pela PMU é simples e descrito a seguir, sendo que as medidas provenientes da PMU estão na forma polar.

Tomando o modelo π da rede supracitada e mostrada na figura 3.6., tem-se que de potência aparente complexa saindo da barra k para a barra m é dada por:

$$S_{km} = P_{km} - jQ_{km} = V_k \dot{I}_{km}^* \quad (3.26)$$

onde:

P_{km} e Q_{km} : são os fluxos de potência ativa (MW) e reativa (Mvar) respectivamente.

V_k e \dot{I}_{km}^* : fasores da tensão e corrente respectivamente, fornecidos pela PMU, o * representa o conjugado da corrente.

Como os valores dos fasores da corrente e tensão são fornecidos pela PMU, logo seus valores são conhecidos, vem que:

$$S_{km} = V_k \dot{I}_{km}^* = V_k \angle \theta_{V_k} \cdot I_{km} \angle \theta_{I_{km}} = V_k I_{km} \angle \theta \quad (3.27)$$

onde:

V_k e I_{km} : módulos da tensão e corrente medidos pela PMU;

θ : fase medida pela PMU

Assim:

$$P_{km} = V_k I_{km} \cos \theta_{km} \quad \text{e} \quad Q_{km} = V_k I_{km} \sin \theta_{km} \quad (3.28)$$

A conversão e inserção de potências complexas equivalem à inserção de mais medidas analógicas na entrada do estimador de estados, sendo assim não ocorrem mudanças na Jacobiana e nem na matriz covariância. Essa inserção garante maior redundância de medidas, que permite melhorar a observabilidade e por fim melhorar a estimação de estados.

Erros em medidas de potência são facilmente identificáveis, o que torna este método interessante (ATANACKOVIC e outros, 2008). Essas medidas são somadas às medidas provenientes do sistema SCADA. Para o processo de conversão de potência não há necessidade de obter referência de ângulo de fase, o único deslocamento de fase necessário é o obtido entre os fasores de tensão e corrente para o cálculo das potências complexas equivalentes (ATANACKOVIC e outros, 2008).

Assim, as medidas fasoriais, transmitidas pelas PMUs ao EE, são introduzidas no cálculo dos pares de potência ativa e reativa. As correntes e tensões fasoriais são obtidas nos ramos e barras onde as PMUs estão alocadas, sendo assim as medidas obtidas de P e Q são inseridas no estimador de estados e posteriormente são tratadas como uma medida qualquer de potência no processo de estimação.

Os dados de fasores fornecidos pela PMU estão em coordenadas polares, ou seja, módulo e fase. A cada cinco medidas de ângulos de corrente ou tensão amostradas, um desvio padrão é dinamicamente atualizado, a fim de monitorar a exatidão da medida de fase (ATANACKOVIC e outros, 2008). Se o desvio padrão for superior a um limiar pré definido as medições associadas a esse limiar são retiradas do banco de dados do estimador de estados, considerando a classe de exatidão atribuída ao fasor. O cálculo de potência é realizado a cada dois segundos. Este método, segundo o autor tem sido muito utilizado para implementar a associação de PMU conjuntamente ao estimador de estados.

3.5. Considerações Finais do Capítulo

Este capítulo abordou a inserção de PMUs no processo de estimação de estados. As principais tendências de inserção de PMUs no processo de estimação de estados foram apresentadas e discutidas. Duas formas de modelagem das medidas provenientes de PMUs no processo de estimação de estados são também apresentadas. Os impactos dessa modelagem na formulação do estimador são discutidos, bem como suas variações na abordagem generalizada do problema.

Pode-se verificar que o emprego das PMUs no sistema elétrico de potência constitui em um assunto de grande interesse na atualidade e o uso de PMUs no estimador de estados vem se destacando, uma vez que são capazes de fornecer dados de forma dinâmica e direta ao operador.

Contudo erros envolvendo as PMUs estão sendo estudados, pois como toda tecnologia as PMUs não são perfeitas e deve-se descobrir o ponto ótimo de seu emprego, para isso pesquisas e buscas continuam movimentando pesquisadores em todo o mundo.

CAPÍTULO 4

4. PROCESSAMENTO SIMULTÂNEO DE ERROS NA ESTIMAÇÃO DE ESTADOS GENERALIZADA

4.1. Introdução

Identificar e detectar erros constitui uma etapa fundamental no processo de estimação de estados. Se os erros não forem identificados e detectados corretamente o processo de estimação de estados apresenta resultados inválidos.

Os erros na estimação de estados apresentam naturezas distintas, sendo elas: erros grosseiros em medidas analógicas, erros de topologia (identificação errônea do posicionamento de chaves e disjuntores) e os erros de parâmetros (causado por informações errôneas nos parâmetros de linhas de transmissão, taps de transformadores, etc). Para o desenvolvimento do presente trabalho, considera-se a análise de erros em medidas analógicas e de topologia no nível de seção de barras.

Na linha de desenvolvimento de ferramentas que garantam o processamento de erros na estimação de estados existem diversos trabalhos que realizam o processamento de erros em medidas separadamente dos erros de topologia. O processamento simultâneo de erros é ainda um tema pouco explorado na literatura. Tratar erros grosseiros em medidas ou erros de topologia de forma isolada não é eficiente (SOUZA, 2007). O presente trabalho leva em conta o impacto significativo dos erros de topologia no processamento das medidas pelo estimador de estados, que conduz a uma ferramenta mais eficaz e robusta de processamento de erros.

No processo de estimação de estados generalizada a representação explícita de chaves e disjuntores no modelo da rede permitiu avanços no processamento de erros de topologia, uma vez que dispõe de multiplicadores de Lagrange associados diretamente às informações que modelam o status do dispositivo modelado.

A metodologia proposta para a identificação e detecção simultânea de erros em medidas e de topologia é descrita neste capítulo. Apesar de estar calcada em técnicas desenvolvidas em trabalhos anteriores (SOUZA, 2007) e (LOURENÇO e outros, 2008), o

presente trabalho apresenta um novo algoritmo, que conta com um estágio adicional no teste geométrico, cujo objetivo consiste em contornar as dificuldades relacionadas à determinação da natureza do erro e à identificação do erro propriamente dito quando da presença simultânea com erros de topologia, relatadas em (SOUZA, 2007). As seções e subseções a seguir detalham a metodologia proposta.

4.2. Multiplicadores de Lagrange Normalizados na Detecção de Erros e na Determinação das Informações Suspeitas

Alguns trabalhos como (LOURENÇO, 2001) executam o processo de estimação de estados em dois estágios, sendo o primeiro estágio responsável por rodar o estimador de estados de forma convencional, ou seja, no nível barra ramo do sistema. De posse dos resultados obtidos, define-se a região passível de conter erros, denominada sub-rede relevante. Efetua-se, então, o segundo estágio da estimação de estados, que atua sobre a sub-rede relevante, cujas subestações suspeitas são modeladas no nível de seção de barra (COELHO, 2007).

O processo de identificação de erros em medidas analógicas e de topologia atua diretamente na sub-rede relevante do sistema, ou seja, apenas na parte da rede suspeita de conter erros, pois seria inviável detalhar no nível de seção de barras todo o sistema, devido ao alto custo computacional que esse procedimento acarretaria.

Com a convergência do EEG, os multiplicadores de Lagrange normalizados são empregados no processo verificação da presença de erros e na identificação de erros de medidas e de topologia. Como nos trabalhos anteriores, a existência de erros no processo de estimação de estados é verificada pela análise do máximo valor do MLN. Se este valor for superior a um limiar pré-estabelecido, ou seja, $\lambda_{max}^N > \lambda_t$, conclui-se que há algum tipo de erro na modelagem (tipicamente $\lambda_t = 3$). Após a detecção de erro na modelagem, verificam-se os MLNs associados às restrições de medidas λ_m^N , e restrições operacionais λ_o^N . As informações que apresentam valores dos MLNs superiores ao limiar λ_t , enquadram-se no conjunto de informações suspeitas. Posteriormente os dois conjuntos suspeitos, S_m e S_{op} , definidos, respectivamente, pelas medidas e restrições operacionais selecionadas como suspeitas por esse critério, serão utilizados na verificação da natureza do erro.

Assim como no caso dos resíduos normalizados, no caso de erro simples, ou seja, erro em apenas uma medida, o máximo valor absoluto do MLN corresponde à informação errônea

(CLEMENTS E SIMÕES COSTA,1998). No entanto, para erros múltiplos (erro em duas medidas ou mais) não há garantias que isso ocorra, devido ao efeito de espalhamento que os erros podem provocar sobre os ML de outras medidas e /ou restrições, novamente de forma similar ao que ocorre com os resíduos na estimação de estados convencional.

Sendo assim, para qualquer MLN, pertencente a erros múltiplos, seja este associado às restrições operacionais ou às medidas, que apresente valor em módulo superior ao limiar pré-definido, garante-se a existência de erros de modelagem ($|\lambda_i^N| > \lambda_t$).

Ainda de acordo com o exposto acima, o conjunto de informações suspeitas, S , é definido por:

$$S = [S_m \ S_{op}] \quad (4.1)$$

onde:

S_m : é o conjunto suspeito de medidas composto pelas medidas cujos MLN sejam maiores que o limiar λ_t , ou seja, por toda medida i cujo $\lambda_{m,i}^N > \lambda_t$;

S_{op} : é o conjunto suspeito de restrições operacionais, composto pelas restrições operacionais cujos MLN sejam maiores que o limiar λ_t , ou seja, por toda restrição operacional i cujo $\lambda_{o,i}^N > \lambda_t$;

4.3. Teste Geométrico

O algoritmo proposto nesse trabalho apresenta, após a verificação da existência de erros na EEG, os seguintes passos:

- Determinar os conjuntos suspeitos de medidas e de restrições operacionais, S_m e S_{op} ;
- Identificar a natureza do erro, que considera a ocorrência de umas das seguintes possibilidades:
 - Apenas erro grosseiro em medida;
 - Apenas Erro de topologia;
 - Erro simultâneo de medida e topologia;
- Identificar as informações errôneas nos conjuntos suspeitos de acordo com sua natureza;
- Eliminar/Corrigir as informações errôneas.

Os processos envolvidos nos passos descritos acima fazem uso do teste do cosseno ou teste geométrico, que consiste na interpretação geométrica dos multiplicadores de Lagrange.

O teste geométrico foi proposto em (LOURENÇO, 2001) sendo uma extensão do método proposto em (CLEMENTS e DAVIS, 1986). O processo de detecção de erros via teste geométrico é relativamente simples e exige um baixo esforço computacional, tendo auxiliado o desenvolvimento de diferentes métodos de processamento de erros (LOURENÇO e outros 2005; 2006; SOUZA, 2007; LOURENÇO, 2008).

As subseções a seguir apresentam a formulação do método, já fundamentada na literatura, e a metodologia proposta neste trabalho, metodologia esta fundamental para o processamento simultâneo dos erros.

4.3.1. Formulação para erro simples

O teste geométrico é aplicado a erros múltiplos na rede, no entanto, para melhor compreensão de sua aplicação nesta subseção é descrito seu emprego para erro simples e posteriormente na subseção 4.3.2. descreve-se o método mais completo, que considera a ocorrência de erros múltiplos.

Supondo que a rede esteja corretamente modelada pelas restrições operacionais e medidas disponibilizadas ao estimador, exceto por uma informação (medida ou restrição) j , que possui um erro, ε_j , associado, e que as informações *a priori* não foram consideradas, o multiplicador de Lagrange pode ser escrito por (LOURENÇO, 2001):

$$\lambda = w_j \varepsilon_j \quad (4.2)$$

onde w_j representa a j -ésima coluna da matriz W dos multiplicadores de Lagrange.

Pela equação (4.2) pode-se observar que no caso de erros simples, os multiplicadores de Lagrange são colineares a w_j . A colinearidade de λ com cada coluna de W pode ser testada a fim de detectar informações portadoras de erro. Portanto, é possível calcular o cosseno do ângulo entre λ e as colunas de W para determinar qual coluna ou colunas são colineares com λ . Por razões computacionais, o teste de colinearidade não é realizado entre λ e w_j , mas sim entre $R^{1/2}\lambda$ e $R^{1/2}w_j$. Tome φ_j como ângulo entre $R^{1/2}\lambda$ e $R^{1/2}w_j$, donde vem que:

$$\cos \varphi_j = \frac{\lambda^T R w_j}{\sqrt{(\lambda^T R \lambda)(w_j^T R w_j)}} \quad (4.3)$$

Substituindo (4.2) em (4.3) vem que:

$$\cos \varphi_j = \frac{e^T W^T R W e_j}{\sqrt{(\lambda^T R \lambda)(w_j^T R w_j)}} \quad (4.4)$$

onde e_j é a j -ésima coluna da matriz identidade.

Utilizando a propriedade (CLEMENTS e SIMÕES COSTA, 1998): $WRW^T = W$ tem-se que:

$$\cos \varphi_j = \frac{\lambda_j^N}{\sqrt{(\lambda^T R \lambda)}} \quad (4.5)$$

4.3.1.1. *Formulação para Erros Múltiplos*

A análise mais completa da colinearidade entre multiplicadores de Lagrange e as colunas da matriz W , para fins de identificação de erros, deve levar em conta a criticidade das informações (LOURENÇO, 2002). As informações provenientes da análise de criticidade e as magnitudes relativas dos MLN são utilizadas para definir o conjunto de informações suspeitas e particionar a matriz de covariância da seguinte forma (LOURENÇO, 2002):

$$W = [W_s \ W_T \ W_c] \quad (4.6)$$

onde:

W_s : submatriz correspondente as colunas linearmente independentes de W associadas as informações suspeitas contidas em S ;

W_T : submatriz correspondente as colunas de W sem erros;

W_c : submatriz correspondente as colunas restantes de W associadas as informações críticas (elementos nulos) e aos $k-1$ elementos de cada conjunto crítico suspeito;

Considerando todas as medidas em T perfeitas e que todas as restrições em T representam corretamente o modelo da rede. Neste caso vetor de erros ε é particionado e pode ser representado por (SOUZA, 2007):

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_s \\ 0 \\ \varepsilon_c \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Considerando o particionamento mostrado pela equação (4.6) e desprezando as informações *a priori* tem-se que os multiplicadores de Lagrange são dados por:

$$\lambda = [W_s \ W_T \ W_c] \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_s \\ 0 \\ \varepsilon_c \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

donde:

$$\lambda = W_s \varepsilon_s + W_c \varepsilon_c \quad (4.9)$$

Como as colunas de W_s são linearmente independentes, assim como cada coluna de W_c pode ser escrita como combinação linear de colunas de W_s ($W_c = W_s A$). Logo, (4.9) pode ser reescrita por (LOURENÇO, 2002):

$$\lambda = W_S \varepsilon_S + W_S \varepsilon_C = W_S (\varepsilon_S + A \varepsilon_C) \quad (4.10)$$

$$\lambda = W_S \tilde{\varepsilon} \quad (4.11)$$

onde: $\tilde{\varepsilon} = \varepsilon_S + A \varepsilon_C$

De acordo com a equação (4.11), caso todas as informações errôneas tenham sido selecionadas como suspeitas, o vetor λ estará contido no espaço vetorial de W_S . A interpretação gráfica para o teste de colinearidade é dada pelas figuras 4.1 e 4.2. A figura 4.1 mostra o caso em que todas as informações errôneas foram selecionadas como suspeitas, logo, o vetor λ será imagem de W_S , isto é, no plano gerado pelas colunas de W_S , portanto, $\varphi \approx 0$. Contudo, na figura 4.2 é ilustrado o caso quando pelo menos uma das informações errôneas não estiver contida no conjunto dos suspeitos, neste caso o multiplicador de Lagrange associado a tal restrição será localizado fora do espaço vetorial gerado pelas colunas de W_S . Formando um ângulo φ' significativamente diferente de zero.

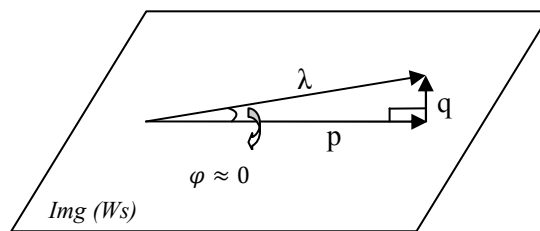


Figura 4.1: MLN dentro do subespaço vetorial gerado pelas colunas de W_S

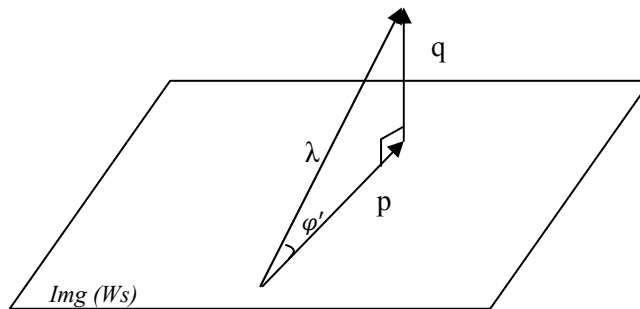


Figura 4.2: MLN fora do subespaço vetorial gerado pelas colunas de W_S

Bem como para o caso de erro simples, por questões de análise computacional, o teste de colinearidade será realizado entre $R^{1/2}\lambda$ e $R^{1/2}W_S$, ao invés de λ e W_S como descrito em (LOURENÇO e SIMÕES COSTA, 2002). A verificação da presença de $R^{1/2}\lambda$ no espaço vetorial $R^{1/2}W_S$ é descrita pela soma vetorial de dois vetores ortogonais:

$$R^{1/2}\lambda = p + q \quad (4.12)$$

onde:

p : projeção ortogonal de $R^{1/2}\lambda$ sobre o espaço de $R^{1/2}W_S$;

q : projeção ortogonal sobre o complemento ortogonal de $R^{1/2}\lambda$.

Pela definição de operador de projeção no espaço vetorial de $R^{1/2}W_S$, apresentada por (CLEMENTS e DAVIS, 1986), tem-se que:

$$Proj\{R^{1/2}\lambda\} = R^{1/2}W_S(W_S^T R W_S)^{-1}W_S^T R^{1/2} \quad (4.13)$$

Logo, a projeção de p é dada por:

$$p = Proj\{R^{1/2}\lambda\} = R^{1/2}W_S(W_S^T R W_S)^{-1}W_S^T R \lambda \quad (4.14)$$

Rearranjando (4.11), tem-se que:

$$q = R^{1/2}\lambda - p \quad (4.15)$$

Por estas equações, pode-se verificar que p e q são ortogonais, logo, $p^T q = 0$. Pela substituição de (4.12) em (4.14), tem-se que:

$$p = R^{1/2}W_S(W_S^T R W_S)^{-1}W_S^T R W_S \varepsilon = R^{1/2}\lambda \quad (4.16)$$

Se todos os erros estiverem restritos ao conjunto S , tem-se como conclusão a partir de (4.15) e (4.16) que:

$$q = 0 \quad (4.17)$$

Pelas equações (4.16) e (4.17) tem-se que se os vetores p e $R^{1/2}\lambda$ são colineares se os erros estiverem restritos aos elementos do conjunto suspeito. Sendo assim, é possível verificar se o conjunto suspeito S contém todas as informações errôneas, através do cálculo do cosseno do ângulo entre p e $R^{1/2}\lambda$. Sendo este ângulo φ , logo:

$$\cos\varphi = \frac{p^T R^{1/2}\lambda}{\sqrt{(\lambda^T R \lambda)(p^T p)}} \quad (4.18)$$

Substituindo-se (4.16) em (4.18) vem que:

$$\cos\varphi = \frac{\lambda^T R W_S (W_S^T R W_S)^{-1} W_S^T R \lambda}{\sqrt{(\lambda^T R \lambda)(\lambda^T R W_S (W_S^T R W_S)^{-1} W_S^T R \lambda)}} \quad (4.19)$$

Rearranjando (4.19) e efetuando algumas manipulações, obtém-se:

$$\cos\varphi = \sqrt{\frac{\lambda^T R W_S (W_S^T R W_S)^{-1} W_S^T R \lambda}{(\lambda^T R \lambda)}} \quad (4.20)$$

Por hipótese, tem-se que se todas as informações, exceto as pertencentes ao conjunto S , estão corretas, verifica-se que o $\cos\varphi$ calculado por (4.20) possui valor muito próximo de 1.0. Ao passo que, se ao menos uma informação suspeita não estiver contida em S , verifica-se que o valor de $\cos\varphi$ difere significativamente de 1.0. É com base nesta propriedade que se baseia o algoritmo.

A fim de simplificar o cálculo de $\cos\varphi$ tem-se que ao particionar o vetor dos multiplicadores de Lagrange de acordo com a partição de W :

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_S \\ \lambda_T \\ \lambda_C \end{bmatrix} = W \tilde{\varepsilon} = W^T R \lambda \quad (4.21)$$

logo:

$$\lambda_S = W_S^T R \lambda \quad (4.22)$$

Substituindo (4.22) em (4.20) e utilizando a definição $W_{SS} = W_S^T R W_S$, tem-se por fim (LOURENÇO e SIMÕES COSTA, 2002):

$$\cos\varphi = \sqrt{\frac{\lambda_S^T (W_{SS})^{-1} \lambda_S}{(\lambda^T R \lambda)}} \quad (4.23)$$

A equação (4.23) consiste em uma forma mais compacta para o cálculo de $\cos\varphi$ do que a equação (4.20).

4.3.1.2. *Aplicação do Teste Geométrico*

Este trabalho propõe uma variação na aplicação do teste geométrico que passa a ser aplicado em três estágios. No primeiro estágio, assim como proposto por (LOURENÇO, CLEMENTS e SIMÕES COSTA, 2006), o teste é aplicado a fim de garantir que todos os elementos erroneamente modelados estejam inseridos no conjunto dos suspeitos, conjuntamente com a pré- identificação obtida pelo MLN. No segundo estágio, o teste é utilizado para processar a natureza do erro, definindo inicialmente a presença ou não de erro grosseiro em medida e, num segundo momento, se a origem do erro é unicamente de erro de topologia, ou presença simultânea de erros de topologia e erros grosseiros em medidas. No terceiro estágio verificam-se, a partir da natureza do erro, cada informação contida no conjunto dos suspeitos, a fim de identificar quais delas estão realmente erroneamente modeladas.

4.4. **Processamento de Erros Simultâneo via teste Geométrico**

O processo de identificação de erros simultâneos teve sua metodologia baseada no teste do cosseno. Baseado no exposto na subseção 4.3.2., para efetuar a determinação da natureza do erro, o conjunto de informações suspeitas é particionado de acordo com o tipo de informação suspeita, ou seja, as medidas suspeitas compõe o conjunto suspeito de medidas, S_m , e as restrições operacionais suspeitas compõe o conjunto suspeito de restrições

operacionais, S_{op} . A união desses dois conjuntos forma o conjunto suspeito S . Assim a equação (4.5), reproduzida abaixo:

$$W = [W_S W_T W_C]$$

Torna-se:

$$W = [W_{Sm} W_{Sop} W_T W_C] \quad (4.24)$$

onde:

W_{Sm}, W_{Sop} : colunas de W correspondentes as informações suspeitas de medidas analógicas e posicionamento dos disjuntores (restrições operacionais) respectivamente;

Essa partição das informações é importante para verificar a colinearidade entre os elementos no teste do cosseno de acordo com a natureza da informação. E sua aplicação será descrita nas subseções seguintes.

4.4.1 *Confirmação do Conjunto dos Suspeitos (1º estágio)*

Primeiramente é realizada a verificação da presença de erro na modelagem, através da análise do máximo valor do MLN e posteriormente é realizada a seleção dos elementos suspeitos e montagem do conjunto dos suspeitos, conforme descrito na Seção 4.2. De acordo com esse procedimento, o conjunto suspeito de conter erro de modelagem, S , é formado pelas medidas (convencionais e PMUs) e restrições operacionais cujos MLN, λ_j^N , são maiores que o limiar pré-especificado, λ_t .

O teste do cosseno é aplicado, neste primeiro estágio, em todo o conjunto dos suspeitos, a fim de verificar se todos os elementos errôneos estão contidos no conjunto S . A equação que verifica a colinearidade entre os elementos do vetor que contém informações errôneas de medidas e restrições operacionais é dada por:

$$\lambda_s = W_S \varepsilon \quad (4.25)$$

Se o conjunto S contiver todas as informações errôneas, o vetor λ será colinear ao espaço vetorial de W e $\cos\varphi \geq (1 - \varepsilon_{cos})$, sendo ε_{cos} um número real muito pequeno na faixa de $[0.01, 0.1]$.

O teste do cosseno aplicado para a verificação do conjunto dos suspeitos é dado por:

$$\cos\varphi = \sqrt{\frac{\lambda_s^T (W_S)^{-1} \lambda_s}{(\lambda^T R \lambda)}} \quad (4.26)$$

onde:

λ_s : vetor contendo todos os multiplicadores de Lagrange relacionados a todos as informações suspeitas (restrições operacionais e medidas) contidas no conjunto S;

λ : vetor contendo todos os multiplicadores de Lagrange, exceto os críticos;

R: matriz covariância dos erros de medição;

W_S : matriz de covariância dos multiplicadores de Lagrange associados às informações suspeitas (de medidas(W_{Sm}) e restrições operacionais(W_{Sop}));

Se o resultado deste teste for $\cos\varphi \geq (1 - \varepsilon_{cos})$, garante que todos os elementos errôneos fazem parte de S.

4.4.2. Verificação da Natureza do Erro (2ºestágio)

De posse dos conjuntos suspeitos de medidas (convencionais e PMUs) e/ou posicionamento de disjuntores aplicou-se o teste geométrico, no que caracteriza o segundo estágio da metodologia, a fim de verificar o tipo de erro presente no sistema. Neste estágio primeiramente o conjunto de suspeitos, S, é dividido em dois subconjuntos S_m (conjunto suspeito de medidas) e S_{op} (conjunto suspeito de restrições operacionais), definidos na Seção 4.2.

Aplica-se o teste geométrico para cada subconjunto. A partir da Eq. (4.23), conclui-se que o teste do cosseno aplicado ao conjunto suspeito de medidas pode ser descrito por:

$$\cos\varphi_{Sm} = \sqrt{\frac{\lambda_{Sm}^T (W_{Sm} S_m)^{-1} \lambda_{Sm}}{(\lambda^T R \lambda)}} \quad (4.27)$$

onde:

λ_{Sm} : vetor contendo todos os multiplicadores de Lagrange relacionados as medidas analógicas suspeitas;

W_{Sm} : matriz de covariância dos multiplicadores de Lagrange relacionados as medidas.

Analogamente, o teste geométrico para o conjunto dos suspeitos das restrições operacionais (posicionamento dos disjuntores) é dado por:

$$\cos\varphi_{Sop} = \sqrt{\frac{\lambda_{Sop}^T (W_{Sop})^{-1} \lambda_{Sop}}{(\lambda^T R \lambda)}} \quad (4.28)$$

onde:

λ_{Sop} : vetor contendo todos os multiplicadores de Lagrange relacionados aos elementos suspeitos das restrições operacionais;

W_{Sop} : matriz de covariância dos multiplicadores de Lagrange associados as restrições operacionais.

Se o conjunto S_m de medidas contiver todas as informações errôneas, e o conjunto S_{op} de restrições operacionais não contiver qualquer tipo de informação errônea tem-se que na equação:

$$\lambda = W_{S_m} \varepsilon_{S_m} \quad (4.29)$$

onde λ é colinear ao espaço vetorial de W_{S_m} , o que implica na presença apenas de erro grosseiro em medidas e o teste geométrico resulta em $\cos\varphi_{S_m} \geq (1 - \varepsilon_{cos})$ e $\cos\varphi_{S_{op}} < (1 - \varepsilon_{cos})$.

Por outro lado, se o conjunto S_{op} , de restrições operacionais contivesse todas as informações errôneas, e o conjunto S_m de medidas não contivesse qualquer tipo de informação errônea, ter-se-ia:

$$\lambda = W_{S_{op}} \varepsilon_{S_{op}} \quad (4.30)$$

Com λ colinear ao espaço vetorial de $W_{S_{op}}$, o que implicaria na presença apenas de erro de topologia e o teste geométrico resultaria em $\cos\varphi_{S_{op}} \geq (1 - \varepsilon_{cos})$ e $\cos\varphi_{S_m} < (1 - \varepsilon_{cos})$.

No entanto, devido ao forte impacto causado no sistema pelos erros de topologia, essa constatação é raramente verificada, impedindo a avaliação direta, a partir do teste do cosseno, da natureza do erro quando da ocorrência de erros de topologia. Ou seja, o teste geométrico pode indicar a ocorrência isolada de erro em medida ou indicar a presença de erro de topologia. No segundo caso, não é possível afirmar se o erro de topologia ocorre de forma isolada ou simultaneamente com erro em medida.

Sendo assim, o algoritmo proposto nesse trabalho, apresentado na subseção 4.4.4, considera que caso $\cos\varphi_{S_{op}} \geq (1 - \varepsilon_{cos})$, parte-se para o processo de identificação de erro de topologia. A verificação e eliminação da informação operacional errônea (3º estágio) e posterior re-estimação de estados confirmam se há presença exclusiva de erro de topologia ou se há erro também em medidas analógicas, caracterizando presença simultânea de erros.

4.4.3. Verificações Informações Errôneas a Partir de Sua Natureza (3º estágio)

Com a informação do tipo do erro obtida, a próxima etapa consiste em aplicar o teste do cosseno no conjunto reduzido dos suspeitos, a fim de identificar as informações errôneas. Nesse estágio, retira-se uma informação do conjunto suspeito e verificam as informações remanescentes do conjunto reduzido através do teste do cosseno. As informações erroneamente modeladas são obtidas por:

$$\cos\varphi_{red} = \sqrt{\frac{\lambda_{red}^T (W_{red})^{-1} \lambda_{red}}{(\lambda^T R \lambda)}} \quad (4.31)$$

onde:

λ_{red} : vetor contendo as informações suspeitas de medidas e/ou topologia, exceto pela informação a ser verificada;

W_{red} : matriz de covariância dos multiplicadores de Lagrange associados às restrições operacionais e/ou medidas analógicas, exceto pela informação analisada;

Se $\cos\varphi_{red} \geq (1 - \varepsilon_{cos})$, implica que a informação retirada do conjunto dos suspeitos não contém erro, ao passo que se $\cos\varphi_{red} < (1 - \varepsilon_{cos})$, implica que a informação retirada contém erro, e deve retornar ao conjunto dos suspeitos. As informações são verificadas uma a uma a fim de restarem no conjunto suspeito apenas as informações errôneas.

4.5. Algoritmo Implementado (EEG)

Essa seção descreve as principais etapas que compõem o processamento de erros baseado na aplicação do teste geométrico em três estágios, discutido na seção anterior. O algoritmo de processamento de erros proposto nesse trabalho considera a possibilidade de erros grosseiros em medida e erros de topologia, ocorrendo de forma isolada ou simultaneamente. O algoritmo é aplicado à subrede relevante previamente definida como descrito em (COELHO, 2007).

Etapa 1: Plataforma de estudos EEG

Nesta etapa primeiramente é selecionado o tipo de sistema teste a ser analisado.

- Preparação de dados;
- Verificação da presença de ilhas ou barras isoladas no sistema e se houver são atribuídas as referências para as ilhas e/ou barras isoladas;
- Simulação do fluxo de potência linearizado no nível de subestação;
- Montagem do vetor de medidas perfeitas de acordo com o plano de medição definido;
- Inserção de erros aleatórios de pequena magnitude ao vetor de medidas, anteriormente montado, para simular medidas da rede.

Etapa 2: Opção para inserção de erros

Devem ser inseridos, se desejado:

- Erros em medidas;
- Erros de topologia;
- Ambos os erros: de topologia e em medidas;

Etapa 3: Verificação de informação *a priori*

- Se não considerar informação *a priori* o programa verifica a existência de ilhas e barras isoladas no sistema e atribui as potências de referência nas ilhas e barras isoladas
- Se considerar o uso de informação *a priori*, o processo de estimação de estados prossegue.

Etapa 4: Estimador de estados generalizado

Efetua a montagem da matriz Jacobiana H e processa a estimação de estado no nível de seção de barras. Segue para Etapa 5.

Etapa 5: Detecção de Erro

Determina MLN a partir da Eq. (2.49). Faz-se $\lambda_{max}^N = \max |\lambda^N|$:

- Se $|\lambda_{max}^N| < \lambda_t$ finaliza o processo. Caso contrário acusa presença de erro e segue para Etapa 6;

Etapa 6: Determina os conjuntos suspeitos S, S_m , e S_{op} , monitorando os MLN associados às medidas e às restrições operacionais, ou seja:

- Se $|\lambda_{m,i}^N| > \lambda_t$ a medida *i* é selecionada como suspeita e colocada em S e S_m ;
- Se $|\lambda_{op,i}^N| > \lambda_t$ restrição operacional *i* é selecionada como suspeita e colocada em S e S_{op} . Segue para Etapa 7;

Etapa 7: Confirmação da seleção de todas as informações errôneas como suspeitas a partir da aplicação da Eq. (4.26):

- Se $\cos\varphi \geq (1 - \varepsilon_{\cos})$ todos os suspeitos estão no conjunto. Segue para Etapa 8;
- Caso contrário, reduz o limiar λ_t e volta a Etapa 6;

Etapa 8: Determina $\cos\varphi_{op}$ e $\cos\varphi_m$ utilizando as Equações: 4.27 e 4.28

-Se $(\cos\varphi_{Sm} \geq (1 - \varepsilon_{cos})) \& (\cos\varphi_{Sop} \ll (1 - \varepsilon_{cos}))$: conclui-se pela presença exclusiva de erro em medidas. Segue para Etapa 9;

-Se $(\cos\varphi_{Sop} \geq (1 - \varepsilon_{cos})) \& (\cos\varphi_{Sm} \ll (1 - \varepsilon_{cos}))$: pode-se garantir a presença exclusiva de erro de topologia. Segue para Etapa 10;

-Se $(\cos\varphi_{Sm} \geq (1 - \varepsilon_{cos})) \& (\cos\varphi_{Sop} \geq (1 - \varepsilon_{cos}))$: conclui-se pela presença de erro de topologia. Porém, uma verificação complementar será aplicada para confirmar a presença ou não de erro em medida. Segue para Etapa 10.

Etapa 9: Identificação das medidas errôneas:

Retira uma medida do conjunto S_{ms} e recalcula o valor do cosseno do conjunto reduzido:

- Se $\cos\varphi_{m_red} \geq (1 - \varepsilon_{cos})$: informação retirada não contém erro e deve ser eliminada do conjunto suspeito;

-Se $\cos\varphi_{m_red} < (1 - \varepsilon_{cos})$: informação retirada contém erro, deve retornar ao conjunto suspeito;

Elimina ou corrige medidas errôneas, re-estima os estados e volta a Etapa 7.

Etapa 10: Identificação das restrições operacionais errôneas idêntica ao procedimento da Etapa 9 para o conjunto S_{op} :

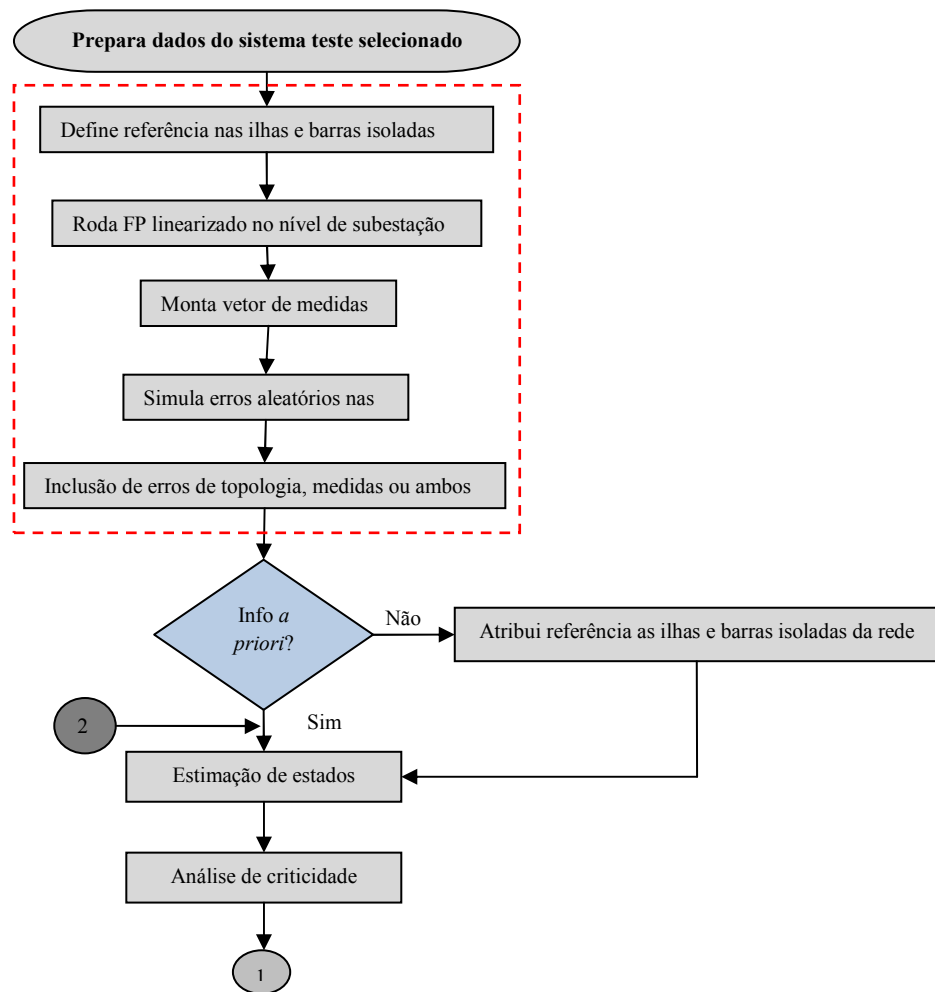
-Se $\cos\varphi_{op_red} \geq (1 - \varepsilon_{cos})$: informação retirada não contém erro e deve ser eliminada do conjunto suspeito;

-Se $\cos\varphi_{op_red} < (1 - \varepsilon_{cos})$: informação retirada contém erro, deve retornar ao conjunto suspeito;

Elimina-se o erro de topologia, re-estima os estado e segue para Etapa 5. Se não detectar erro em medidas, implica que há presença exclusiva de erro de topologia, caso contrário, conclui-se pela presença simultânea de erros;

Etapa 11: Fim.

O fluxograma que ilustra o algoritmo descrito é apresentado pela Figura 4.3 a seguir:



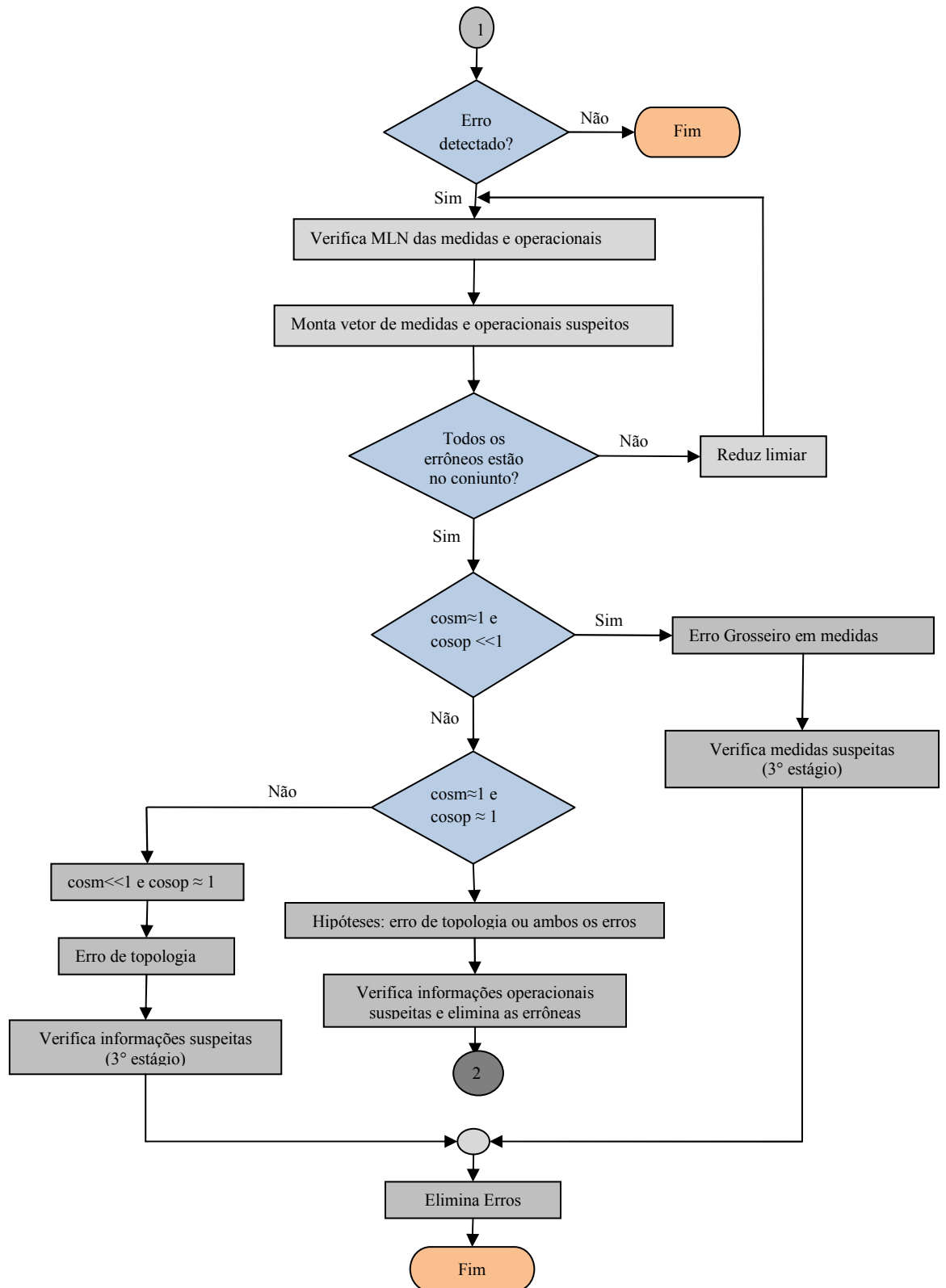


Figura 4.3: Fluxograma do algoritmo implementado

4.6. Considerações Finais do Capítulo

Neste capítulo foi descrita a metodologia proposta para o processamento simultâneo de erros grosseiros em medidas e erros de topologia na estimação de estados generalizada, onde se pode observar a importância da aplicação do teste geométrico para tal finalidade conjuntamente aos MLN.

Os problemas de criticidade em medidas merecem bastante destaque, pois se não forem corretamente solucionados o desempenho do algoritmo para verificação da natureza do erro fica completamente comprometido, pois medidas críticas que formam conjuntos críticos entre si geram uma propagação de erros não permitindo que se identifique corretamente qual a medida portadora do erro, impedindo assim a verificação da natureza do erro. No Capítulo 5, de resultados, é possível verificar a importância da verificação da criticidade em medidas.

O algoritmo apresentado mostra a nova metodologia proposta para verificação da natureza do erro, que pode resultar em erro grosseiro em medidas e no caso da presença de erros de topologia ou presença simultânea de erro de topologia e erro em medidas requer uma verificação complementar. Esse problema é tratado no terceiro estágio, onde se verifica a informação topológica que contém erro, seguida da re-estimação dos estados para, só então, concluir pela presença de erros exclusivo de topologia ou simultâneo.

CAPÍTULO 5

5. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados das simulações referentes à implementação da metodologia de processamento de erros simultâneos desenvolvida neste trabalho. O desenvolvimento deste trabalho foi realizado considerando o modelo linear da rede elétrica.

Os testes foram realizados com os sistemas teste de 24 e 30 barras do IEEE.

5.1. Sistema Teste 24 barras

As simulações para o sistema teste de 24 barras do IEEE estão divididas em dois casos: A e B. A Figura 5.1 apresenta o diagrama unifilar do sistema teste 24 barras do IEEE, onde as subestações analisadas no caso A estão circuladas em vermelho e as subestações analisadas para o caso B estão circuladas em verde.

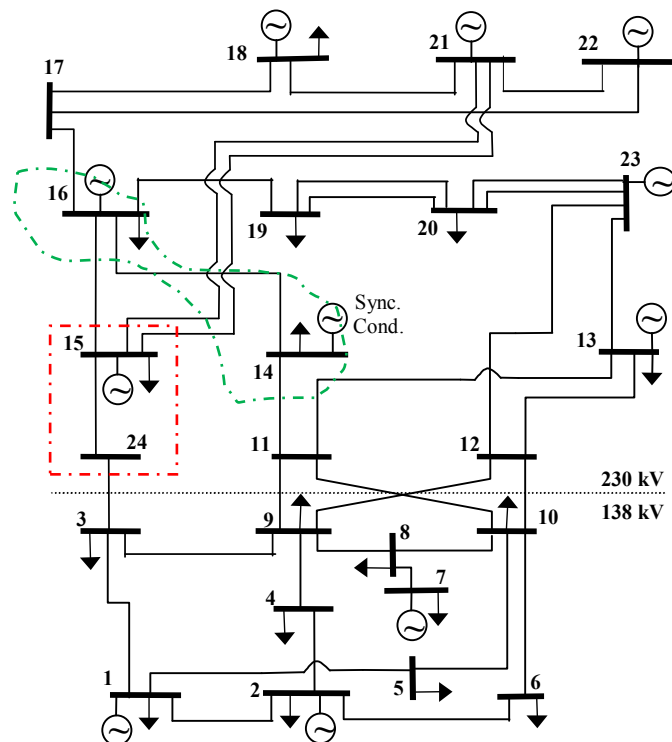


Figura 5.1: Diagrama unifilar sistema 24 barras do IEEE

5.1.1. Caso A

Para o caso A as subestações modeladas detalhadamente correspondem às barras 15 e 24 do sistema original mostrado na Figura 5.1. O plano de medição é o mesmo adotado em (LOURENÇO, 2004) acrescido de medidas de PMU nas barras 1, 2, 3, 6, 7 e 10, com canais de medida de corrente nos ramos 1-8, 1-15, 3-4, 3-9, 5-10, 6-7, 6-13, 7-8, 9-10, 2-13, 2-15 e 2-17. O valor adotado para $\varepsilon_{cos} = 0,2$ e o valor inicial do limiar $\lambda_t = 3$.

No caso das medidas analógicas convencionais consideradas neste trabalho, tem-se injeção de potência em todas as barras e medição de fluxo nas linhas de transmissão convencionais, considerações validas para os Casos A e B.

A sub-rede relevante correspondente ao caso A é mostrada na Figura 5.2. As posições dos medidores internos da SEs e condições de operação dos disjuntores são representadas na Figura 5.2

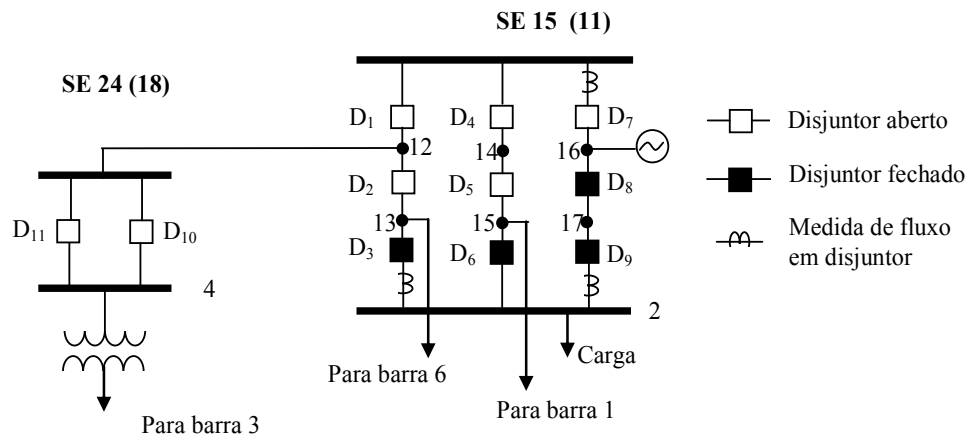


Figura 5.2: Sub-rede relevante subestações 15 e 24 (Caso A)

Os tipos de erros simulados para o Caso A foram : erro de topologia simples e múltiplos; erro em medidas, simples e múltiplos; e erros simultâneos. A notação de erro simples é feita quando da presença de erro em apenas uma informação, ou seja, pode ser erro em apenas um disjuntor ou erro em apenas uma medida. Os erros múltiplos referem-se à presença de erros em duas ou mais informações, ou seja, presença de erros em dois ou mais disjuntores ou erros em duas ou mais medidas caracteriza presença de erros múltiplos. A seguir são detalhados os tipos e as localizações dos erros para o Caso A.

Erros de topologia

Os erros de topologia simulados para o caso A, são aqui separados em A1 e A2 a fim de permitir uma melhor visualização, a descrição de cada erro é descrita a seguir:

- **A1:** erro de exclusão simples, onde a informação do disjuntor D_6 que está fechado é repassada ao estimador como se estivesse aberto;
- **A2:** erro de inclusão múltiplo, envolvendo os disjuntores D_1 , D_7 e D_{10} , que a princípio estavam abertos e foram assumidos pelo estimador como fechados.

Tabela 5.1: Condições operacionais para as simulações de erros de topologia Caso A

Tipo de Erro	Disjuntores Errôneos	Posicionamento Correto	Posicionamento Simulado
A1	D_6	Fechado	Aberto
A2	D_1, D_7, D_{10}	Aberto	Fechado

Erros em medidas

Os erros em medidas foram simulados considerando uma porcentagem de incerteza de 50% sobre o valor das quantidades medidas, tal como adotado em (IRVING, 2009). Esses erros correspondem de 6 a 8 desvios padrão (σ), os quais caracterizam um erro grosseiro, uma vez que medidas com erros grosseiros apresentam desvio padrão na faixa de 3σ a 20σ . Para simular os erros em medidas são inseridas as porcentagens de incertezas no vetor z , que corresponde ao vetor medidas montado pelo gerador de medidas.

Os erros em medidas simulados para o caso A são:

- erro simples no fluxo de potência no ramo 1-15;
- erro simples de injeção na barra 1;
- erro múltiplo (fluxo no ramo 1-15 e injeção na barra 1);
- erros nos canais de PMU que coletam medidas nos ramos 1-15 e 3-9, a fim de verificar a detecção de erros em medidas de PMU.

A Tabela 5.2 apresenta os erros em medidas simulados para o Caso A

Tabela 5.2: Erros em medidas simulados para o Caso A

Tipo de Erro	Medida errônea	Valor Correto	Valor Simulado
Fluxo Ramo 1-15	$z(3)$	3,307	4,960
Injeção Barra 1	$z(45)$	4,755	2,377
Fluxo e injeção	$z(3)$ $z(45)$	3,307 4,755	4,960 2,377
Canais de PMU Ramos 1-15 e 3-9	$z(63)$ $z(65)$	3,308 -1,420	4,961 -2,130

Presença Simultânea de Erros

A avaliação do desempenho do método na ocorrência simultânea de erro em medida e topologia foi realizada através de diversas simulações. Primeiramente foi verificada a presença de erro simples de topologia, excluindo D₆ juntamente com erro simples de medida de fluxo no ramo 1-15. Posteriormente foi simulada presença de erros múltiplos de topologia, onde os disjuntores D₁, D₇ e D₁₀ que inicialmente encontram-se abertos são simulados fechados conjuntamente com a presença de erros múltiplos em medidas: erro de fluxo no ramo 1-15 e erro de injeção na barra 1.

5.1.2. Resultados: Caso A

Nesta subseção são apresentados os principais resultados obtidos nas simulações dos erros citados na seção anterior.

Para o primeiro estágio do teste geométrico aplicado aos erros de topologia tem-se os resultados apresentados na Tabela 5.3. É possível observar na coluna 3 os disjuntores selecionados como suspeitos no primeiro estágio da simulação de erros de topologia para o Caso A e na coluna 4 são apresentados os valores dos MLNs associados aos disjuntores suspeitos:

Tabela 5.3: Resultados dos disjuntores suspeitos selecionados no primeiro estágio para o caso A

Tipo de Erro	Disjuntores Errôneos	Disjuntores Suspeitos	Módulos dos MLNs associados aos disjuntores suspeitos
A1	D ₆ Ramo 2-15	2-15; 14-15	5429,4 4,5
A2	D ₁ , D ₇ , D ₁₀ Ramos: 11-12; 11-16; 4-18	11 -12 2- 13 12 - 13 2-15 11-16 2-17 6-17 4-18 4-18	4748,9 1207,6 903,3 46,9 4748,9 4748,9 4748,9 4748,9 349,1

Pela seleção dos disjuntores suspeitos apresentados na coluna 3 em comparação aos disjuntores errôneos simulados e apresentados na coluna 2 da Tabela 5.3, pode-se observar

que os elementos errôneos foram corretamente selecionados dentre os elementos suspeitos no primeiro estágio para o Caso A.

Analisando-se a coluna 4 da mesma tabela pode-se observar que há existência de conjunto crítico, pois há valores de MLNs iguais entre si.

A Tabela 5.4 apresenta os principais resultados obtidos no segundo estágio do teste do cosseno, considerando a ocorrência isolada de erros de topologia para o Caso A de acordo com a descrição apresentada na Tabela 5.1. São apresentados nas colunas 3 e 4 os valores máximos dos MLN associados às medidas e restrições operacionais, respectivamente e os valores dos cossenos obtidos no segundo estágio do teste geométrico podem ser vistos nas colunas 5 e 6. Resultados estes correspondentes à Etapa 8 do algoritmo proposto na Seção 4.5 do capítulo 4.

Tabela 5.4: Resultados para o segundo estágio considerando apenas erros de topologia para o Caso A

Erro de topologia		MLN e teste geométrico			
Tipo	Descrição	$ \lambda_m^N _{max}$	$ \lambda_{op}^N _{max}$	$cos\varphi_{Sm}$	$cos\varphi_{Sop}$
A1	simples	$2,34 \cdot 10^3$	$5,42 \cdot 10^3$	0,792	1,00
A2	múltiplo	$1,98 \cdot 10^3$	$4,74 \cdot 10^3$	0,750	1,00

Pode-se observar que de acordo com o algoritmo proposto o teste geométrico é capaz de identificar a natureza exclusiva de erros de topologia para as simulações do Caso A, como pode ser visto nas colunas 5 e 6 da Tabela 5.4, considerando que o limite de verificação é $cos\varphi_{Sm} = 0,8$, pois $\varepsilon_{cos} = 0,2$, e os resultados obtidos para $cos\varphi_{Sm}$ estão dentro do limite, caracterizando identificação correta de erros de topologia.

Os elevados valores associados ao conjunto de medidas suspeitas são esperados devido ao efeito dos erros de topologia sobre as medidas, conforme discutido no capítulo anterior.

Os principais resultados para as simulações de erros unicamente em medidas para o caso A são apresentados na Tabela 5.5. Resultados estes correspondentes à Etapa 8 do algoritmo proposto na Seção 4.5 do capítulo 4.

Os valores dos cossenos apresentados pelas colunas 5 e 6 da Tabela 5.5 mostram que, o teste geométrico facilmente identifica a natureza do erro como erro exclusivo em medidas para o Caso A do sistema teste de 24 barras, pois $cos\varphi_{Sop} \ll 1$, de acordo com algoritmo proposto.

Tabela 5.5: Resultados para o segundo estágio considerando apenas erros em medidas para o Caso A

Erro grosseiro em medida		MLN e teste geométrico			
Tipo	Descrição	$ \lambda_{m,max}^N $	$ \lambda_{op,max}^N $	$\cos\varphi_{Sm}$	$\cos\varphi_{Sop}$
Fluxo	Simple	$1,11 \cdot 10^3$	232,98	0,999	0,209
Injeção	Simple	$1,23 \cdot 10^3$	56,46	0,999	0,045
Injeção e fluxo	Múltiplo	$1,34 \cdot 10^3$	176,4	1,00	0,101
Canais de PMU	Múltiplo	$1,11 \cdot 10^3$	233,29	1,00	0,184

Quanto à presença de erros em medidas nos canais de PMU, pode-se observar na última linha da Tabela 5.5 que os erros em informações provenientes de PMUs são corretamente detectados e tiveram sua natureza (erro em medida) definida corretamente.

Os resultados da aplicação do segundo estágio do teste geométrico na presença de erros simultâneos, de acordo com a Etapa 8 do algoritmo apresentado na seção 4.5 do capítulo 4, são apresentados na Tabela 5.6:

Tabela 5.6: Resultados para erros simultâneos simulados para o caso A

Presença simultânea de erros		MLN e teste geométrico			
Informações Errôneas		$ \lambda_{m,max}^N $	$ \lambda_{op,max}^N $	$\cos\varphi_{Sm}$	$\cos\varphi_{Sop}$
Topologia	Medidas				
D ₆	z(3)	$3,51 \cdot 10^3$	$5,93 \cdot 10^3$	0,921	0,984
D ₁ , D ₇ , D ₁₀	z(3) e z(45)	$2,38 \cdot 10^3$	$5,89 \cdot 10^3$	0,861	0,987

Os valores obtidos para o teste geométrico e mostrados nas colunas 5 e 6, permitem observar que o algoritmo proposto na seção 4.5 do capítulo 4 é capaz de identificar corretamente a natureza de todos os erros graças à inclusão da 3ª etapa do teste geométrico, que apesar de incluir uma re-estimação adicional dos estados, é essencial para eficácia da metodologia proposta.

Pode-se observar pela Tabela 5.6 que todos os valores dos cossenos, tanto para medidas quanto para restrições operacionais, são superiores ao limite de $\cos\varphi_i = 0,8$, sendo necessário então executar as Etapas 10 e 2 do algoritmo proposto, que caracteriza o processo de re-estimação. Neste processo de re-estimação, primeiramente verifica onde há erro de topologia, posteriormente as informações errôneas de topologia são

eliminadas e o estimador roda, verificando a presença de erros em medidas, caracterizando presença simultânea de erros. A Tabela 5.7 mostra a etapa de localização do erro de topologia:

Tabela 5.7: Localização erro de topologia para o caso A

Presença simultânea de erros		Seleção MLN e ramo disjuntor errôneos	
Informações Errôneas		$ \lambda_{op_erroneo}^N $	<i>ramo disjuntor erroneo</i>
Topologia	Medidas	6,8178. 10 ³	2-15
D ₆	z(3)		
D ₁ , D ₇ , D ₁₀	z(3) e z(45)	5,6368. 10 ³	11-12;

Pode-se observar que para presença simultânea de erros D₆ e z(3) o algoritmo localizou corretamente o ramo do disjuntor errôneo.

Porém, para presença simultânea de erros de D₁, D₇, D₁₀, z(3) e z(45), pode-se observar que a etapa de detecção da (s) informação (s) topológica (s) errônea (s) retornou apenas um valor pra MLN errôneo e apenas um disjuntor errôneo, isso se deve ao fato dos três disjuntores selecionados como errôneos, inicialmente, pertencerem a um mesmo conjunto crítico, como já fora explicado, para aplicação do teste do cosseno exclui-se elementos de conjuntos críticos iguais entre si, deixando apenas um representante de cada conjunto. Sendo assim as informações dos ramos dos outros disjuntores errôneos foram excluídas e por isso não são detectadas nesta etapa do algoritmo, mas esse fato não interfere na qualidade do algoritmo e vem para corroborar o que fora descrito em (CLEMENTS e outros, 1981).

Após detectar a informação topológica errônea a próxima etapa consiste na exclusão de tais informações e posterior re-estimação de estados que resulta em apenas erro grosseiro em medidas, identificando o posicionamento e valor da medida errônea, como mostrado na primeira coluna da Tabela 5.8. Os valores dos MLNs associados às medidas selecionadas como errôneas e o teste geométrico a eles associados também podem ser vistos na Tabela 5.8.

Tabela 5.8: Identificação das medidas errôneas para o caso A

Apenas erro em medidas	MLN errôneo e teste geométrico		
Informações Errôneas Detectadas	$ \lambda_m^N\ erroneo $	$\cos\varphi_{Sm}$	$\cos\varphi_{Sop}$
z(3) = 4,960	1,1143.10 ³	0,999	0,2097
z(3) = 4,960 z(45) = 2,377	-1.3450.10 ³ 1.2398.10 ³	1,000	0,103

Donde pode-se concluir que há presença simultânea de erros.

A verificação da aplicação do terceiro estágio do teste do cosseno através do algoritmo proposto, correspondente a execução da Etapa 9 (quando há erros somente em medidas) ou execução da Etapa 10 (quando há erro de topologia ou presença simultânea de erros), foi realizada considerando os erros de topologia e erros em medidas apresentados nas tabelas 5.1 e 5.2. A Tabela 5.9 mostra os resultados obtidos no terceiro estágio para o Caso A tanto para erro de topologia, quanto para erros em medidas.

Tabela 5. 9: Resultados do terceiro estágio para o Caso A

Erro de topologia				
Tipo	Descrição	Disjuntor errôneo	$ \lambda_{op_erroneo}^N $	$\cos\varphi_{op_red}$
A1	Simple	D ₆	$5,42 \cdot 10^3$	1,00
A2	Múltiplo	D ₁ , D ₇ , D ₁₀	$5,51 \cdot 10^3$ $6,47 \cdot 10^3$ -	0,92
Erros em medidas				
Tipo	Descrição	Medida errônea	$ \lambda_{m_erronea}^N $	$\cos\varphi_{m_red}$
injeção	Simple	z(45)	$1,19 \cdot 10^3$	1,00
Fluxo e injeção	Múltiplo	z(3) z(45)	$1,35 \cdot 10^3$ $1,26 \cdot 10^3$	0,999

Pela tabela 5.9 pode-se observar que no caso de erro de topologia A1 (exclusão de D₆) e para os erros em medidas simples (injeção na barra 1) e múltiplos (fluxo no ramo 1-15 e injeção na barra 1), o terceiro estágio detectou corretamente as informações errôneas, de acordo com os MLNs mostrados na coluna 4 e pelos valores resultantes do teste geométrico apresentados na coluna 5 com valores próximos de 1.

Porém, para a presença do erro múltiplo de inclusão A2, mostrado na linha 2 da Tabela 5.9, o terceiro estágio não detectou as três informações errôneas, necessitando de uma nova etapa de estimação, onde após essa etapa é possível detectar a última informação errônea de forma correta, resultando em $\cos\varphi_{op_red}$ próximo de 1.

Esta particularidade é devida a presença de conjunto crítico nas informações. Como se pode observar na coluna 4 da Tabela 5.3 há presença de conjunto crítico para o erro A2, onde através da análise dos MLNs associados aos elementos suspeitos pode-se verificar λ^{ts} iguais entre si. O conjunto dos módulos dos MLNs associados aos disjuntores suspeitos para o erro A2 é [4748,9; 1207,6 ; 903,3 ; 46,9 ; 4748,9 ; 4748,9 ; 4748,9 ; 4748,9 ; 349,1]

O teste do cosseno, apresentado neste trabalho, é aplicado ao conjunto dos MLNs reduzidos, ou seja, ao conjunto com apenas uma medida representante de cada conjunto

crítico, sendo assim não há como saber qual informação de fato é a errônea, como provado por (CLEMENTS e outros, 1981). O disjuntor D_{10} faz parte de um conjunto crítico, provavelmente seu valor associado foi excluído para aplicação do teste do cosseno, o que explica a não seleção do MLN errôneo associado ao elemento e a necessidade de uma nova verificação.

5.1.3. *Análise presença de PMUs no Processamento Simultâneo de Erros*

A Tabela 5.10 apresenta uma constatação preliminar da relevância da inclusão de PMUs na redução da criticidade de restrições operacionais, mencionada no capítulo 3.

Tabela 5.10: MLNs das restrições operacionais com e sem PMU para o caso A considerando erro simples de topologia

PMU	MLN Associados à algumas restrições operacionais									
	Disj.	11-12	12-13	2-13	11-14	14-15	2-15	11-16	16-17	2-17
Não		-0,610	0,00	-1,63	5,42	1,79	4,52	-1,04	0,00	0,00
Sim		-0,850	-12,4	-1,74	$6,38 \cdot 10^{-3}$	2,46	6,29	-1,30	0,00	0,00

Pode-se observar para o Caso A que para alguns disjuntores o problema de criticidade não foi resolvido, como observado nas colunas 10 e 11 correspondentes aos disjuntores 16-17 e 2-17. Isso ocorre devido ao número de canais de PMUs conectados, quanto mais PMUs com seus canais conectados, mais dados são coletados, aumentando a redundância e melhorando o problema de restrições operacionais críticas, no entanto eliminar todas as informações críticas aumentando-se o número de PMUs no sistema é financeiramente inviável. Além de acarretar na presença de um número muito elevado de PMUs.

5.1.4. *Caso B*

No caso B as subestações modeladas no nível de seção de barras são as 14 e 16. O plano de medição é o mesmo adotado em (LOURENÇO 2004), acrescido de medidas de PMU nas barras 1, 8, 9, 10 e 11, com canais de medida de corrente nos ramos 1-9, 1-12, 5-8, 8-9, 7-10, 6-11 e 10-11. A Figura 5.3 ilustra a sub-rede do Caso B. As posições dos medidores internos da SEs e condições de operação dos disjuntores são representadas na Figura 5.3.

apresentam desvio padrão na faixa de 3σ a 20σ . Para simular os erros em medidas são inseridas as porcentagens de incertezas no vetor z , que corresponde ao vetor medidas montado pelo gerador de medidas. Para o caso B os erros em medidas simulados são:

- a) erro simples de fluxo de potência no ramo 1-9;
- b) erro múltiplo de injeção de potência nas barras 1, 3 e 17;
- c) erros simulados nos canais de PMU, nos ramos 1-12, 7-10 e 6-11.

A Tabela 5.12 apresenta os erros em medidas simulados para o Caso B.

Onde a coluna 2 da Tabela 5.12 mostra as posições das medidas simuladas no vetor de medidas z , a coluna 3 mostra os valores corretos obtidos do vetor z e a coluna 4 da mesma tabela mostra os valores simulados no processo de estimação com valores de erros inseridos no vetor das medidas.

Tabela 5.12: Erros em medidas simulados para o Caso B

Tipo de Erro	Medida errônea	Valor Correto	Valor Simulado
Fluxo Ramo 1-9	$z(2)$	0,793	1,190
Injeção (múltiplo) Barras 1, 3 e 17	$z(19)$	1,092	1.638
	$z(21)$	-0,885	-1.328
	$z(28)$	-2.940	-1,47
Canais de PMU Ramos 1-12; 7-10 e 6-11	$z(40)$	1,885	2,827
	$z(45)$	-0,5	-1,0
	$z(46)$	-1,3	-1,95

Presença Simultânea de Erros

A avaliação do desempenho do método na ocorrência simultânea de erro em medida e topologia foi realizada através de diversas simulações. A verificação inicial de presença simultânea de erros foi realizada pela simulação de presença de erro de exclusão em D8 juntamente com erro na medida pertencente ao ramo 1-9. A segunda simulação foi realizada pela presença de erro múltiplo de exclusão nos disjuntores D1e D5 e erro múltiplo nas medidas de injeção nas barras 1, 3 e 17.

5.1.5. Resultados: Caso B

Nesta subseção são apresentados os principais resultados obtidos nas simulações dos erros citados na seção anterior.

Na tabela 5.13 é possível observar os resultados do primeiro estágio para erros de topologia. A coluna 3 mostra os disjuntores selecionados como suspeitos no primeiro estágio da simulação de erros de topologia para o Caso B e na coluna 4 são apresentados os valores dos MLNs associados aos disjuntores suspeitos.

Pela seleção dos disjuntores suspeitos apresentados na coluna 3 em comparação aos disjuntores errôneos simulados e apresentados na coluna 2 da Tabela 5.13, pode-se observar que os elementos errôneos foram corretamente selecionados dentre os elementos suspeitos no primeiro estágio para o Caso B.

Tabela 5.13: Resultados dos disjuntores suspeitos selecionados no primeiro estágio para o Caso B

Tipo de Erro	Disjuntores Errôneos	Disjuntores Suspeitos	Módulos dos MLNs associados aos disjuntores suspeitos
B1	D ₈ , D ₉ , D ₁₀ Ramos: 6-13; 7-12; 12-13	10-11	77,0
		7-12	3528,9
		6 -13	3329,0
		12-13	1756,6
		14 -15	77,0
		16-18	106,7
B2	D ₁ , D ₅ Ramos: 6-15; 4-16	10-11	1732,8
		6-15	8,5
		2-13	1074,2
		14-15	4,0
		4-16	6,7
		16-18	5,5

Para os erros B1 e B2 simulados, observa-se que não há presença de conjuntos críticos, através da análise dos MLNs apresentados na coluna 4 da Tabela 5.13.

A Tabela 5.14 apresenta os principais resultados obtidos no segundo estágio do teste geométrico considerando a ocorrência isolada de erros de topologia para o Caso B de acordo com a descrição na Tabela 5.11. São apresentados nas colunas 3 e 4 os valores máximos dos MLN associados às medidas e restrições operacionais, respectivamente e os valores dos cossenos obtidos no segundo estágio do teste geométrico podem ser vistos nas colunas 5 e 6. Resultados estes correspondentes à Etapa 8 do algoritmo proposto na Seção 4.5 do capítulo 4.

Tabela 5.14: Resultados para o segundo estágio considerando apenas erros de topologia para o Caso B

Erro de topologia		MLN e teste geométrico			
Tipo	Descrição	$ \lambda_{m_max} $	$ \lambda_{op_max} $	$\cos\varphi_{Sm}$	$\cos\varphi_{Sop}$
B1	múltiplo	$2,34 \cdot 10^3$	$3,66 \cdot 10^3$	0,831	1,00
B2	múltiplo	$2,01 \cdot 10^3$	$1,59 \cdot 10^3$	0,878	1,00

Observa-se que para o caso B, os resultados obtidos para $\cos\varphi_{Sm}$ pelo teste geométrico, para as simulações de erros, estão fora do limite de tolerância, sendo necessário neste caso executar as Etapas 10 e 2 do algoritmo proposto, a fim de selecionar o(s) disjuntor(es) errôneo(s), eliminar tais erros e re-estimar os estados verificando se há erros em medidas analógicas ou apenas erros de topologia, como pode ser visto a seguir.

A seleção das informações topológicas errôneas, fornecidas pelo terceiro estágio são vistas na Tabela 5.15 a seguir:

Tabela 5.15: Localização erro de topologia para o caso B

Erro de topologia Caso B	MLN e disjuntores errôneos	
Informações Errôneas	$ \lambda_{op_erroneo}^N $	<i>ramo disjuntor erroneo</i>
D ₈ ,	$3,478 \cdot 10^3$	7-12
D ₉ ,	$3,680 \cdot 10^3$	6-13
D ₁₀	$3,965 \cdot 10^3$	12-13
D ₁ ,	7,418	4-16;
D ₅	10,963	6-15

Selecionado o(s) erro(s) de topologia e eliminado no terceiro estágio, são re-estimados os estados, constatando que não há erro de topologia ou erro grosseiro em medidas, donde pode-se concluir pela presença exclusiva de erro de topologia.

Os principais resultados para as simulações de erros unicamente em medidas para o caso e B são apresentados na Tabela 5.16. Resultados estes correspondentes à Etapa 8 do algoritmo proposto na Seção 4.5 do capítulo 4.

Os valores dos cossenos apresentados pelas colunas 5 e 6 da Tabela 5.16 mostram que, o teste geométrico facilmente identifica a natureza do erro como erro exclusivo em medidas para o caso B do sistema teste de 24 barras. Os erros em informações provenientes de PMUs são igualmente detectados e tiveram sua natureza definida corretamente, tal como observado para o caso A.

Tabela 5.16: Resultados para o segundo estágio considerando apenas erros em medidas para o Caso B

Erro grosseiro em medida		MLN e teste geométrico			
Tipo	Descrição	$ \lambda_{m_max}^N $	$ \lambda_{op_max}^N $	$\cos\varphi_{Sm}$	$\cos\varphi_{Sop}$
Fluxo	Simple	356,00	10,81	0,999	0,031
Injeção	Múltiplo	890,36	257,75	0,999	0,323
Canais de PMU	Múltiplo	783,19	188,55	0,999	0,285

Na presença simultânea de erros, os resultados obtidos pela Etapa 8 do algoritmo apresentado na seção 4.5 do capítulo 4, são apresentados na Tabela 5.17:

Tabela 5.17: Resultados para erros simultâneos simulados para o caso B

Presença simultânea de erros		MLN e teste geométrico			
Informações Errôneas		$ \lambda_{m_max}^N $	$ \lambda_{op_max}^N $	$\cos\varphi_{Sm}$	$\cos\varphi_{Sop}$
Topologia	Medidas				
D ₈	z(2)	1,16.10 ³	2,41.10 ³	0,879	0,989
D ₈ ,D ₉ ,D ₁₀	z(19), z(21), z(28)	2,01.10 ³	2,71.10 ³	0,865	0,966

Tal como verificado para presença simultânea de erros no Caso A, pode-se observar nas colunas 5 e 6 da tabela de resultados de erros simultâneos do Caso B, Tabela 5.17, que todos os valores dos cossenos, tanto para medidas quanto para restrições operacionais, são superiores ao limite de $\cos\varphi_i = 0,8$, sendo necessário então executar as Etapas 10 e 2 do algoritmo proposto, que caracteriza o processo de re-estimação.

Neste processo de re-estimação, tal como para o Caso A, primeiramente as informações errôneas de topologia são detectadas e eliminadas, no terceiro estágio do teste do cosseno e posteriormente o estimador roda novamente, verificando a presença de erros em medidas, o que caracteriza presença simultânea de erros. A Tabela 5.18 a seguir mostra a detecção das informações topológicas errôneas para o Caso B.

Tabela 5.18: Detecção informações topológicas errôneas para erros simultâneos simulados para o caso B

Presença simultânea de erros		Seleção MLN e ramo disjuntor errôneos	
Informações Errôneas		$ \lambda_{op_erroneo}^N $	<i>ramo disjuntor erroneo</i>
Topologia	Medidas		
D ₈	z(2)	2,419.10 ³	6-13
D ₈ ,D ₉ ,D ₁₀	z(19), z(21) e z(28)	3.398.10 ³	7-12
		3.851.10 ³	6-13
		4,063.10 ³	12-13

Posteriormente a eliminação dos disjuntores errôneos tem-se a detecção de apenas erro grosseiro em medidas, donde pode-se concluir pela presença simultânea de erros. Os resultados são mostrados na Tabela 5.19.

Tabela 5.19: Detecção das medidas errôneas para erros simultâneos simulados para o caso B

Apenas erro em medidas	MLN errôneo e teste geométrico		
Informações Errôneas Detectadas	$\lambda_{m_erroneo}^N$	$\cos\varphi_{Sm}$	$\cos\varphi_{Sop}$
$z(2) = 1,1904$	357,216	0,999	0,306
$z(19) = 1.638$ $z(21) = -1.328;$ $z(28) = -1.470;$	198,426 87,100 85,887	0,999	0,328

Os resultados obtidos para o terceiro estágio do teste geométrico para o Caso B, de acordo com as Etapas 9 (quando há erros somente em medidas) ou 10 (quando há erro de topologia ou presença simultânea de erros) do algoritmo proposto na seção 4.5 do capítulo 4, tanto para erro de topologia, quanto para medidas são mostrados na Tabela 5.20 a seguir:

Tabela 5.20: Resultados do terceiro estágio para o caso B

Erro de topologia				
Tipo	Descrição	Disjuntor errôneo	$\lambda_{op_erroneo}^N$	$\cos\varphi_{op_red}$
B1	Múltiplo	D ₈ , D ₉ , D ₁₀	$3,47 \cdot 10^3$ $3,68 \cdot 10^3$ $1.82 \cdot 10^3$	0,912
B2	Múltiplo	D ₁ , D ₅	7.42 10.96	1,00
Erros em medidas				
Tipo	Descrição	Medida errônea	$\lambda_{m_erronea}^N$	$\cos\varphi_{m_red}$
Simple	fluxo	$z(2)$	356.4317	0,999
Múltiplo	Fluxo e injeção	$z(19)$ $z(21)$ $z(28)$	890.21 404.79 417.77	0,929

Pela Tabela 5.20, pode-se observar nas colunas 4 e 5 que o terceiro estágio identifica corretamente as informações errôneas no conjunto dos suspeitos e neste caso não houve qualquer particularidade, pois como observado na coluna 4 da Tabela 5.13 para este caso não há presença de conjuntos críticos.

5.1.6. Análise presença de PMUs no Processamento Simultâneo de Erros

Assim como a Tabela 5.10, a Tabela 5.21 apresenta alguns resultados dos MLNs associados às restrições operacionais para o caso B, com e sem a presença de PMUs.

Tabela 5.21: MLNs das restrições operacionais com e sem PMU para o caso B considerando erro de topologia múltiplo

PMU	MLN Associados à algumas restrições operacionais							
	Disj.	7-10	6-11	10-11	7-12	6-13	7-14	6-15
Não	0,00	0,00	$1,73 \cdot 10^3$	0,00	0,00	0,00	0,00	-8,52
Sim	-1,06	-2,27	$9,29 \cdot 10^2$	1,06	$2,27 \cdot 10^1$	0,00	0,00	$-1,09 \cdot 10^1$

Nota-se que os valores dos MLNs associados à restrição operacional do disjuntor 7-14 apresentaram valor nulo tanto sem PMUs como com a inclusão estratégica de PMUs no sistema. No entanto, as outras informações críticas foram eliminadas com a presença das PMUs, como pode ser observado nas colunas 2, 3, 5 e 6 da Tabela 5.21.

Estes resultados permitem concluir que a alocação de PMUs no sistema contribui de forma positiva para atenuação de informações operacionais críticas, o que acarreta um impacto direto no processamento de erros de topologia.

5.2. Sistema de 30 barras do IEEE

As simulações realizadas para este sistema teste de 30 barras foram realizadas focando as subestações 12 e 15. Duas condições de operação distintas foram consideradas para as simulações deste caso. O plano de medição e as condições de operação são os mesmos adotados em (LOURENÇO e outros, 2008). Para estas simulações, a fim de verificar a eficiência da metodologia proposta, em comparação a alguns resultados apresentados em (LOURENÇO e outros, 2008) não foram incluídas as PMUs.

O valor adotado para $\varepsilon_{cos} = 0,1$ e o valor inicial adotado para o limiar foi o padrão $\lambda_t = 3$. A Figura 5.4, mostra o diagrama unifilar do sistema teste 30 barras do IEEE, destacando as subestações 12 e 15 pertencentes à sub-rede relevante.

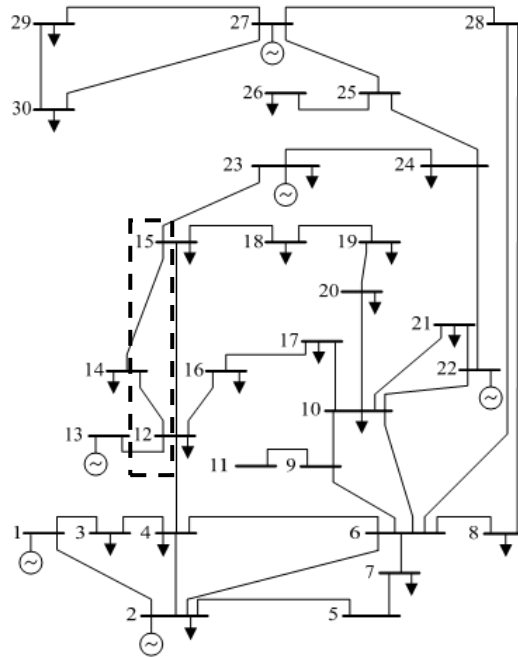


Figura 5.4: Diagrama unifilar sistema 30 barras do IEEE

A sub-rede relevante pertencente ao caso simulado para a primeira condição de simulação (CO1) é mostrada na Figura 5.5 e a sub-rede relevante pertencente ao caso simulado para a segunda condição de simulação (CO2) é mostrada na Figura 5.6. As posições dos medidores internos das SEs e condições de operação dos disjuntores são representadas nas figuras 5.5 e 5.6.

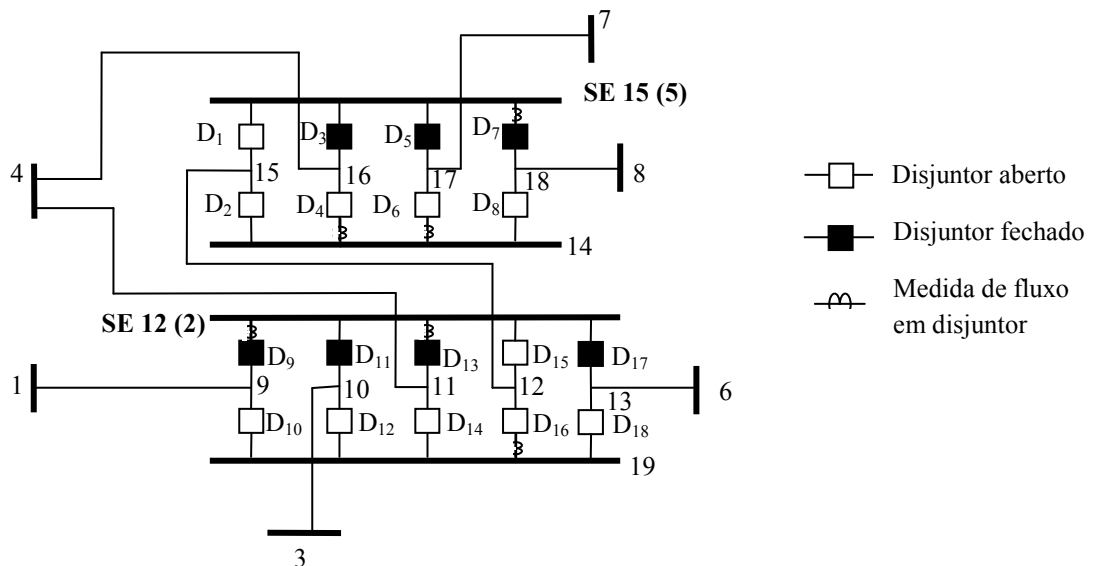


Figura 5.5: Sub-rede relevante condição de operação 1 (CO1)

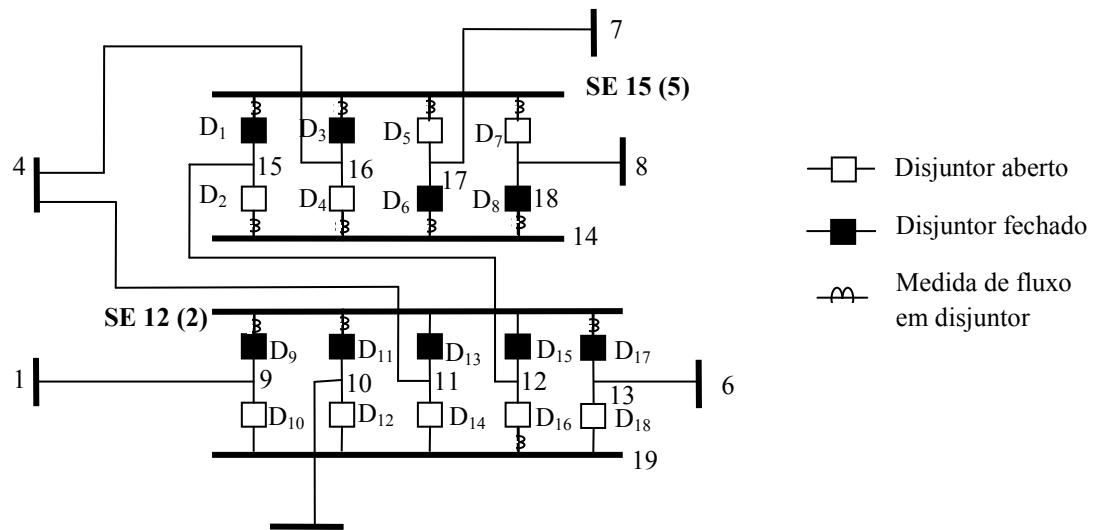


Figura 5.6: Sub-rede relevante condição de operação 2 (CO2)

Os tipos e localizações dos erros simulados para o sistema teste de 30 barras são descritos detalhadamente a seguir.

Erros de Topologia

Os erros de topologia simulados para CO1 foram erro simples de exclusão do disjuntor D_9 , que tem seu posicionamento real fechado, mas é passado ao estimador posicionamento aberto e erro múltiplo de inclusão de D_1 e D_{17} , que tem seus status reais fechados e simulados como se estivessem abertos.

Para CO2 os erros simulados foram erro múltiplo de exclusão de D_1 , D_{15} e erro de bus split, excluindo D_6 e D_8 e inserindo D_5 e D_7 ao processo de estimação. As condições de simulação para CO1 e CO2 são apresentadas na Tabela 5.22.

Tabela 5.22: Condições operacionais para as simulações de erros de topologia para CO1 e CO2

Condição de operação	Tipo de Erro	Disjuntores Errôneos	Posicionamento Correto	Posicionamento Simulado
1	Exclusão	D_9	Fechado	Aberto
	Inclusão	D_{17}, D_1	Aberto	Fechado
2	Exclusão	D_{15}, D_1	Fechado	Aberto
	Bus Split	D_5	Aberto	Fechado
		D_7	Aberto	Fechado
		D_6, D_8	Fechado	Aberto
			Fechado	Aberto

Erros em medidas

Os erros em medidas simulados são apresentados na Tabela 5.23 e reproduzem alguns dos casos simulados em (LOURENÇO e outros, 2008). Para CO1, tem-se erro simples de fluxo no ramo 2-9, erro de injeção na barra 2 e erro múltiplo de fluxo nos ramos 2-9, 2-10 e 2-13 e injeção na barra 2.

Para CO2 tem-se inserção de erro no fluxo do ramo 12-15, erro de injeção na barra 3 e erro múltiplo de fluxo em 12-15 e injeção na barra 3.

Os valores corretos das medidas são mostrados na coluna 4 da Tabela 5.12 e os valores simulados, de acordo com o apresentado em (LOURENÇO e outros, 2008) são mostrados na coluna 5 da mesma tabela.

Tabela 5.23: Erros em medidas simulados para CO1 e CO2

Condição de operação	Tipo de Erro	Medida errônea	Valor Correto	Valor Simulado
1	Fluxo	z(1)	0,275	0,137
	Injeção	z(23)	0,070	0,084
	Fluxo e injeção	z(15)	-0,275	-0,330
		z(16)	-0,170	-0,204
		z(17)	0,07	0,084
z(23)		-0,120	-0,144	
2	Fluxo	z(17)	0,160	0
	Fluxo e injeção	z(15)	0,079	0,315
		z(31)	0,170	0,680

Presença Simultânea de Erros

Para verificação da presença simultânea de erro foram analisados conjuntamente para CO1 erro de exclusão de D_9 e erro na medida de fluxo no ramo 2-9. Posteriormente a presença conjunta de erro de inclusão de D_{17} , D_1 e erro múltiplo de fluxo nos ramos 2-9, 2-10 e 2-13 e injeção na barra 2.

A verificação de presença simultânea para CO2 foi realizada simulando-se erro de exclusão de D_1 e erro de fluxo no ramo 12-15, depois foi simulada presença de erro de exclusão de D_1 , D_{15} e erro nas medidas de injeção na barra 3 e de fluxo no ramo 12-15.

5.2.1. Resultados Sistema teste 30 barras

Nesta subsecção são apresentados os principais resultados obtidos nas simulações dos erros para o sistema teste de 30 barras citados na seção anterior. Os resultados são aqui apresentados de forma mais direta, o método de obtenção dos mesmos é idêntico ao do sistema teste de 24 barras.

Os resultados para a verificação do primeiro estágio, correspondente a Etapa 7 do algoritmo proposto para CO1 e CO2 são apresentados na Tabela 5.24 a seguir:

Tabela 5.24: Resultados dos disjuntores suspeitos selecionados no primeiro estágio para CO1 e CO2

Condição de operação	Tipo de Erro	Disjuntores Errôneos	Disjuntores Suspeitos	Módulos MLNs associados aos disjuntores suspeitos
1	Exclusão	D ₉ Ramo : 2-9	2-9	615,1790
	Inclusão	D ₁₇ , D ₁ Ramos: 2-12; 5-15	2- 11 2 - 12 5 - 15 5-16	450,2892 450,2895 450,2895 450,2893
2	Exclusão	D ₁₅ , D ₁ Ramos: 2-12; 5-15	2 - 9 2 - 12 5 - 15 5 - 17 5 - 18 14 - 15 14-16	0,2553 0,4939 0,4004 32,8171 32,7930 0,2389 21,5487
	Bus- split	D ₅ , D ₇ , D ₆ , D ₈ Ramos: 5-17; 5-18; 14-17; 14-18	2 - 9 2 -13 5 -17 5 -18 14-17 14-18	0,3666 0,1386 16,2066 16,2067 0,1217 0,1218

Para CO1, percebe-se na coluna 5 que os MLN associados aos disjuntores suspeitos correspondentes ao erro de inclusão formam um conjunto crítico. A coluna 4 mostra que os disjuntores suspeitos foram selecionados corretamente tanto para o erro simples quanto para o erro múltiplo de exclusão.

Verificando os resultados obtidos na coluna 5 do primeiro estágio para CO2, pode-se observar que para o erro de exclusão os MLNs associados as informações errôneas apresentam valores -0,4939 e 0,4004, inferiores ao limiar inicial ($\lambda_t = 3$) de detecção de erro. Neste caso foi verificado em um primeiro instante na Etapa 7 do algoritmo que todas as

informações errôneas não estavam contidas no conjunto S, sendo necessário retornar a Etapa 6 até que o teste geométrico garantisse a seleção de todas as informações errôneas. O limiar final de seleção foi 0,4.

Para a condição de erro bus split, também em CO2, pode-se verificar o mesmo caso do ocorrido para o erro de exclusão, onde os MLNs associados às informações errôneas apresentaram valores inferiores ao limiar inicial. O limiar final de seleção foi 0,1.

A Tabela 5.25 apresenta os resultados do segundo estágio para presença exclusiva de erro de topologia.

Tabela 5.25: Resultados para o segundo estágio considerando apenas erros de topologia

Condição de Operação	Erro de topologia		MLN e teste geométrico			
	Tipo	Descrição	$ \lambda_{m,max}^N $	$ \lambda_{op,max}^N $	$\cos\varphi_{Sm}$	$\cos\varphi_{Sop}$
1	Simple	Exclusão	288,72	615,17	0,882	0,999
	Múltiplo	Inclusão	219,90	450,28	0,719	0,999
2	Múltiplo	Exclusão	83,05	32,81	0,999	1,00
	Múltiplo	Bus Split	26,99	16,02	1,00	0,999

Os erros de exclusão e bus split para CO2 representam condições de operação críticas, os resultados mostrados nas colunas 6 e 7 da Tabela 5.25 comprovam a forte influência que erros de topologia exercem sobre as informações de medidas, uma vez que o teste do cosseno mesmo sem erros em medidas está apresentando valor próximo da unidade.

Para o erro de bus split de CO2, assim como para o erro de exclusão de CO2 e CO1 foi necessário realizar re-estimação dos estados, passando pelas Etapas 10 e 2 do algoritmo proposto.

Os resultados para o segundo estágio das simulações para erros somente em medidas são apresentados na Tabela 5.26.

Tabela 5.26: Resultados para o segundo estágio considerando apenas erros em medidas

Condição de operação	Erro grosseiro em medida		MLN e teste geométrico			
	Tipo	Descrição	$ \lambda_{m_max}^N $	$ \lambda_{op_max}^N $	$\cos\varphi_{Sm}$	$\cos\varphi_{Sop}$
1	Simple	Fluxo	127,39	0	0,997	0
	Simple	Injeção	139,83	0	0,998	0
	Múltiplo	Múltiplo (Fluxo e injeção)	$1,15 \cdot 10^3$	0	1,00	0
2	Simple	Fluxo	351,15	106,79	0,999	0,474
	Múltiplo	Injeção	716,78	107,57	0,999	0,207

Os resultados para o teste do cosseno apresentados nas colunas 6 e 7 da tabela 5.26, mostram que a presença de erros somente em medidas, tanto para CO1 quanto para CO2, é identificada de forma correta, pois os valores de $\cos\varphi_{Sop}$ são muito menores que 1, e os valores de $\cos\varphi_{Sm}$ são bem próximos da unidade.

O resultado para erro simples de medida de fluxo no ramo 12-15 para CO2 foi corretamente fornecido pelo teste geométrico. Ao passo que em (LOURENÇO e outros, 2008) foi realizado este mesmo teste, porém sem sucesso.

No algoritmo do presente trabalho, para realizar a verificação da natureza do erro são consideradas apenas as informações suspeitas associadas às medidas e as restrições operacionais, como descrito na seção 4.2 do capítulo 4. Sendo que em (LOURENÇO e outros, 2008) a verificação da natureza do erro era realizada com todas as informações de medidas e todas as restrições operacionais. Esta nova abordagem, considerando apenas as informações suspeitas, permite uma melhoria significativa nos resultados, principalmente para o processamento de erros em medidas.

A Tabela 5.27 mostra os resultados das simulações para verificação da detecção de presença simultânea de erros. As localizações de inserção dos erros são mostradas nas colunas 2 e 3 da Tabela 5.27.

Tabela 5.27: Resultados para erros simultâneos simulados para os casos CO1 e CO2

Condição de operação	Presença simultânea de erros		MLN e teste geométrico			
	Informações Errôneas		$ \lambda_{m_max}^N $	$ \lambda_{op_max}^N $	$\cos\varphi_{Sm}$	$\cos\varphi_{Sop}$
1	Topologia	Medidas	288,68	547,13	1,00	0,973
	D ₉	z(1)				
	D ₁₇ , D ₁	z(15),z(16),z(17),z(23)	716,66	3,58	0,997	0,857
2	D ₁	z(15)	351,07	170,20	0,997	0,807
	D ₁₅ , D ₁	z(15),z(31)	448,24	134,81	1,00	0,843

As colunas 6 e 7 da tabela 5.27 mostram os resultados obtidos para o teste geométrico. Tanto para CO1 como para CO2 os valores para o teste do cosseno próximos da unidade. Para estes casos são efetuadas as etapas 10 e 2 do algoritmo, selecionando e eliminando corretamente os erros de topologia e posteriormente re-estimando os estados e detectando presença de erros em medidas. Caracterizando a presença simultânea de erros.

A verificação do desempenho do método no terceiro estágio pode ser observada na Tabela 5.28 a seguir.

Tabela 5.28: Resultados do terceiro estágio para alguns casos de CO1 e CO2

Condição de operação 1				
Tipo de erro	Descrição	Informação errônea	$ \lambda_{i_erroneo}^N $	$\cos\varphi_{i_red}$
Topologia	Exclusão simples	D ₉	615,1790	0,99
Topologia	Inclusão Múltiplo	D ₁₇ , D ₁	450,2892 -	0,899
Medida	Simple	z(1)	127,9670	0,99
Condição de operação 2				
Tipo	Descrição	Informação errônea	$ \lambda_{i_erroneo}^N $	$\cos\varphi_{i_red}$
Topologia	Exclusão Múltiplo	D ₁₅ ,	0.4000	0,99
		D ₁	0.4949	
Medida	Simple	z(15)	351,2101	0,99

A coluna 4 da Tabela 5.28 mostra os multiplicadores de Lagrange associados tanto as medidas quanto as restrições operacionais, por isso a adoção do sub-índice i . Assim como a coluna 5 da mesma tabela mostra os resultados obtidos pelo teste geométrico para as medidas e restrições operacionais.

Através dos resultados obtidos nas colunas 3, 4 e 5 da Tabela 5.28 pode-se verificar o desempenho do método para os casos simulados. Para o erro de topologia de exclusão simples relacionado à CO1 o terceiro estágio detectou de forma correta a informação errônea.

Contudo para a presença de erro de inclusão múltiplo, também de CO1, os MLNs associados às informações suspeitas formam um conjunto crítico, como pode ser observado na Tabela 5.24, caracterizando um problema onde não é possível verificar qual informação de fato é errônea, como já fora discutido para os resultados do terceiro estágio do caso A, sistema teste de 24 barras. No caso de erro simples em medida para CO1 o terceiro estágio foi eficaz.

Para o erro de topologia múltiplo de CO2, tem-se que o limiar associado às restrições operacionais foi reduzido de 3 para 0,2, por isso os MLNs associados as informações errôneas apresentam os valores máximos em módulo de 0,4000 e 0,4949. Para este caso o terceiro estágio foi eficaz e selecionou de forma correta as informações errôneas. Obteve-se resultado positivo na detecção da informação errônea e seu MLN associado para a presença de erro simples em medida em CO2.

5.3. Análise casos A e B: Informações *A Priori*

Nesta seção foi verificada a influência das informações *a priori* na análise de conjuntos críticos e seu impacto no processamento de erros. A Tabela 5.29 a seguir mostra um quadro comparativo com alguns dos MLN associados às medidas com e sem informação *a priori* para os casos de erro de exclusão simples e erros de inclusão para a sub-rede relevante do caso A do sistema teste 24 barras, de acordo com os dados de erros simulados mostrados na Tabela 5.1 da subseção 5.1.1.1. Para os casos com e sem informação *a priori*.

Tabela 5.29: Quadro comparativo dos MLN associados erros de topologia caso A com e sem info *a priori*

Caso A- 24 barras (MLN x10e3)													
erro exclusão simples	sem info <i>a priori</i>	-0.4282	0.4282	0.0007	0.0007	-0.0027	0.0027	0.0272	-0.0272	0.0000	-0.0000	0.0000	-0.0000
	com info <i>a priori</i>	-0.4297	0.4278	0.0014	0.0006	-0.0022	0.0025	0.0272	-0.0275	-0.0010	0.0002	0.0014	0.0007
erro de inclusão	sem info <i>a priori</i>	-16.800	16.800	-0.3036	0.3036	-0.3036	0.3036	-0.0000	0.0000	0.8272	0.2185	0.6031	-0.6163
	com info <i>a priori</i>	-16.917	16.907	-0.3480	0.3493	-0.3490	0.3491	0.0002	-0.0007	0.0778	0.2696	0.7525	-0.2265

Nota-se por essa tabela 5.29 que com informações *a priori* os valores dos MLN correspondentes as informações críticas são nulos, porém com a presença de informações *a priori* os valores dos MLN associados as medidas críticas diferem ligeiramente de zero.

Pelo tracejado vermelho na figura 5.29 observa-se que os elementos que formam um conjunto crítico com seus MLNs correspondentes iguais entre si sem informação *a priori*, com a presença de tais informações passam a ter valores de MLN diferentes entre si.

A tabela 5.30 mostra o mesmo quadro comparativo, com relação aos erros de topologia simulados no Caso B e mostrados na Tabela 5.11 referente ao sistema teste de 24 barras.

Tabela 5.30: quadro comparativo dos MLN associados erros de topologia caso B com e sem informação *a priori*

Caso B- 24 barras (MLN x10e3)									
Erro by pass	sem info <i>a priori</i>	0.0480	-0.0480	0.8428	-0.8428	-0.0625	0.0625	-0.3100	0.3100
	com info <i>a priori</i>	0.0478	-0.0482	0.8428	-0.8435	-0.0627	0.0624	-0.3094	0.3104
Erro exclusão	sem info <i>a priori</i>	0.0064	-0.0064	-0.0018	0.0018	-0.3689	0.3689	0.0003	-0.0003
	com info <i>a priori</i>	0.0065	-0.0063	-0.0011	0.0035	-0.3699	0.3682	-0.0001	-0.0005

Também na tabela 5.30 pode-se perceber a influência das informações *a priori* na montagem dos conjuntos críticos. Os tracejados destacam alguns conjuntos críticos.

No processo de análise de criticidade em medidas, após uma verificação comparativa dos dados apresentados nas tabelas 5.29 e 5.30, pode-se verificar que a presença de informações *a priori* melhora sutilmente o problema de criticidade em medidas e conjuntos críticos. Quando há presença de informações *a priori* os MLN correspondentes as medidas críticas apresentam valores ligeiramente diferentes de zero, como definido na seção 2.6 o resíduo normalizado de informação crítica apresenta valor nulo.

Com relação aos conjuntos críticos, quando da presença de informações *a priori* os valores dos MLN dos k elementos pertencente ao conjunto crítico são diferentes entre si, sendo que por definição, em um conjunto crítico os elementos apresentam valores de MLN iguais entre si. Ou seja, com a presença de informações *a priori*, há uma ligeira melhora no problema de criticidade e conjuntos críticos, fundamentando o apresentados na seção 2.6 e avaliado na subseção 2.7.1.

5.4. Considerações Finais do Capítulo

Neste capítulo foram realizadas as simulações para o processamento simultâneo de erros no sistema teste de 30 e 24 barras do IEEE. Pode-se observar que a metodologia proposta respondeu aos erros simulados, apresentando resultados satisfatórios e coerentes com a teoria. A nova metodologia é capaz de identificar corretamente a natureza do erro e os erros propriamente dito em todos os casos, incluindo aqueles que haviam falhado com a metodologia anterior apresentada em (LOURENÇO e outros, 2008). Confirma-se, assim, a robustez do algoritmo, desde que tratadas previamente e corretamente às informações críticas.

O novo algoritmo de processamento de erros simultâneos na EEG, apresentado, conta com um estágio adicional do teste geométrico que garante o desempenho do método na determinação da natureza do erro em situações mais severas, provocadas pelo impacto dos erros de topologia. Sendo assim, para ambos os casos analisados (A e B), pode-se observar que os erros em medidas (seja medidas analógicas ou medidas de PMU) são facilmente e corretamente identificáveis, e quando da presença de erro de topologia ou presença simultânea de erros o teste geométrico conseguiu identificar corretamente os erros.

O terceiro estágio permite a identificação das informações erroneamente modeladas de forma satisfatória. O problema de criticidade em medidas foi amenizado com a presença das PMUs, fato esse que impacta diretamente no processamento de erros de topologia.

A presença de informações *a priori* sugerem uma ligeira melhora no problema de criticidade em medidas, por constituírem maior redundância nos dados.

CAPÍTULO 6

6. CONCLUSÕES FINAIS

O novo algoritmo proposto e desenvolvido nesta dissertação para o processamento simultâneo de erros de topologia e em medidas na estimação de estados generalizada vem para consolidar e aprimorar o método anteriormente apresentado por Lourenço (2008).

No presente trabalho um novo estágio de aplicação do teste geométrico foi inserido, e a metodologia posteriormente aplicada foi modificada no que se refere à interpretação dos resultados obtidos da aplicação do teste do cosseno quando da presença de erros de topologia, que caracterizam uma condição crítica de processamento simultâneo de erros, pois ao alterar a topologia da rede, esses erros, na maioria das vezes, provocam alterações significativas nas informações associadas às medidas, propagando e identificando erros que não existem. Por isso, a necessidade de verificação e exclusão da informação topológica errônea no terceiro estágio de processamento e posterior re-estimação de estados, sob o intuito de identificar corretamente o tipo de erro presente.

A verificação do impacto das informações *a priori* no processo de estimação de estados foi discutida com mais detalhes do que apresentado na literatura que contempla esse tópico. Tais informações melhoraram o condicionamento numérico da matriz de covariância, além de atuarem no sistema como referências virtuais nas barras isoladas e ilhas da rede. Estados passados da rede podem ser inseridos como informações *a priori*, auxiliando na melhoria do processo de estimação. Uma análise importante sobre a presença das informações *a priori* recai sobre sua influência quando da presença de informações críticas, pois tais informações alteram os valores dos multiplicadores de Lagrange normalizados pertencentes a conjuntos crítico, tornando seus valores absolutos diferentes entre si, o que caracteriza uma melhora no problema de criticidade e acarreta impactos diretos na identificação da natureza do erro.

O simulador de medidas, essencial para os estudos de estimação de estados no nível acadêmico, foi detalhado com suas principais funções e aplicabilidade, pois sem essa ferramenta os estudos de estimação de estados generalizada seriam mais dificultados, visto que não dispomos de um sistema que forneça os dados e parâmetros da rede a todo instante, tal como ocorre nos centros de operação com a utilização do SCADA.

As tendências de inserção das PMUs no processo de estimação de estados foram apresentadas e descritas de forma a ilustrar algumas tendências desta tecnologia na área de estimação de estados.

No caso do presente trabalho, a presença de PMUs permitiu uma melhora no problema de criticidade em medidas. Os resultados obtidos corroboram essa constatação, onde se observa que a inclusão estratégica de PMUs permite eliminar a criticidade de algumas restrições operacionais. Esse fato impacta diretamente no processamento de erros de topologia. Sendo assim pode-se perceber a relevância da adoção de estratégias de alocação de PMUs que visem à redução da criticidade de restrições operacionais, antes ditadas unicamente pela topologia da rede.

A integração de diversos algoritmos e tecnologias torna este trabalho muito interessante dentro do contexto atual de *Smart Grids*, além de permitir que diversos temas de pesquisa já desenvolvidos sejam agrupados, a fim de apresentar, de forma consolidada e de fácil compreensão, um algoritmo que possibilita inserção de novas ferramentas ao processo de EEG e capaz de processar erros simultâneos em medidas tema pouco explorado ainda nos dias de hoje.

6.1. Sugestões para Trabalhos Futuros

Nesta seção algumas sugestões consideradas pertinentes para a realização de trabalhos futuros são apresentadas a seguir:

- Os procedimentos de processamento simultâneo de erros no presente trabalho foram realizados no modelo linear da rede, sendo assim uma sugestão pertinente é avaliar o desenvolvimento do método proposto considerando a abordagem não linear do estimador de estados generalizado;
- A fim de aprimorar o método proposto de processamento simultâneo de erros, seria interessante incluir o processamento de erros em parâmetro na metodologia proposta;
- Sugere-se fazer um levantamento de todas as formas de implementação de PMUs junto ao processo de estimação de estados, bem como comparar as diferentes formas de modelagem das PMUs e verificar de forma mais aprofundada os benefícios de cada método;
- Sob o intuito de obter um aproveitamento melhor das informações provenientes das PMUs no processo de redução de informações operacionais críticas, sugere-se o desenvolvimento de métodos para alocações estratégicas das PMUs, que considerem à redução da criticidade de restrições operacionais;

- Dentro das informações *a priori* sugere-se fazer uma análise sobre o impacto de tais informações na análise de observabilidade numérica;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABUR, A.(2010) “Role of State Estimation and PMU sins Smart Grid Applications”. IEEE Conference on Inovative Smart Grid Technologies Europe. October 11-13, 2010, Gothenburg, Suécia.
- ABUR, A.; KIM, H.; CELIK, M.K. (1995) “Identifying the Unkown Circuit Breaker Statuses in Power Networks”. IEEE Trans. on Power Systems, 10(4):2029-2037, Nov. 1995.
- ABUR, A.; EXPÓSITO, A.G. (2004) “Power System State Estimation”, CRC Press, 2004.
- ATANACKOVIC, D. ; CLAPAUCH, J. H. ; DWERNYCHUK, G. ; GURNEY, J. e LEE, H. (2008)“First Steps to Wide Area Control – Implementation of Synchronized Phasors in Control Center Real-Time Applications” IEEE power & energy magazine, Jan./Febr.2008, pp. 6168
- ASADA, E. N. (2004) “Análise de Observabilidade e Processamento de Erros Grosseiros Conformativos Utilizando Metaheurística Busca Tabu na Estimação de Estado Generalizada”. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 2004.
- BRETAS, N.G. e BRETAS, A.S. (2010) “Bad Data Analysis Using the Composed Measurements Errors for Power System State Estimation”. IEEE transactions, Simpósio Búzios, Brasil, 2010
- CHACRABARTI, S.; KYRIAKIDES, E; BI, T.; CAI, D.; TERZIJA,V. (2009). “Measurements Get Together”. IEEE Power & Energy Magazine, p. 15-23, Janeiro 2009
- CLEMENTS, K. A.; KRUMPHOLZ, G.R. e DAVIS, P.W. (1981) “Power System State Estimation Residual Analysis: An Agorithm Using Network Topology.”, IEEE Trans. on Power Systems, (4): 1779-1787, Apr. 1981
- CLEMENTS, K. A. e DAVIS, P.W. (1986) “Multiple Bad Data Detectability and Identifiability: A Geometric Aproach” IEEE trans. Power Del., vol. 1, no. 3, PP 355-360, 1986.
- CLEMENTS, K. A. e SIMÕES COSTA, A. (1998) “Topology error identification using normalized Lagrange multipliers”. IEEE Trans. on Power Systems, 13(2): 347–353, May 1998.
- CIPRIANI e SIMÕES COSTA, A. (2010) “Análise de Observabilidade e Criticidade de Medidas na Estimação de Estados em Sistemas de Potência Considerando Medições Fasoriais Sincronizadas”. XVIII Congresso Brasileiro de Automática, Brasil, 2010.
- COELHO, T. C. (2007) “Determinação das Subestações Suspeitas Para a Estimação de Estado Generalizada Via Multiplicadores de Lagrange Normalizados. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Paraná, 2007.
- CASTILLO, M.R.M. (2006) “Estimador de Estado e Parâmetros de Linha de Transmissão, Baseado nas Equações Normais”. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-

Graduação em Engenharia Elétrica Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, Brasil, 2006.

- CASTILLO, M.R.M, LONDON, J.B.A.; BRETAS, N.G.; LEFEBVRE, S.; PRÉVOST, J.; LAMBERT, B. (2011) “Offline Detection, Identification, and Correction of Branch Parameter Errors Based on Several Measurement Snapshots”. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 26, no. 2, pag. 870 – 877, May 2011
- EHRENSPERGER, J. G. (2004) “Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada: Análise do Estado da Arte e Aplicações no Monitoramento de Sistemas de Energia Elétrica”. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFSC, Florianópolis, 2004.
- EXPÓSITO, A. G.; JAÉN A. V. (2005) “Including Ampere Measurements in Generalized State Estimators”. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 20, no. 2, May 2005
- FALCÃO, D. M. (2010) “Integração de Tecnologias para Viabilização da Smart Grid ” III Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE. Belém, Brasil, 2010.
- GJELSVIK, A.; AAM, S. and HOLTEN, L. (1985) “Hachtel’s Augmented Matrix Method. A Rapid Method for Improving Numerical Stability in Power System State Estimation”. IEEE Trans. on Power App. and Systems, 104(6):2987-2993, November 1985.
- GEISLER, K.I. (1984) “Ampere Magnitude for Power System State Estimation”. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, no 8, Aug. 1984
- IRVING, M. R. (2009) “Robust Algorithm for Generalized State Estimation”. IEEE transactions on power systems, 2009, vol. 24, no. 4,
- JAY, G.; SUN, D. e ROSALES, R. A. (2009) “A More Intelligent Grid”; IEEE Power & Energy Magazine. March/April 2009
- KARUSH, W. (1939) “Minima of Functions of Several Variables with Inequalities as Side Constraints”. M.Sc. Dissertation. Dept. of Mathematics, Univ. of Chicago, Chicago, Illinois, 1939.
- KREFTA, G. F. (2008) “Avaliação da Inclusão de Unidades de Medição Sincrofasorial na Estimção de Estados de Sistemas Elétricos de Potência”. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, 2008.
- KREFTA, G. F., LOURENÇO, E.M. (2009) “Impacto da Inclusão de Medição Sincrofasorial na Estimção de Estados e na Análise de Observabilidade.” In: VIII Congresso Latino-Americano de Geração e Transmissão de Energia Elétrica, 2009, Ubatuba. Electricity Generation and Transmission, 2009. v. 1. p. 1-8.
- KORKALI, M. e ABUR, A. (2009) “Placement of PMUs with Channel Limits”. IEEE 2009
- KUHN, H.W; TUCKER, A.W. (1951) “Nonlinear Programming”. Proceedings os 2nd Berkeley Symposium: 481-492, Berkeley: University of California Press, 1951.

- LEITES, R. C. e SIMÕES COSTA, A. (2010) “Um Estimador de Estados Ortogonal com Capacidade para Processar Medidas Fasoriais de Tensão e Corrente”; III Simpósio Brasileiro de Sistemas elétricos, Belém, Brasil, 2010.
- LIRA, R. (2010) “Influência dos Canais de Instrumentação na Exatidão da Medição Fasorial Sincronizada”. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, abril, 2010.
- LOURENÇO, E. M. (2001) “Análise de Observabilidade e Identificação de Erros de Topologia na Estimação de Estados Generalizada”. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil, 2001
- LOURENÇO E. M.; CLEMENTS, K. A., SIMÕES COSTA, A. e CERNEV, R. A. (2004) “Bayesian-based Hypothesis Testing for Topology Error Identification in Generalized State Estimation”. IEEE Trans. on Power Systems, 19(2): 1206–1215, May 2004.
- LOURENÇO E. M.; CLEMENTS, K. A., SIMÕES COSTA, A. e CERNEV, R. A. (2006). “A Topology Error Identification Method Directly Based on Collinearity Tests”. IEEE Trans. on Power Systems, 21(4): 1920–1929, Nov. 2006.
- LOURENÇO, E.M.; SOUZA, L.B. e SIMÕES COSTA, A. (2008) “A Unified Approach for Bad Data and Topology Error Identification In Generalized State Estimation”. 16th PSCC, Glasgow, Scotland, July 14-18, 2008.
- LOURENÇO E. M.; CLEMENTS, K. A., SIMÕES COSTA, A. (2002) “A hybrid probabilistic/topological approach to topology error identification in power system real time modeling”. 7a PMAPS Conference, Naples, Italy, pages 105-110, Sep. 2002.
- LUGTU, R.L.; HACKETT, D.F.; LIU, K.C. E MIGHT, D.D. (1980) “Power State Estimation: Detection of Topological Errors”. IEEE Transactions on Power App. And Systems, 99(6): 2406-2412, Nov./Dec. 1980.
- LUKOMSKI, R. e WILKOSZ, K. (2009) “Identification of Topology Errors with Use of Unbalance Indices and Neural Networks”. IEEE Power Tech Conference, June 28th - July 2nd, Bucharest, Romania, 2009
- MILI, L.; VAN CUTSEM, T. e RIBBENS-PAVELLA M. (1984) “Hypothesis Testing Identification: A New Method for Bad Data Analysis in Power System State Estimation”. IEEE Trans. on Power Systems, 103(11):3239-3252, Novembro, 1984.
- MILI, L.; VAN CUTSEM, T. e RIBBLENS-PAVELLA, M. (1985) “Bad data identification in power system state estimation – A comparative study”. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, PAS-104(11): 3037–3049, Nov.1985.
- MILI, L.; VAN CUTSEM, T. (1988) “Implementation of the Hypothesis Testing Identification in Power System State Estimation”. IEEE Transactions on Power Systems, 3(3):887-893, Aug. 1988.
- MONTICELLI, A. e GARCIA, A. (1991) “Modeling Zero Impedance Branches in Power Systems State Estimation”. IEEE/PES Winter Meeting, 8(1):364-370, 1991.
- MONTICELLI, A. (1993a) “Modeling Circuit Breakers in Weighted Least Squares State Estimation”. IEEE Transactions Power Systems, v.8, n3, p. 1143-1149, 1993a.

- MONTICELLI, A. (1993b) “The Impact of Modeling Short Circuit Branches in State Estimation”. IEEE Transactions Power Systems, v.8, n3, p. 1143-1149, 1993b.
- PHADKE, A.G; THORP, J.S; KARIMI, K.J. (1986) “Static State Estimation with Phasor Measurements”. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-104, n.11, p. 3098-3114, novembro, 1986
- PHADKE, A.G. (1993) “Synchronized Phasor Measurements – A Historical Overview”. Virginia Tech, Blacksburg, Virginia, USA, 1993
- PAPOULIS, A. (1991) “Probability Random Variables and Stochastic Processes”. 3ª Ed., McGraw Hill, 1991.
- RIBEIRO, R. P. Jr., (2005) “Fluxo de potência em redes modeladas no nível de subestação”. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, 2005.
- ROQUE, E.P. e LOURENÇO, E.M. (2010) “Uso de Unidade de Medição Fasorial na Estimação de Estados de Sistemas Elétricos na Busca por Redes Elétricas Inteligentes”. I CICPG SUL BRASIL. Florianópolis : Universidade do Estado de Santa Catarina UDESC, 2010. v.1. p. 1-3 2010.
- SCHWEPPE, F. C. e WILDES, J. (1970) “Power System Static State Estimation”, part I: Exact Model”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-89, pp. 120-125, 1970.
- SCHWEPPE, F. C. e ROM, D. B. (1970) “Power System Static State Estimation”, part II: Approximate Model”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* s, vol. PAS-89, pp. 125-130, 1970.
- SCHWEPPE, F. C. (1970) “Power System Static State Estimation”, part III: Implementation”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-89, pp. 130-135, 1970.
- SIMÕES COSTA, A. (1988) “Determinação de Conjuntos Críticos de Medidas na Estimação de Estados em Sistemas de Potência”. 7º Congresso Brasileiro de Automática, 2, 1988.
- SIMÕES COSTA, A. e VIEIRA, F. (2001) “Topology Error Identification Through Orthogonal Estimation Methods and Hypothesis Testing”. IEEE Power Tech, setembro, 2001.
- SIMÕES COSTA, A.; LEÃO, J.A (1993) “Identification of Topology Errors in Power System State Estimation”. IEEE Transactions on Power Systems , 8(4): 1531-1538, November, 1993.
- SIMÕES COSTA, A.; SALGADO, R. (2002) “Análise Estática de Segurança de Sistemas Elétricos de Potência”, Capítulos I e II, <http://www.labspot.ufsc.br/~simoes/assp/assp.html>, escrito em 2002.
- SOUZA, L. B. (2007) “Estimação de Estado Generalizada com Processamento de Erros de Topologia e Erros em Medidas”. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, 2007.
- TANAKA, M. R. (1985) “Processamento de Erros Grosseiros na Estimação Estática de Estado em Sistemas de Energia Elétrica”. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 1985.

- THORP, J.S; PHADKE, A.G; KARIMI, K.J. (1985) “Real Time Voltage- Phasor Measurements for Static State Estimation”. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-104, n.11, p. 3098-3114, novembro, 1985.
- VALVERDE, G.; DEYU CAI; FITCH, J.; TERZIJA, V.; (2009) “Enhanced State Estimation with Real-time Update Network Parameter Using SMT”; IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2009.
- VEMPANTI, N.; SILVA,C.; ALSAÇ, O., STOTT, B. (2005) “Topology Estimation”. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 1:806-810, Jun. 2005.
- ZHAO, H. (2006) “A New State Estimation Model of Utilizing PMU Measurements”; International Conference on Power System Technology, IEEE, novembro, (2006).
- ZHOU, M.; CENTENEO,V.A; THORP, J.S. (2006)“Na Alternative for Including Phasor Measurements in State Estimators”. IEEE Transactions on Power Systems, v. 21, n. 4, p. 1930-1937, November 2006.
- ZHU, J. e ABUR, A. (2007). “Effect of Phasor Measurements on the Choice of Reference Bus for State Estimation”. Proceedings of the IEEE Power Engineering Society General Meeting 2007, pp. 1-5.
- XU, B.; ABUR, A. (2004) “Observability Analysis and Measurement Placement for Systems With PMUs”; IEEE Power Systems Conference and Expositions, 2004.

APÊNDICES

A. Informações *a priori* no Problema de Estimação Restrita

As informações *a priori* podem ser incluídas no problema de estimação de estados na forma representada pela equação (1):

$$\begin{aligned} \text{minimizar} \quad & \frac{1}{2} r_m^T R_m^{-1} r_m + \frac{1}{2} (\hat{x} - \bar{x})^T P^{-1} (\hat{x} - \bar{x}) \\ \text{sujeito a:} \quad & r_m = z_m - h_m(\hat{x}) \\ & h_o(\hat{x}) = 0 \\ & h_s(\hat{x}) = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

O problema acima pode ser resolvido utilizando-se o método do Tableau esparso. Dessa forma, os estados são estimados resolvendo-se iterativamente o seguinte sistema linear:

$$\begin{bmatrix} P^{-1} & H^T \\ H & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \hat{x} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -P^{-1}(\hat{x} - \bar{x}^{(k)}) \\ z - h(\hat{x}^{(k)}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Os estados são atualizados por $\hat{x}^{k+1} = \hat{x}^k + \Delta \hat{x}$ até que a convergência seja alcançada.

A.1. Cálculo dos valores da matriz P

Considerando uma densidade uniforme para a variável x:

$$f(x) = \frac{1}{b-a} \quad a \leq x \leq b \quad (3)$$

Então o valor esperado para esta variável, sua expectância, é dada por:

$$E\{x\} = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx = \int_a^b \frac{x}{b-a} dx = \frac{a+b}{2} \quad (4)$$

A variância ou dispersão de x é definida por:

$$\sigma^2 = E\{x^2\} - [E\{x\}]^2 \quad (5)$$

onde:

$$E\{x^2\} = \int_a^b \frac{x^2}{b-a} dx = \frac{b^3 - a^3}{3(b-a)} \quad (6)$$

A.1.1. Valores de P para as variáveis de estado

1. Ângulo

Intervalo: $a = -\frac{\pi}{2}$ e $b = \frac{\pi}{2}$

$$E\{x\} = 0 \quad (7)$$

$$E\{x^2\} = \frac{\pi^2}{12} \quad (8)$$

$$\sigma^2 = \frac{\pi^2}{12} \quad (9)$$

3. Módulo da Tensão

Intervalo: $a = 0.9$ e $b = 1.1$

$$E\{x\} = \frac{0.9+1.1}{2} = 1.0 \quad (10)$$

$$E\{x^2\} = \frac{1.1^3-0.9^3}{3(1.1-0.9)} = 1.003333 \quad (11)$$

$$\sigma^2 = 1.003333 - (1.0)^2 = 0.00333 = \frac{1}{300} \quad (12)$$

4. Fluxos nos disjuntores

Intervalo: $a = -t_{lim}$ e $b = t_{lim}$

$$E\{x\} = 0 \quad (13)$$

$$E\{x^2\} = \frac{t_{lim}^2}{3} \quad (14)$$

$$\sigma^2 = \frac{t_{lim}^2}{3} \quad (15)$$

A.2. Conclusões

As informações *a priori* modeladas da forma descrita na equação (1) são equivalentes a adição de medidas de ângulo e do módulo da tensão para todas as barras do sistema, com variância igual aquela calcula pelas equações (9) e (12), respectivamente, e medidas de fluxos ativos e reativos para todos os disjuntores modelados no sistema, cuja variância será determinada pela equação (15).

A adição das informações *a priori* apresenta como principais vantagens:

- Melhora do condicionamento numérico da matriz do Tableau esparso;
- Definição de uma única barra de referência mesmo para sistemas que apresentam ilhamento devido à simulação de erros topológicos e /ou representação de subestação ao nível de seção de barras (existem informações no problema sobre os ângulos de todas as barras do sistema);
- Redução dos problemas provenientes de medidas e conjuntos críticos, uma vez que informações sobre todas as variáveis de estado estão sendo incluídas no problema.