

FABIO VIEIRA

**IDENTIFICAÇÃO DE ERROS DE TOPOLOGIA EM
SISTEMAS DE POTÊNCIA ATRAVÉS DE MÉTODOS
ORTOGONAIS E TESTES DE HIPÓTESES**



03341361

**FLORIANÓPOLIS
2001**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA**

**IDENTIFICAÇÃO DE ERROS DE TOPOLOGIA EM
SISTEMAS DE POTÊNCIA ATRAVÉS DE MÉTODOS
ORTOGONAIS E TESTES DE HIPÓTESES**

Dissertação submetida à
Universidade Federal de Santa Catarina
como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica

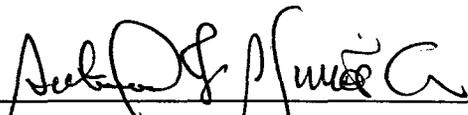
Fabio Vieira

Florianópolis, Fevereiro de 2001.

IDENTIFICAÇÃO DE ERROS DE TOPOLOGIA EM SISTEMAS DE POTÊNCIA ATRAVÉS DE MÉTODOS ORTOGONAIS E TESTES DE HIPÓTESES

Fabio Vieira

‘Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em *Sistemas de Potência*, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.’



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



p/ Prof. Aguinaldo Silveira e Silva, Ph.D.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

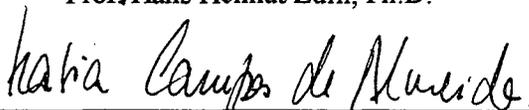
Banca Examinadora:



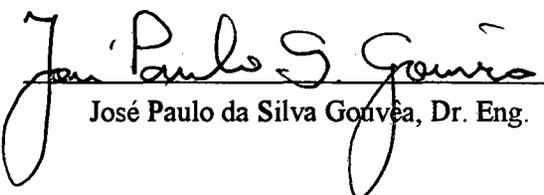
Prof. Antonio José Alves Simões Costa, Ph.D.
Presidente



Prof. Hans Helmut Zürn, Ph.D.



Prof. Katia Campos de Almeida, Ph.D.



José Paulo da Silva Gouvêa, Dr. Eng.

*Dedico aos meus pais por todo apoio e incentivo
à continuação dos meus estudos,
e pelo amor dedicado.*

*À Deus, pois sem o qual nenhuma passagem de
minha vida seria possível.*

Agradecimentos

Ao Prof. Antônio J. A. Simões Costa pela valiosa e sempre objetiva orientação que foi fundamental para a realização deste trabalho.

À Simoni por todo seu amor e compreensão nos inúmeros momentos de dificuldades.

Aos Professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica que contribuíram para minha formação profissional, em especial aos Professores do Grupo de Sistemas de Potência, particularmente ao Prof. Hans Helmut Zürn por sua amizade e ajuda no decorrer deste trabalho.

À todos os meus amigos e familiares que direta ou indiretamente me apoiaram na concretização de mais uma fase de minha vida.

Ao Grupo de Sistemas de Potência pelo apoio material.

À CAPES pelo apoio financeiro.

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

IDENTIFICAÇÃO DE ERROS DE TOPOLOGIA EM SISTEMAS DE POTÊNCIA ATRAVÉS DE MÉTODOS ORTOGONAIS E TESTES DE HIPÓTESES

Fabio Vieira

Fevereiro/2001

Orientador: Antonio José Alves Simões Costa.

Área de Concentração: Sistemas de Potência.

Palavras-chave: Modelagem em Tempo Real de Sistemas de Potência; Estimação de Estados; Identificação de Erros de Topologia.

Número de Páginas: 95

Neste trabalho é proposta a detecção e identificação de erros de topologia a partir de um estimador de estados ortogonal baseado em rotações de Givens sem raízes quadradas. A detecção de erros de topologia consiste em se verificar os resíduos normalizados associados às informações de status dos elementos de impedância nula (r_{0N}), sendo que os valores absolutos dos r_{0N} acima de um limite especificado (3.0) indicam a detecção e os elementos suspeitos de estarem mal configurados na hipótese básica para a fase de identificação de erros de topologia. Na identificação, apenas os elementos suspeitos modificam suas condições de operação, formando o conjunto de hipóteses alternativas. O teste de hipóteses e o teorema de Bayes são utilizados para verificar qual das hipóteses recebe maior respaldo do conjunto de medidas e restrições do sistema, indicado pelo maior valor das probabilidades condicionais a posteriori das hipóteses. O algoritmo proposto é testado em dois sistemas, sendo o primeiro um sistema de 5 barras e 6 ramos e o segundo o sistema-teste de 30 barras do IEEE. Em todos os testes de erros de topologia simulados, a correta configuração dos disjuntores foi encontrada, determinando o bom desempenho do método.

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

TOPOLOGY ERROR IDENTIFICATION IN POWER SYSTEMS THROUGH ORTHOGONAL METHODS AND HIPOTHESIS TESTING

Fabio Vieira

February/2001

Advisor: Antonio José Alves Simões Costa.

Area of Concentration: Power Systems.

Keywords: Modeling in Real Time of Power Systems; State Estimation; Topology Error Identification.

Number of Pages: 95

This work proposes the detection and identification of topology errors with orthogonal state estimator based on Givens' rotations without square roots. The detection of topology errors consists of the verification of the normalized residue associated with the of status information of elements with zero impedance (r_{0N}). In this phase, the absolute values of r_{0N} above the specified limit (3.0) indicate the detection and the elements suspicious of being badly configured in the standard hypothesis for the phase of identification of topology errors. In the identification phase, only the suspicious elements change its operating conditions, forming the set of the alternative hypothesis. The hypothesis test and the Bayes Theorem are usefull to verify which hypothesis receives greater endorsement form the set of measures and constraints of the system, indicated by largest value of the conditional a posteriori probabilities of the hypothesis. The algorithm proposed is tested with two systems, initially with a systems of 5 nodes and 6 branches and secondly with the 30 bus IEEE Test-System. In all simulated tests of topology errors, the correct configuration of the breakers was found, attesting the good performance of the method.

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Introdução	1
1.2	Revisão Bibliográfica	3
1.2.1	Identificação de Erros de Topologia	3
1.2.2	Métodos Ortogonais	6
1.3	Contribuições do Trabalho.....	7
1.4	Posicionamento do Trabalho na Metodologia para Identificação de Erros de Topologia	8
1.5	Organização da Dissertação	9
2	Estimação de Estados em Sistemas de Potência	12
2.1	Introdução	12
2.2	Conceitos Básicos	13
2.3	Estimadores Baseados no Método dos Mínimos Quadrados	15
2.4	Método da Equação Normal	17
2.4.1	Inclusão das Restrições de Igualdade	20
2.5	Método do <i>Tableau</i> Esparso	21
2.5.1	Inclusão das Restrições de Igualdade	23
2.5.2	Resíduos Normalizados e Multiplicadores de Lagrange Normalizados	24
2.5.3	Inclusão das Informações <i>a Priori</i>	25
2.6	Métodos Ortogonais Baseados nas Rotações de Givens	26
2.6.1	Solução Geral dos Métodos Ortogonais	27
2.6.2	Rotações de Givens sem Raízes Quadradas	28
2.7	Estimação de Estados Generalizada	30

3	Detecção e Identificação de Erros de Topologia	35
3.1	Introdução	35
3.2	Processamento de Erros de Topologia através do Método do <i>Tableau</i> Esparso	36
3.2.1	Criticidade de Medidas e Restrições	38
3.2.2	Detecção de Erros de Topologia.....	40
3.3	Identificação Baseada no Método Enumerativo	40
3.4	Identificação Baseada em Estatística Bayesiana	41
3.4.1	Testes de Hipóteses via Teorema de Bayes	41
4	Identificação de Erros de Topologia Associada a Métodos Ortogonais	45
4.1	Introdução	45
4.2	Formulação do Estimador de Estados	46
4.2.1	Inclusão das Restrições de Igualdade	48
4.3	Representação das Restrições Operacionais e Estruturais	49
4.4	Informações <i>a Priori</i>	51
4.5	Detecção de Erros de Topologia	53
4.5.1	Cálculo dos Resíduos	54
4.5.2	Obtenção da Matriz de Covariância dos Resíduos	54
4.5.3	Cálculo dos Resíduos Normalizados	57
4.6	Identificação de Erros de Topologia	58
4.6.1	Alterações na Matriz Triangular Superior Unitária “U”	58
4.6.2	Aplicação do Teorema de Bayes	60

5	Simulações e Resultados	63
5.1	Introdução	63
5.2	Sistema de 5 Nós e 6 Ramos	64
5.3	Sistema IEEE de 30 Barras	67
5.3.1	Erro Simples	69
5.3.2	Erro de Inclusão	70
5.4	Conclusão	71
6	Conclusões Finais	73
6.1	Introdução	73
6.2	Conclusões	73
6.3	Sugestões para Trabalhos Futuros	75
Apêndice A	Estimador de Estados Linearizado	76
Apêndice B	Igualdade entre Resíduos Normalizados e Multiplicadores de Lagrange Normalizados	78
Apêndice C	Método dos Pesos com Refinamento Iterativo	81
Apêndice D	Dados dos Sistemas-Teste	85
D.1	Sistema de 5 Barras e 6 Ramos	85
D.2	Sistema IEEE de 30 Barras	86
Bibliografia		88

Capítulo 1

Introdução

1.1 Introdução

A Estimação de Estados é uma ferramenta fundamental para a modelagem em tempo real de sistemas de potência. O processamento de dados telemédidos reportam os valores atuais de várias variáveis do sistema, a Estimação de Estados em Sistemas de Potência (EESP) fornece a modelagem do sistema que é utilizada para o monitoramento e análise de segurança. Para demonstrar a importância da estimação de estados como ferramenta fundamental à moderna operação de sistemas de potência, pode-se citar que, na análise do blecaute de 11/03/1999 no Sistema Sul-Sudeste brasileiro, consultores internacionais recomendaram maior atenção quanto à implementação de estimadores de estados em tempo real visando aumentar a confiabilidade do sistema interligado [1].

Existe uma contínua procura de métodos que solucionem o problema de Estimação de Estados em Sistemas de Potência (EESP), onde as principais características a serem melhoradas são o comportamento numérico do algoritmo e o esforço computacional envolvido. Dentre os métodos pesquisados, destacam-se o método da Equação Normal [2], métodos Ortogonais [3] e o método do *Tableau* Esparsa [4], onde o método ortogonal destaca-se por sua superior robustez numérica [5]. Os métodos ortogonais possuem várias formas de serem implementados. Entretanto, os métodos baseados em rotações de Givens são evidenciados em [6] e [7] respectivamente, devido ao seu comportamento numérico superior e sua competitividade em termos de velocidade comparado a outros métodos.

A ferramenta de EESP baseia-se nas medidas existentes e na topologia atual da rede para a estimação das variáveis de estados. Desta forma, erros grosseiros de medidas e erros de topologia (ET) na modelagem da rede devem ser identificados para não comprometerem o processo de estimação. Um eficiente estimador de estados deve ser capaz de identificar e eliminar erros grosseiros de medidas e, além disto, identificar os erros de topologia (ET) e indicar a correta modelagem da rede. Com maior ênfase do que a análise de erros grosseiros em medidas, a identificação de ET ainda requer pesquisa adicional, embora importantes contribuições para a solução do problema possam ser encontrados na literatura (ver, por exemplo) [8],[9], [10], [11],[12].

No início da década de 90, Monticelli [13],[14] propôs uma nova modelagem dos elementos de impedância nula, possibilitando a modelagem mais detalhada das partes

consideradas suspeitas da rede. Esta proposta tornou-se base dos novos estudos de identificação de ET baseados nos multiplicadores de Lagrange normalizados (MLN) [15],[16]. Isto se reflete na formulação do estimador de estados como um problema de otimização, onde as informações dos *status* de disjuntores e chaves seccionadoras são representadas como restrições de igualdade. Os multiplicadores de Lagrange destas informações são normalizados e utilizados para verificar a veracidade destas informações.

O trabalho proposto consiste na implementação de um estimador de estados ortogonal capaz de detectar e identificar ET. A modelagem da rede dá-se a nível de seção de barra, onde testes de hipóteses e o Teorema de Bayes são utilizados para identificar a topologia correta da rede. O algoritmo proposto é testado em dois sistemas, sendo o primeiro um sistema de 5 barras e 6 ramos e o segundo o sistema-teste de 30 barras do IEEE.

1.2 Revisão Bibliográfica

1.2.1 Identificação de Erros de Topologia

O primeiro trabalho a tratar o assunto de identificação de ET foi proposto por Lugtu e outros [8]. Este método é heurístico e baseia-se em profundas análises dos efeitos resultantes dos ET sobre os resultados da estimação de estados. Os autores verificam que as medidas de injeção de potência nas barras terminais do ramo mal

configurado tendem a ser consideradas errôneas pelo estimador, o que pode ser usado como indicação do erro de topologia.

Irving e Sterling [17] propõem o aproveitamento dos dados relacionados às subestações para a identificação de ET. O sistema total é dividido em vários subsistemas observáveis e representados a nível de subestação. Os ET nos disjuntores são identificados através de comparações nos fluxos que atravessam os mesmos.

Em [9], Clements e Davis propõem um estudo sobre os resíduos dos erros de medição (r_m) para a verificação da detecção e identificação de ET. As relações existentes entre os r_m e as colunas da matriz de sensibilidade dos resíduos é utilizada para a análise da detecção e identificação de ET.

Em [10], Wu e Liu utilizam os resíduos normalizados para detectarem ET e destacam as condições necessárias à detecção e identificação destes erros.

Simões Costa e Leão [11] propõem a utilização de um algoritmo que estabelece um índice de correlação entre as “medidas sensíveis” e as “medidas sintomáticas”, onde “medidas sensíveis” são as quantidades medidas mais sensíveis a uma determinada anomalia e “medidas sintomáticas” são as medidas portadoras de erros grosseiros pelo estimador. O índice de correlação possui valores no intervalo $\{0,1\}$ e quanto mais próximo a 1, mais susceptível fica a medida em relação à anomalia.

Em Abur e outros [12], é proposta a utilização de um estimador baseado no Mínimo Valor Absoluto (LAV) em dois estágios de estimação para a identificação de ET. No primeiro estágio, é utilizado um estimador LAV tradicional (modelagem

barra/ramo) para identificar as áreas suspeitas de possuírem elementos mal configurados. Estes elementos são modelados a nível de seção de barra [13],[14] e uma nova estimação é realizada. Através dos resíduos normalizados verifica-se a correta configuração dos status de disjuntores e erros grosseiros de medidas analógicas.

Em [18], métodos de sistemas especialistas são utilizados para a identificação de ET.

Mili e outros [19] propõem um método de pré-processamento para identificar ET e erros grosseiros de medidas. O modelo desacoplado (entre potência ativa e reativa) é utilizado para a solução do problema, e a detecção de barras suspeitas é realizada através de testes estatísticos sobre os resíduos dos fluxos estimados. Estas barras são modeladas a nível de seção de barra e a identificação dos ET é alcançada através dos resíduos normalizados dos fluxos de potências ativa e reativa estimados.

Clements e Simões Costa [15], propõem a utilização de multiplicadores de Lagrange normalizados (MLN) na detecção e identificação de ET, utilizando o método do *Tableau* esparso. A modelagem dos ramos de impedância nula proposta por Monticelli [13],[14] é utilizada. As restrições relacionadas com o *status* dos disjuntores e chaves seccionadoras são representadas como restrições de igualdade na modelagem do problema, e os respectivos MLN destas restrições são utilizados como ferramentas à detecção e identificação de ET.

Em [16], a autora investiga a observabilidade topológica e a identificação de ET baseados na modelagem a nível de seção de barra. O método proposto em [15] é

utilizado como base para a identificação de ET. O teste de hipóteses determina a probabilidade de cada combinação de *status* possível dos disjuntores suspeitos. Estas probabilidades são calculadas pela aplicação do teorema de Bayes, evitando novas re-estimações.

1.2.2 Métodos Ortogonais

Simões Costa e Quintana [3] propõem um método sequencial para a EESP, utilizando técnicas ortogonais baseadas nas rotações de Givens sem raízes quadradas. As medidas são processadas uma de cada vez, fato que facilita a detecção de erros grosseiros de medidas, pois o somatório parcial do quadrado dos resíduos das medidas pode ser obtido a cada processamento. Os resíduos normalizados são utilizados na identificação das medidas portadoras de erros grosseiros.

Seleme [20] propõe um estimador de estados através do método ortogonal sequencial de Givens utilizando restrições de igualdade na modelagem das injeções de potência nulas. A inclusão das restrições de igualdade segue o método do espaço nulo da matriz de restrições de igualdade.

Vempati e outros [7] estabelecem uma ordenação das linhas e colunas das matrizes que recebem o processamento ortogonal, preservando a esparsidade da matriz e melhorando o número de operações realizadas. A competitividade dos métodos de Givens é discutida e considerada compatível com relação a outros métodos de estimação.

Gouvêa [21] propõe a aplicação de um estimador não-linear baseado em rotações de Givens com restrições de igualdade e desigualdade não-lineares. Através do Método dos Pesos com Refinamento Iterativo [22], as restrições de igualdade são processadas. Por outro lado, as restrições de desigualdade recebem o processamento através de uma transformação do problema de Mínimos Quadrados com Restrições de Desigualdade em um problema do tipo Mínima Distância, que pode ser facilmente resolvido como um problema de Mínimos Quadrados com Restrições de Não-Negatividade.

1.3 Contribuições do Trabalho

A partir do primeiro trabalho proposto para a identificação de ET em [8], 1980, vários trabalhos foram propostos na tentativa de melhorar o tratamento e eliminação dos ET. Entretanto, nem todos os métodos alcançaram êxito em suas tentativas. Em decorrência deste fato, existe uma carência de métodos eficientes que identifiquem ET. Trabalhos recentes [15],[23],[16] abordam este assunto.

Anteriormente a esta dissertação, vários estimadores de estados baseados em métodos ortogonais foram propostos. Em alguns destes [3],[24], os erros grosseiros de medidas são detectados e excluídos do processo de estimação. No entanto, não existem estimadores ortogonais que possibilitem a detecção e/ou identificação de ET.

De posse destas evidências e através do conhecimento do bom comportamento numérico dos métodos ortogonais, o trabalho proposto visa ajudar a preencher a lacuna de métodos ortogonais eficientes que identificam ET. Um estimador de estados

baseado no método de rotações de Givens é utilizado para representar a modelagem da rede a nível de seção de barra. Desta forma, as informações dos *status* dos disjuntores e chaves seccionadoras podem ser representadas. Após a estimação, os resíduos normalizados destas informações indicam os elementos suspeitos e testes de hipóteses são utilizados para indicar a probabilidade de cada combinação possível dos *status* destes elementos. A probabilidade de cada hipótese é encontrada através da aplicação do Teorema de Bayes, evitando-se desta forma novas estimações de estados. Dentre todos os valores de probabilidades, o maior valor encontrado indica a combinação de *status* que recebe maior respaldo do conjunto de medidas em tempo real, o que determina a hipótese considerada correta.

1.4 Posicionamento do Trabalho na Metodologia para Identificação de Erros de Topologia

Em [12],[25] e [26], é sugerido que a identificação de ET deve seguir quatro fases:

1. Identificação da região do sistema de potência suspeita de conter ET (denominada “zona de anomalia” em [26]). Esta identificação utiliza a modelagem barra/ramo do sistema completo;
2. As subestações consideradas suspeitas (no item 1) são modeladas a nível de seção de barra [13],[14], ou seja, representam-se os elementos de impedância nula destas barras;

3. Com o modelo detalhado do item 2 (denominado “sub-rede relevante” em [26]) procede-se à identificação da correta condição de operação dos elementos de impedância nula;
4. A condição de operação dos elementos de impedância nula identificada como correta no item 3 é repassada ao modelo completo do sistema e uma nova estimação de estados é executada.

O presente trabalho é aplicado na determinação da correta condição de operação dos elementos de impedância nula, executando o item 3, ou seja, este trabalho parte da modelagem a nível de seção de barra [13],[14] das subestações consideradas suspeitas (identificadas por uma metodologia auxiliar, como por exemplo [26]) e finaliza com a determinação da correta condição de operação da mesma.

1.5 Organização da Dissertação

Os Capítulos 2 e 3 fazem uma revisão dos conceitos que fornecem suporte à realização desta dissertação. O Capítulo 4 contém os novos conceitos encontrados no desenrolar deste trabalho. Em seguida, no Capítulo 5 os resultados obtidos são apresentados, onde a metodologia proposta é aplicada à dois sistemas-teste.

O Capítulo 2 realiza uma revisão da EESP. Conceitos básicos, mas importantes ao entendimento desta ferramenta, são revisados. A modelagem do estimador como um problema de otimização e sua formulação através do algoritmo dos mínimos quadrados

ponderados também são descritas. Em seguida, os principais métodos de solução empregados são apresentados. Ao final deste capítulo, a modelagem dos elementos de impedância nula proposta por Monticelli [13], [14] é descrita.

No Capítulo 3 os métodos de detecção e identificação de ET baseados no método do *Tableau* esparso, propostos em [15],[16], são apresentados. Os efeitos de criticidade de medidas e/ou restrições na identificação de ET são observados. As diferenças mais acentuadas entre as propostas de [15] e [16] são descritas.

O Capítulo 4 exhibe os conceitos relativos à estimadores ortogonais. Inicialmente apresenta-se a formulação destes estimadores e a inclusão das restrições de igualdade [22] nesta formulação. A representação das restrições operacionais e estruturais, bem como a inclusão das informações *a priori* são demonstradas. A detecção dos ET é apresentada, mediante cálculo dos resíduos normalizados. Finalmente, uma metodologia para a identificação de ET através de métodos ortogonais é proposta, suas ferramentas auxiliares (teste de hipóteses e teorema de Bayes) também são apresentadas.

No Capítulo 5 encontram-se os resultados da aplicação do método proposto no Capítulo 4 aos sistemas-teste. A qualidade e eficácia do método proposto face à sua aplicação aos sistemas-teste são discutidas. Um breve comentário destes resultados também é apresentado.

No Capítulo 6 listam-se as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Finalmente, no Apêndice A é apresentado o Estimador de Estados Linearizado, no Apêndice B encontra-se a comprovação entre a igualdade dos resíduos normalizados

e os MLN, o Apêndice C descreve o algoritmo do Método dos Pesos com Refinamento Iterativo (utilizado neste estudo) e no Apêndice D é apresentado os dados dos sistemas-teste.

Capítulo 2

Estimação de Estados em Sistemas de Potência

2.1 Introdução

Os Estimadores de Estado contribuem para uma operação mais segura dos Sistemas de Potência, já que possibilitam a atualização em tempo real das variáveis relevantes do sistema, estimadas a partir das medidas contidas no plano de medição.

Dada a importância da Estimação de Estados em Sistemas de Potência (EESP) nos Centros de Operação do Sistema, o assunto tem sido alvo constante de pesquisas que visam propor métodos mais eficientes de solução e buscam melhorar as características dos estimadores de estado, tais como robustez numérica, capacidade de processamento de erros grosseiros e ET, identificação de transações bilaterais não-reveladas, etc.

Este capítulo é composto por uma sucinta apresentação dos conceitos básicos necessários à introdução da teoria de EESP, dos métodos de solução mais enfatizados na literatura e da forma como são utilizadas pelo estimador as informações adquiridas nas subestações e enviadas para processamento nos Centros de Operação através de sistemas de telemetria.

2.2 Conceitos Básicos

Para a compreensão mais clara da metodologia de EESP, faz-se necessário a introdução de alguns conceitos básicos.

Telemedidas [27]

São todas as informações obtidas em tempo real, através de medidores analógicos ou digitais, sobre quantidades físicas contínuas (fluxos e injeções de potência, tensões nas barras) ou binárias (posição de chaves e disjuntores) do sistema. Estas telemedidas constituem a base de dados em tempo real do sistema.

Pseudomedidas [27]

São informações sobre as variáveis do sistema que não são obtidas em tempo real através do sistema de telemedição. Por exemplo, injeções nulas de potência em barras de passagem e valores de tensão, fluxos ou injeções obtidos de execuções prévias do estimador de estados, etc., podem ser tratadas como pseudomedidas.

Estados [27]

São variáveis que possibilitam o conhecimento de todas as demais quantidades físicas de interesse para a operação do sistema. Em sistemas de potência, as variáveis de estado são tradicionalmente definidas como sendo as tensões complexas nas barras.

Informações *a priori* [28]

Informações *a priori* são as informações prévias sobre os valores das variáveis de estado do sistema de potência. As informações *a priori* podem ser modeladas como variáveis aleatórias, cuja variância traduz a incerteza sobre seus valores. Por exemplo, para um sistema estável em regime permanente é possível supor que os ângulos das tensões complexas das barras devem pertencer ao intervalo $[\pi/2, -\pi/2]$ rad..

Plano de medição [29]

É o conjunto de todas as telemedidas e pseudomedidas a serem processadas pelo estimador de estados. A qualidade do plano de medição depende da redundância das medidas e de sua distribuição sobre o sistema. Um bom plano de medição proporciona uma base de dados mais rica e confiável para a EESP, aumentando a capacidade de processamento de erros grosseiros e/ou de ET do estimador.

Observabilidade [30],[31],[?]

Um sistema de potência é observável em relação a um dado plano de medição quando é possível se estimar todas as variáveis de estado do sistema a partir do processamento das medidas contidas no plano de medição. A observabilidade está relacionada com a qualidade do plano de medição adotado.

Medidas Críticas [31],[32]

Uma medida é considerada crítica quando sua ausência do plano de medição implica na não-observabilidade do sistema.

Conjunto Crítico [31],[32]

Um conjunto de medidas é considerado crítico quando a perda de qualquer uma das medidas do conjunto, torna críticas todas as demais medidas do mesmo.

2.3 Estimadores Baseados no Método dos Mínimos Quadrados

Os estimadores de estados de sistemas de potência podem ser baseados em diferentes algoritmos, tais como:

- Método dos mínimos quadrados ponderados;
- Algoritmo de mínimo valor absoluto;
- Outros.

Neste trabalho, serão considerados apenas estimadores baseados no método dos mínimos quadrados ponderados, pois este é o método mais utilizado na EESP. Sua formulação está apresentada abaixo e será utilizada como base de todos os métodos de solução apresentados neste capítulo.

Definindo-se m como o número de medidas, N como o número de barras do sistema de potência e $n = (2^*N)-1$ o número de estados do sistema, o modelo de medição pode ser descrito genericamente por:

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

onde

z_m : vetor ($m \times 1$) de medidas que compõem o plano de medição;

z_0 : vetor ($m \times 1$) com os valores reais das quantidades medidas;

η : vetor ($m \times 1$) dos erros de medição.

Considerando-se uma distribuição Normal dos erros de medição, e que um erro de medição η_i em uma determinada medida i não afeta o valor de outra medida k então η_i e η_k são variáveis aleatórias não-correlacionadas.

Utilizando o operador expectância $E\{\bullet\}$, isto pode ser escrito como:

$$E\{\eta_i \eta_k\} = 0 \quad (2.2)$$

Consequentemente, a matriz de covariância dos erros de medição R_m será diagonal, isto é:

$$E\{\eta \eta^T\} = R_m = \text{diag}\{\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_m^2\} \quad (2.3)$$

onde σ_i^2 é a variância da medida i .

O vetor z_0 pode ser expresso em termo das variáveis de estado \bar{x} através do vetor $m \times 1$ de funções não-lineares $h_m(\bar{x})$. O modelo de medição (2.1) pode então ser escrito em termos dos estados como:

$$z_m = h_m(\bar{x}) + \eta \quad (2.4)$$

O problema dos mínimos quadrados ponderados é formulado como um problema de otimização, cuja função-objetivo é dada por [2]:

$$\text{Min } [z_m - h_m(x)]^T R_m^{-1} [z_m - h_m(x)] \quad (2.5)$$

onde $h_m(x)$ é o vetor de funções não-lineares ($m \times 1$) que relaciona as quantidades medidas às variáveis de estado e x é o vetor ($n \times 1$) com os valores estimados dos estados.

A ponderação da função objetivo é realizada pela matriz R_m^{-1} cujos elementos diagonais são iguais ao inverso da variância de cada medidor. Ou seja, quanto mais preciso for o medidor, menor é o valor do σ_i e conseqüentemente maior o valor de $R_{m,ii}^{-1}$. Desta forma os medidores que fornecem medidas mais confiáveis recebem maior peso na formulação do problema de mínimos quadrados ponderados.

2.4 Método da Equação Normal

A aplicação do Método da Equação Normal à EESP foi proposto na década de 70 [2]. É também conhecido como Método de Gauss-Newton [5].

Considerando a modelagem do problema apresentado em (2.5), a formação da função Lagrangeana do problema irrestrito é simplesmente representada por:

$$J(x) = [z_m - h_m(x)]^T R_m^{-1} [z_m - h_m(x)] \quad (2.6)$$

Aplicando as condições de otimalidade (1ª ordem) à função Lagrangeana acima,

obtém-se:

$$\frac{\partial J(x)}{\partial x} = 0 \implies -2H_m^T(x) R_m^{-1} [z_m - h_m(x)] = 0 \quad (2.7)$$

onde

$$H_m(x) = \frac{\partial h_m(x)}{\partial x} \quad (2.8)$$

Como (2.7) é composta por um conjunto de equações não-lineares de difícil solução, o método de Newton para a solução do problema é aplicado a (2.5). Expandindo a função vetorial $h_m(x)$ em série de Taylor em torno de x^k e truncando-a no termo de primeira ordem, a expressão abaixo é encontrada.

$$h_m(x) \cong h_m(x^k) + H_m(x^k) \Delta x \quad (2.9)$$

onde:

$$H_m(x^k) = \left. \frac{\partial h_m(x)}{\partial x} \right|_{x=x^k}; \quad (2.10)$$

$$\Delta x = \bar{x} - x^k; \quad (2.11)$$

A matriz $m \times n$ $H_m(x^k)$ é a matriz Jacobiana do problema de estimação de estados. Definindo Δz como o vetor de medidas incrementais, dado por:

$$\Delta z_m \triangleq z_m - h_m(x^k) \quad (2.12)$$

é então possível de definir a forma linearizada da função-objetivo como:

$$\text{Min} \quad [\Delta z_m - H_m(x^k) \Delta x]^T R_m^{-1} [\Delta z_m - H_m(x^k) \Delta x] \quad (2.13)$$

A função Lagrangeana do problema acima fica:

$$J(\Delta x) = [\Delta z_m - H_m(x^k) \Delta x]^T R_m^{-1} [\Delta z_m - H_m(x^k) \Delta x] \quad (2.14)$$

Aplicando as condições de otimalidade (1ª ordem) à função Lagrangeana acima, obtém-se a seguinte relação:

$$\frac{\partial J(\Delta x)}{\partial \Delta x} = 0 \implies -2 H_m^T(x^k) R_m^{-1} [\Delta z_m - H_m(x^k) \Delta x] = 0 \quad (2.15)$$

Após algumas manipulações algébricas, esta equação é re-escrita como:

$$H_m^T(x^k) R_m^{-1} H_m(x^k) \Delta x = H_m^T(x^k) R_m^{-1} \Delta z_m \quad (2.16)$$

A equação (2.16) é conhecida como Equação Normal de Gauss. Definindo $A(x^k)$ como a matriz de informação do problema, dada por:

$$A(x^k) \triangleq H_m^T(x^k) R_m^{-1} H_m(x^k) \quad (2.17)$$

a Equação Normal de Gauss fica resumida a:

$$A(x^k) \Delta x = H_m^T(x^k) R_m^{-1} \Delta z_m \quad (2.18)$$

O método da Equação Normal é inicializado a partir de um valor inicial do vetor de estados, x^1 . O vetor de estados é atualizado iterativamente como:

$$x^{k+1} = \Delta x + x^k \quad (2.19)$$

onde Δx é obtido pela solução de (2.16). Este processo será finalizado quando a norma do vetor Δx for menor que um limiar pré-determinado.

Como indicado na literatura [33],[29] o método da Equação Normal é sensível a problemas de estabilidade numérica. Esta característica está relacionada ao condicionamento da matriz, pois o número de condicionamento de A é aproximadamente

igual ao quadrado do número de condicionamento da matriz Jacobiana $H_m(x^k)$ [33], [5]. Portanto um condicionamento numérico ainda aceitável de $H_m(x^k)$ pode provocar mau condicionamento de A e afetar a estabilidade numérica do método da Equação Normal.

2.4.1 Inclusão das Restrições de Igualdade

A inclusão das restrições de igualdade modifica a formulação obtida em (2.5), conforme abaixo [34]:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & [z - h_m(x)]^T R_m^{-1} [z - h_m(x)] \\ \text{s.a.} \quad & g(x) = 0 \end{aligned} \tag{2.20}$$

onde $g(x)$ é um vetor $nr \times 1$ de funções não-lineares contendo as restrições de igualdade.

As restrições de igualdade em sistemas de potência podem incluir, por exemplo, as injeções nulas em barras de passagem. Como será visto na seção 2.7, estas restrições podem ser usadas também para modelar as posições de chaves seccionadoras e disjuntores de subestações.

De forma semelhante ao mencionado anteriormente, a solução deste problema reduz-se à solução de um conjunto de equações não-lineares. Conforme realizado em [35], executa-se a expansão dos vetores $h_m(x)$ e $g(x)$ em séries de Taylor (em relação ao ponto x^k) truncando-as no termo de primeira ordem. A função Lagrangeana é então formada para o problema linearizado. Aplicando as condições de otimalidade a esta

função Lagrangeana obtém-se a solução do método da Equação Normal com restrições de igualdade, conforme apresentado na equação (2.21):

$$\begin{bmatrix} H_m^T(x^k) R_m^{-1} H_m(x^k) & G^T(x^k) \\ G(x^k) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \lambda_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_m^T(x^k) R_m^{-1} \Delta z_m \\ g(x^k) \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

onde

$G(x^k) \triangleq \left. \frac{\partial g(x)}{\partial x} \right|_{x=x^k}$ é a matriz Jacobiana $nr \times n$ das restrições de igualdade e λ_g é o vetor $nr \times 1$ de multiplicadores de Lagrange referentes às restrições.

2.5 Método do *Tableau* Esparso

Na tentativa de solucionar os problemas de condicionamento e estabilidade numérica do método da Equação Normal, métodos de soluções alternativos foram propostos, entre eles o método do *Tableau* Esparso, também conhecido como Método da Matriz Aumentada ou de Hachtel, e os métodos baseados em transformações ortogonais.

O método do *Tableau* Esparso proposto em [4], apresenta estabilidade numérica superior ao método da Equação Normal. Sua matriz de coeficientes é muito esparsa, e a utilização das técnicas de esparsidade compensa o esforço computacional exigido pela maior dimensão da matriz [5].

Conforme visto na seção anterior, o ponto de partida é a equação (2.5) mas com uma pequena modificação na formulação dos mínimos quadrados. Define-se o vetor

r_m ($m \times 1$) como o vetor de resíduos de estimação das medidas, dado por:

$$r_m \triangleq z_m - h_m(x) \quad (2.22)$$

Com esta definição a formulação de mínimos quadrados fica modificada para:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \frac{1}{2} r_m^T R_m^{-1} r_m \\ \text{s.a} \quad & z_m - h_m(x) - r_m = 0 \end{aligned} \quad (2.23)$$

A função Lagrangeana do problema formulado acima é representada por:

$$J(x, \lambda_m) = \frac{1}{2} r_m^T R_m^{-1} r_m + \lambda_m^T [z_m - h_m(x) - r_m] \quad (2.24)$$

Aplicando as condições de otimalidade (1ª ordem) à função Lagrangeana acima, obtêm-se as seguintes relações:

$$\begin{aligned} \frac{\partial J(x, \lambda_m)}{\partial r_m} = 0 & \implies R_m^{-1} r_m - \lambda_m = 0 \\ \frac{\partial J(x, \lambda_m)}{\partial x} = 0 & \implies -H_m^T(x) \lambda_m = 0 \\ \frac{\partial J(x, \lambda_m)}{\partial \lambda_m} = 0 & \implies z_m - h_m(x) - r_m = 0 \end{aligned} \quad (2.25)$$

O conjunto formado pelas duas últimas equações de (2.25) formam um sistema de funções não-lineares, e portanto deve-se aplicar o método de Newton para sua solução. Esta aplicação resulta no seguinte sistema matricial:

$$\begin{bmatrix} 0 & H_m^T(x^k) \\ H_m(x^k) & R_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \lambda_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ z_m - h_m(x^k) \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

O método é resolvido iterativamente, onde o ponto de partida x^1 é um dado de entrada. A solução é alcançada quando a norma de Δx for menor que um limiar ($1e^{-3}$, por exemplo).

2.5.1 Inclusão das Restrições de Igualdade

Conforme realizado no método da Equação Normal, restrições de igualdade do tipo injeções nulas em barras de passagem, etc., também podem ser adicionadas à formulação do método do *Tableau* Esparsos. A partir de (2.23) a formulação do problema de mínimos quadrados sofre apenas a inclusão de uma nova restrição, conforme abaixo:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \frac{1}{2} r_m^T R_m^{-1} r_m \\ \text{s.a.} \quad & z_m - h_m(x) - r_m = 0 \\ & -g(x) = 0 \end{aligned} \quad (2.27)$$

A função Lagrangeana do problema acima é representada como:

$$J(x, \lambda_m, \lambda_g) = \frac{1}{2} r_m^T R_m^{-1} r_m + \lambda_m^T [z_m - h_m(x) - r_m] + \lambda_g^T [-g(x)] \quad (2.28)$$

A solução deste problema recai novamente em um conjunto de equações não-lineares. O método de Newton é mais uma vez utilizado, resultando no seguinte sistema matricial [4],[15]:

$$\begin{bmatrix} 0 & H_m^T(x^k) & G^T(x^k) \\ H_m(x^k) & R_m & 0 \\ G(x^k) & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \lambda_m \\ \lambda_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ z_m - h_m(x^k) \\ -g(x^k) \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Como nos casos anteriores, o método de solução é iterativo e segue as mesmas observações citadas anteriormente para a solução do método do *Tableau* sem restrições de igualdade.

2.5.2 Resíduos Normalizados e Multiplicadores de Lagrange Normalizados

Na análise de erros grosseiros em medidas, utilizam-se os resíduos normalizados para detectar e identificar medidas portadoras de erros grosseiros. Os resíduos normalizados são definidos como [27],[30]:

$$r_{N i} = \frac{r_i}{C_{r ii}} \quad (2.30)$$

onde C_r é a matriz de covariância dos resíduos dada por [29]:

$$C_r = R - H (H^T R^{-1} H)^{-1} H^T \quad (2.31)$$

Recentemente, a utilização dos MLN vem também sendo proposta à detecção e identificação de erros grosseiros [15], detecção [15],[16],[36] e identificação de Erros de Topologia [15] e detecção de transações não-reveladas [37] em sistemas de potência.

O método do *Tableau* Esparsa possui como característica a possibilidade de se obter juntamente com os valores das variáveis de estado, os valores dos multiplicadores de Lagrange, conforme visto em (2.26) e (2.29). Além disso, a matriz de covariância dos multiplicadores de Lagrange pode ser obtida através da equação (2.32) [38]:

$$\begin{bmatrix} -\Sigma & C1^T & C2^T \\ C1 & W_{11} & W_{12} \\ C2 & W_{21} & W_{22} \end{bmatrix} \triangleq \begin{bmatrix} 0 & H_m^T(x^k) & G^T(x^k) \\ H_m(x^k) & R_m & 0 \\ G(x^k) & 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \quad (2.32)$$

Mostra-se em [15] e [16] que a matriz de covariância dos multiplicadores de Lagrange

(W) é formada por W_{11} , W_{12} , W_{21} e W_{22} , conforme abaixo:

$$W \triangleq \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} \\ W_{21} & W_{22} \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

A partir de (2.33) e da solução de (2.29), os MLN podem ser calculados através de:

$$\lambda_{N,i} = \frac{\lambda_i}{\sqrt{w_{ii}}} \quad (2.34)$$

Mantendo-se a estrutura de (2.32), os multiplicadores de Lagrange que são normalizados através dos elementos diagonais (w_{ii}) de W_{11} estão relacionados aos erros estimados das medidas, enquanto que aqueles normalizados através dos elementos diagonais de W_{22} são relacionados às restrições de igualdade. Estes MLN podem ser respectivamente utilizados para identificação de erros grosseiros em medidas [15] e detecção de Erros de Topologia [15],[16],[36] ou de transações não-reveladas [37].

2.5.3 Inclusão das Informações *a Priori*

Informações prévias sobre as variáveis de estados podem ser inseridas na formulação do *Tableau* [16] e [36]. Suponha que \bar{x} é o vetor $n \times 1$ de informações *a priori* sobre as variáveis de estado e que P é a matriz $n \times n$ de covariância dos erros dos estados *a priori*. A nova função-objetivo do problema de EESP levando em conta as informações *a priori* é dada por:

$$J(x) = \frac{1}{2} r_m^T R_m^{-1} r_m + \frac{1}{2} (x - \bar{x})^T P^{-1} (x - \bar{x}) \quad (2.35)$$

As informações *a priori* são inseridas em (2.26) e (2.29), através de simples modificações destas equações, resultando em [16]:

$$\begin{bmatrix} -P^{-1} & H_m^T(x^k) & G^T(x^k) \\ H_m(x^k) & R_m & 0 \\ G(x^k) & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \lambda_m \\ \lambda_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -P^{-1} \bar{x} \\ z_m - h_m(x^k) \\ -g(x^k) \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

A equação (2.36) pode facilmente ser aplicada à formulação do *Tableau* sem restrições de igualdade, apenas retirando as parcelas referente a $G(x^k)$; λ_g ; e $g(x^k)$. A inclusão das informações *a priori* melhoram o condicionamento do método do *Tableau* Esparso, pois P^{-1} é uma matriz diagonal e melhora a dominância da diagonal principal.

2.6 Métodos Ortogonais Baseados nas Rotações de Givens

O conhecimento da robustez numérica superior dos métodos ortogonais e a crescente necessidade de encontrar um método mais robusto, em relação ao método da equação normal levaram à investigação sobre a aplicação de métodos ortogonais à solução de problemas de EESP [39],[33] e [3].

Em problemas de EESP as linhas da matriz de observação armazenam as informações de cada medida ou restrição de igualdade com respeito às variáveis de estado. Desta forma, a utilização de métodos ortogonais que operam por linhas, como os méto-

dos baseados nas rotações de Givens [39],[3], tende a apresentar melhor desempenho que as variantes que operam por colunas [21]. Outro ponto que deve ser mencionado é que a utilização da variante sem raízes quadradas do método de Givens reduz o esforço computacional para a estimação dos estados [24] em relação ao método de Givens convencional.

A escolha do método para redução da matriz de observação utilizado neste trabalho, foi baseada nas vantagens das rotações de Givens sem raízes quadradas sobre os demais métodos.

2.6.1 Solução Geral dos Métodos Ortogonais

Utilizando o modelo linearizado, Apêndice A, e considerando z_m^i como a nova medida a sofrer o processo de transformações ortogonais, então a representação da função-objetivo pode ser expressa como:

$$\bar{J}(x) = \left\| \left[\begin{array}{c} H_m \\ H_m^i \end{array} \right] x - \left[\begin{array}{c} z_m \\ z_m^i \end{array} \right] \right\|^2 \quad (2.37)$$

onde H_m representa as linhas processadas da matriz de observação; z_m as medidas processadas; H_m^i a nova linha a ser processada da matriz de observação e $\|\dots\|^2$ a norma Euclidiana.

As transformações ortogonais possuem a propriedade de não alterar a norma Euclidiana das matrizes [5],[21]. Através desta propriedade, a realização de transformações ortogonais em (2.37) não alteram o valor de $\bar{J}(x)$. Estas transformações

são realizadas conforme abaixo:

$$Q * \begin{bmatrix} H_m \\ H_m^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U \\ 0 \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} (n \times n) \\ (1 \times n) \end{matrix} \quad (2.38)$$

$$Q * \begin{bmatrix} z_m \\ z_m^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \\ e^i \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} (n \times 1) \\ (1 \times 1) \end{matrix} \quad (2.39)$$

onde Q é uma matriz contendo as transformações ortogonais; U , uma matriz triangular superior contendo as informações de H_m ; v , o vetor coluna contendo as informações dos valores das medidas e e^i , um escalar.

Após a aplicação das transformações ortogonais em todas as linhas da matriz H_m , a determinação das variáveis de estado do problema é alcançada através da solução de um sistema triangular, apresentado em (2.40), que pode ser facilmente resolvido por substituição inversa.

$$U x = v \quad (2.40)$$

2.6.2 Rotações de Givens sem Raízes Quadradas

As rotações de Givens sem raízes quadradas foram propostas em [40] e visam a diminuição do esforço computacional comparado ao método de Givens convencional [5],[24], [21]. Sua formulação básica consiste em representar a matriz U como:

$$U = D^{1/2} \bar{U} \quad (2.41)$$

onde D é uma matriz diagonal ($n \times n$) e \bar{U} , uma matriz triangular superior unitária ($n \times n$).

Considerando o vetor u como a i -ésima linha da matriz U de (2.38), e o vetor p como a nova linha da matriz de observação H_m a ser processada, dados abaixo como:

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

$$p = [0 \dots 0 \quad \sqrt{w} p_i \quad \sqrt{w} p_k \dots \sqrt{w} p_{n+1}] \quad (2.43)$$

onde w representa o peso dado a cada linha da matriz de observação (H_m) e d_{ii} é o peso dado a cada linha da matriz U , igual ao i -ésimo elemento diagonal da matriz D .

Após a aplicação das rotações para zerar o i -ésimo elemento de p , os vetores u e p modificados são dados como:

$$u' = [0 \dots 0 \quad \sqrt{d'_{ii}} \quad \sqrt{d'_{ii}} \bar{u}'_k \dots \sqrt{d'_{ii}} \bar{u}'_{n+1}] \quad (2.44)$$

$$p' = [0 \dots 0 \quad 0 \quad \sqrt{w'} p'_k \dots \sqrt{w'} p'_{n+1}] \quad (2.45)$$

As rotações de Givens sem raízes quadradas devem continuar a ser aplicadas a p' até que todos elementos deste vetor linha sejam anulados. Passa-se em seguida ao processamento de uma nova linha de H_m , e assim por diante, até que todas as linhas de H_m tenham sido rotacionadas com as linhas de U .

A coluna $(n + 1)$ dos vetores u' e p' representam a informação dos valores das medidas, ou seja, as medidas são rotacionadas juntamente com a matriz de observação.

Posteriormente ao processamento de todas as linhas da matriz de observação, obtém-se um sistema triangular da forma dada pela equação (2.40), onde v é obtido da última coluna de U conforme abaixo:

$$v = \begin{bmatrix} u_{1(n+1)} \\ \vdots \\ u_{n(n+1)} \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

A estimativa dos valores das variáveis de estado x são encontrados através da solução da equação (2.40). A soma da função objetivo (2.37) do problema de mínimos quadrados ponderados é obtida através do multiplicador $d_{(n+1)}$ da linha adicional de U , sem a necessidade de cálculos adicionais [39], [3].

2.7 Estimação de Estados Generalizada

Para obter a identificação de erros de topologia com maior confiabilidade, as áreas suspeitas do sistema elétrico de potência devem ser modelados ao nível de seção de barra. Para tanto, deve-se ter as informações sobre *status* dos disjuntores e chaves seccionadoras pertencentes às subestações suspeitas de conterem erros de modelagem.

Ao contrário de outros elementos do sistema, as impedâncias dos disjuntores e chaves seccionadoras são nulas ou infinitas se estão operando fechados e abertos, respectivamente. A utilização de valores pequenos ou muito grandes de impedâncias para aproximar o comportamento de disjuntores fechados ou abertos tende a provocar problemas numéricos quando tais elementos são modelados matematicamente e portanto não constitui uma alternativa viável [16].

Uma forma de evitar estes problemas consiste na utilização da modelagem dos

ramos de impedância nula proposta por Monticelli em [13],[14]. Esta proposta será utilizada neste trabalho. Seus conceitos básicos estão resumidos abaixo, onde um exemplo é incluído para demonstrar sua aplicação.

A Figura 2.1 representa a modelagem barra/ramo do sistema exemplo. Esta modelagem utiliza o conjunto de variáveis de estado convencionais (tensões complexas nas barras), representadas na Tabela 2.1.

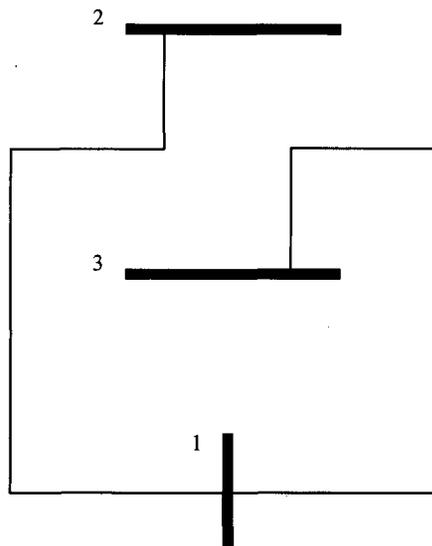


Figura 2.1: Sistema Barra-Ramo

Tabela 2.1 - Variáveis de Estado do Modelo Barra-Ramo

Variáveis de estado	Componentes
• Tensões complexas	$v_1, v_2, v_3, \delta_1, \delta_2$ e δ_3
Onde v_i é o módulo e δ_i o ângulo da tensão na barra i	

Neste exemplo a subestação formada pelas barras 2 e 3 é considerada como sus-

peita de conter ET.

Na modelagem a nível de seção de barra da subestação correspondente às barras 2 e 3 na Figura 2.1, faz-se necessária a representação detalhada de seus elementos. Esta modelagem representa todas as informações dos ramos de impedância nula contidos nesta subestação.

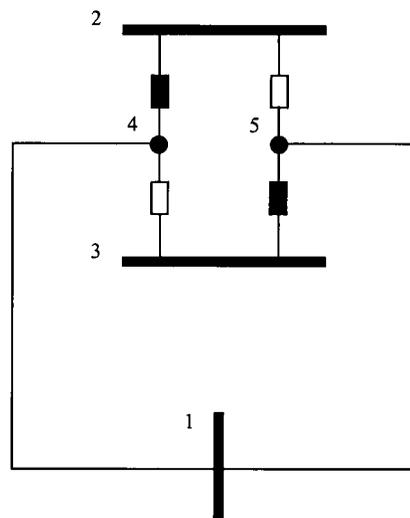


Figura 2.2: Sistema a Nível de Seção de Barra

Conforme acontece na modelagem barra/ramo, as tensões complexas de todas as barras do sistema devem ser incluídas no conjunto de variáveis de estado. Supondo que a configuração da subestação é conforme mostrado na Figura 2.2, verifica-se o aparecimento de duas seções de barra (4 e 5), cujas tensões complexas devem ser incluídas no conjunto de variáveis de estados. Além disto, é necessário inserir os fluxos de potência ativa (t) e reativa (u) dos ramos chaveáveis no conjunto de variáveis de

estado. Consequentemente, o novo conjunto de variáveis de estado é representado na

Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Variáveis de Estado do Modelo a Nível de Seção de Barra

Variáveis de estado	Componentes
• Tensões complexas	$v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, \delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$ e δ_5
• Fluxos de potência	$t_{2-4}, t_{2-5}, t_{3-4}, t_{3-5}, u_{2-4}, u_{2-5}, u_{3-4}$ e u_{3-5}

A inclusão destas novas grandezas no conjunto de variáveis de estado permite a representação exata dos elementos de impedância nula nesta nova modelagem [13], pois os ramos de impedância nula podem ser modelados conforme a Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Informação das Restrições Operacionais

Disjuntor	Informação Obtida
• Aberto	O fluxo de potência $i - k$ é nulo, pois não existe “caminho” para a sua passagem;
• Fechado	As tensões complexas das barras i e k são iguais, pois não existem perdas neste ramo.

Dois novos conceitos são introduzidos nesta modelagem: as restrições operacionais, que incorporam todas as informações de *status* de disjuntores e chaves seccionadoras, e as restrições estruturais, que representam as informações referentes às injeções de potência nula e definições de barras de referência.

As informações sobre os ramos chaveáveis (2-4, 2-5, 3-4 e 3-5) formam as restrições operacionais do sistema.

A condição de operação real do sistema, apresentada na Figura 2.1, deve permanecer inalterada. Por este motivo, as injeções de potências ativas (P) e reativas

(Q) das seções de barra 4 e 5 devem necessariamente possuir valores nulos. Estas informações, mais a definição da barra de referência, formam o conjunto de restrições estruturais.

A Tabela 2.4 apresenta as informações contidas nas restrições operacionais e estruturais.

Tabela 2.4 - Conjunto das Restrições Operacionais e Estruturais

Restrições	Informações
• Operacionais	disjuntor 2-4 fechado $\iff v_2 = v_4$ e $\delta_2 = \delta_4$
	disjuntor 2-5 aberto $\iff t_{2-5} = 0$ e $u_{2-5} = 0$
	disjuntor 3-4 aberto $\iff t_{3-4} = 0$ e $u_{3-4} = 0$
	disjuntor 3-5 fechado $\iff v_3 = v_5$ e $\delta_3 = \delta_5$
• Estruturais	injeção de potência ativa $\iff P_4 = 0$ e $P_5 = 0$
	injeção de potência reativa $\iff Q_4 = 0$ e $Q_5 = 0$
	barra de referência $\iff \delta_1 = 0$

Capítulo 3

Detecção e Identificação de Erros de Topologia

3.1 Introdução

A operação dos sistemas elétricos de potência é responsabilidade dos centros de controle, cuja decisões são baseadas nas estimativas das variáveis de estado deste sistema. Erros nestas estimativas geralmente provocam análises não condizentes com as condições reais de operação e portanto as decisões resultantes podem levar a ações operativas inadequadas.

Erros de topologia geralmente provocam falsas estimativas para as variáveis de estado. Por esta razão, a detecção, identificação e correção destes erros são essenciais para a operação segura e confiável do sistema.

Este capítulo apresenta métodos de detecção e identificação de ET, onde propostas recentes para a modelagem dos ramos de impedância nula [41], [13] são utilizadas. Estes métodos baseiam-se na modelagem do sistema a nível de seção de barra e diferenciam-se entre si essencialmente quanto à metodologia empregada para a identificação dos ET.

3.2 Processamento de Erros de Topologia através do Método do *Tableau* Esperso

Conforme explanado no Capítulo 2, o método do *Tableau* esperso possui a característica de fornecer os multiplicadores de Lagrange (3.1) e sua matriz de covariância (3.3) sem a necessidade de efetuar cálculos adicionais após a solução do método.

Definindo a representação do conjunto de restrições operacionais por $h_o(x)$ e o conjunto de restrições estruturais por $h_s(x)$, a modelagem do método do *Tableau* esperso utilizado em [15],[16] é representada através da equação (3.1), onde o conjunto de restrições de igualdade $G(x)$ é substituído por $h_o(x)$ e $h_s(x)$.

$$\begin{bmatrix} -P^{-1} & H_m^T(x^k) & H_s^T(x^k) & H_o^T(x^k) \\ H_m(x^k) & R & 0 & 0 \\ H_s(x^k) & 0 & 0 & 0 \\ H_o(x^k) & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \lambda_m \\ \lambda_s \\ \lambda_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -P^{-1} \bar{x} \\ z_m - h(x^k) \\ -h_s(x^k) \\ -h_o(x^k) \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Na equação (3.1), as matrizes H_s e H_o são definidas como:

$$H_s(x^k) \triangleq \left. \frac{\partial h_s(x)}{\partial x} \right|_{x=x^k} ;$$

$$H_o(x^k) \triangleq \left. \frac{\partial h_o(x)}{\partial x} \right|_{x=x^k} .$$

De acordo com as equações (2.32) e (2.33) do capítulo anterior, a matriz de covariância W dos multiplicadores de Lagrange é obtida conforme abaixo:

$$\begin{bmatrix} -\Sigma & C1^T & C2^T & C3^T \\ C1 & W_{11} & W_{12} & W_{13} \\ C2 & W_{21} & W_{22} & W_{23} \\ C3 & W_{31} & W_{32} & W_{33} \end{bmatrix} \triangleq \begin{bmatrix} -P^{-1} & H_m^T(x^k) & H_s^T(x^k) & H_o^T(x^k) \\ H_m(x^k) & R & 0 & 0 \\ H_s(x^k) & 0 & 0 & 0 \\ H_o(x^k) & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \quad (3.2)$$

$$W \triangleq \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & W_{13} \\ W_{21} & W_{22} & W_{23} \\ W_{31} & W_{32} & W_{33} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Estas características de obtenção de λ e W , agilizam a obtenção dos MLN, calculados através de (3.4), os quais são utilizados na detecção [15],[16] e identificação dos ET [15].

$$\lambda_{N(i)} = \frac{\lambda_i}{\sqrt{W_{ii}}} \quad (3.4)$$

Através de (3.1) verificamos que cada multiplicador de Lagrange corresponde a uma das linhas da matriz, $H_m(x^k)$, $H_s(x^k)$ e $H_o(x^k)$, ou seja, multiplicadores de Lagrange referentes às medidas, às restrições estruturais e às restrições operacionais. Os valores dos MLN correspondentes podem ser usados na definição de testes estatísticos para a aceitação ou rejeição das informações contidas nestas linhas. Especificamente quanto aos ET, observa-se que das equações (3.2) e (3.4) os MLN calculados a partir dos elementos diagonais de W_{33} são os que traduzem a sensibilidade da função-objetivo às restrições referentes às posições de disjuntores, sendo portanto os mais adequados para a identificação deste tipo de erro de modelagem.

3.2.1 Criticidade de Medidas e Restrições

Supondo um sistema observável em relação a um dado plano de medição, os procedimentos para detecção e identificação de ET podem ser comprometidos por deficiências de redundância verificadas neste plano. Dentro destas deficiências, destacam-se a existência de medidas ou restrições críticas e de conjuntos de medidas e/ou restrições críticas [42],[5],[43].

Uma análise prévia de criticidade de informações (medidas e restrições) deve ser

realizada, com o intuito de melhorar o plano de medição atual e propiciar aos analistas uma antecipação dos efeitos destas deficiências sobre os valores dos MLN e resíduos normalizados.

Um estudo sobre as relações existentes entre as medidas críticas e o conjunto de medidas críticas com seus resíduos normalizados foi apresentado em [42]. Recentemente, um estudo sobre as relações existentes entre as medidas ou restrições críticas e o conjunto de medidas e/ou restrições críticas com seus MLN foi proposto em [43]. A Tabela 3.1 ressalta as informações relevantes para o presente trabalho.

Conforme indicado em [15] e revisto no Apêndice B, verifica-se que resíduos normalizados e os MLN referentes ao mesmo problema de estimação de estados são iguais. Portanto, as informações da Tabela 3.1 são associadas a estas variáveis.

Tabela 3.1 - Relações das Informações com os Resíduos Normalizados e MLN

Informações	Resíduos Normalizados e MLN
· Críticas	Valores iguais a zero ($r_N = 0$);
· Conjunto crítico	Os módulos dos r_N 's ou MLN para todos os elementos do conjunto crítico são iguais entre si.

Da Tabela 3.1 verifica-se que as informações críticas são impossíveis de serem detectadas, pois as mesmas possuem MLN iguais a zero. Quanto a erros envolvendo elementos de conjuntos críticos, os mesmos podem ser detectados mas não são identificáveis, pois seus MLN são iguais entre si [43].

3.2.2 Detecção de Erros de Topologia

Na detecção de ET os MLN associados às restrições operacionais que possuam valores superiores a um limiar pré-estabelecido (3.0 desvios padrões por exemplo) indicam a existência de ET na modelagem utilizada. Além da detecção, os valores acima do limiar informam quais os ramos chaveáveis suspeitos à fase subsequente de identificação dos ET.

De acordo com [15], um único multiplicador de Lagrange normalizado acima do limiar indica tanto a detecção quanto a identificação do elemento erroneamente modelado. Em situações onde vários valores ultrapassem o limiar, a identificação dos elementos suspeitos é necessária pois os ET podem provocar um espalhamento dos erros sobre multiplicadores de Lagrange associados a outras medidas e/ou restrições.

Após a fase de detecção, segue-se a etapa de identificação dos ET. Nas seções seguintes, dois métodos de identificação são apresentados: o primeiro é baseado em um procedimento enumerativo e o segundo, mais adequado à utilização em tempo real, baseia-se no uso de estatística Bayesiana e testes de hipóteses.

3.3 Identificação Baseada no Método Enumerativo

Esta metodologia, proposta em [15], utiliza a modelagem do sistema a nível de seção de barra e os MLN referentes às restrições operacionais ($h_o(x)$) para a identificação de ET.

A identificação dos ET ocorre através de novas estimações de estados. Cada re-estimação corresponde a uma nova combinação dos *status* dos elementos suspeitos. Portanto, considerando que nds é o número de disjuntores suspeitos, há $(2^{nds} - 1)$ re-estimações de estados a serem realizadas. No curso das $(2^{nds} - 1)$ estimações, a combinação para a qual todos os MLN, apresentarem valor absoluto abaixo do limiar será considerada a combinação correta.

Este método apresenta dificuldades para a aplicação em tempo real, pois o esforço computacional exigido pela sequência de novas estimações pode ser excessivo.

3.4 Identificação Baseada em Estatística Bayesiana

No intuito de melhorar a aplicabilidade da identificação dos ET em tempo real, em [16] é apresentada a proposta de utilização de estatística Bayesiana e testes de hipóteses. Este método melhorou o esforço computacional em relação ao estudo anterior, pois não necessita de novas estimações de estado.

3.4.1 Testes de Hipóteses via Teorema de Bayes

Nos testes de hipóteses, o conjunto de *status* dos disjuntores suspeitos no momento da detecção do erro de topologia constitui a Hipótese Básica. As demais combinações destes *status* formam as chamadas Hipóteses Alternativas [16].

Para exemplificar estas definições, considere três disjuntores fictícios e considerados suspeitos, d1, d2 e d3, respectivamente com *status* aberto(A), fechado(F) e aberto, no momento em que é realizada a detecção do erro de topologia. Portanto, $nds = 3$, e a hipótese básica (H_0) do problema corresponde a combinação “A F A”. As hipóteses alternativas (H_i) representam as outras ($2^{nds}-1$) configurações possíveis, e estão relacionadas na Tabela 3.2

Tabela 3.2 - Hipóteses Alternativas para o Exemplo

Disjuntores	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5	H_6	H_7
d1	A	A	A	F	F	F	F
d2	A	A	F	A	A	F	F
d3	A	F	F	A	F	A	F

Após o esclarecimento dos conceitos de hipóteses básica e alternativas, mostra-se a seguir como os mesmos são empregados para a identificação da hipótese correta.

A utilização do teorema de Bayes [44] visa fornecer as probabilidades de cada hipótese a partir dos resultados da estimação de estados referentes à hipótese básica. Ou seja, tendo por base estes resultados, busca-se encontrar qual das hipóteses recebe maior respaldo por parte das medidas e restrições processadas pelo estimador [16]. Estas probabilidades são representadas por $P(H_i | z)$. A forma apropriada do teorema de Bayes que permite o cálculo de $P(H_i | z)$ é [44]:

$$P(H_i | z) = \frac{f(z | H_i) P(H_i)}{\sum_{j=1}^{2^{nds}} f(z | H_j) P(H_j)} \quad (3.5)$$

onde $P(H_i | z)$ é a probabilidade condicional *a posteriori* da hipótese i , $f(z | H_i)$ é

a função densidade de probabilidade condicional de z dado que H_i é verdadeira e $P(H_i)$ é a probabilidade *a priori* da hipótese i .

A expressão de $f(z | H_i)$, conforme deduzida em [16], é representada abaixo:

$$f(z | H_i) = (2\pi)^{-\frac{m}{2}} \sqrt{|W|} e^{\left\{-\frac{1}{2}(z-H\bar{x})^T W (z-H\bar{x})\right\}} \quad (3.6)$$

onde

m : número total de medidas, restrições estruturais e operacionais;

$|W|$: determinante da inversa da matriz de covariância do vetor z na hipótese i , isto é, $W = (H P H^T + R)^{-1}$;

z : vetor contendo os valores das medidas, restrições estruturais e operacionais, respectivamente $[z_m^T \ 0^T \ 0^T]^T$;

H : matriz contendo as informações de $H_m(x^k)$, $H_s(x^k)$ e $H_{o(i)}(x^k)$;

\bar{x} : informações *a priori* das variáveis de estado.

O valor de $P(H_i)$ pode ser obtido através de distribuição binomial, e dado por:

$$P(H_i) = \binom{nds}{k} p^k (1-p)^{(nds-k)} \quad (3.7)$$

onde nds é o número de disjuntores suspeitos; k é o número de disjuntores suspeitos que tiveram os *status* modificados da hipótese H_0 em comparação a H_i e p é a probabilidade de cada disjuntor ter seu *status* modificado em H_i comparado à H_0 ($p = 0.5$).

Ao final, o maior valor de $P(H_i | z)$ indica a alternativa que recebe maior respaldo das medidas e pseudomedidas do plano de medição sendo portanto, considerada a nova topologia da rede.

Para determinar as $P(H_i | z)$ de cada hipótese, é necessário calcular as correspondentes $f(z | H_i)$'s, dadas pela equação (3.6). As técnicas computacionais utilizadas em [45] foram adaptadas para o problema de identificação de ET [16], reduzindo o esforço computacional exigido para a realização desta tarefa.

A vantagem desta metodologia em relação à anterior é que a mesma não requer novas estimações de estados para identificar a hipótese alternativa correta. Tomando como exemplo a Tabela 3.2, enquanto que no Método Enumerativo há necessidade de, no pior caso, se realizar mais sete estimações de estados, no método baseado em estatísticas Bayesianas apenas as probabilidades condicionais *a posteriori* das hipóteses necessitam ser calculadas.

Testes de hipóteses baseados no teorema de Bayes foram recentemente utilizadas em [46],[45],[47],[37] na identificação de transações bilaterais inadvertidas e em [16] na identificação de ET.

Capítulo 4

Identificação de Erros de Topologia Associada a Métodos Ortogonais

4.1 Introdução

A base estatística para identificação de ET associada a métodos ortogonais tem essencialmente a mesma concepção teórica da metodologia utilizando o método do *Tableau* esparso, proposto em [16], onde testes de hipóteses baseados em estatística Bayesiana são utilizados. A implementação computacional, porém, difere consideravelmente da utilizada em [16], já que a formulação ortogonal empregada neste trabalho tem características distintas da implementação baseada no método do *Tableau* Esparso. Este capítulo contém a formulação básica dos estimadores ortogonais, apresentada no Capítulo 2, bem como a inclusão das restrições de igualdade nesta formu-

lação. Posteriormente a contribuição desta dissertação é apresentada, a qual inclui: (a) a representação das restrições estruturais e operacionais; (b) a inclusão das informações *a priori* sobre as variáveis de estado; e, (c) a principal meta deste trabalho, que é a identificação dos ET associada a estimadores ortogonais.

A partir deste capítulo é adotado o modelo do estimador de estados linearizado, onde apenas medidas de potência ativa (injeções e fluxos) são utilizadas. De acordo com as aproximações do estimador linearizado estas grandezas são dependentes apenas das aberturas angulares nas linhas de transmissão [5]. O estimador de estados linearizado é resumidamente apresentado no Apêndice A.

4.2 Formulação do Estimador de Estados

Conforme verificado no Capítulo 2, a formulação do estimador de estados baseado no método dos mínimos quadrados ponderados é dada por:

$$J(x) = [z_m - H_m x]^T R_m^{-1} [z_m - H_m x] \quad (4.1)$$

Na formulação linear, $h_m(x)$ é linear em x (x = ângulos das tensões nas barras) e portanto a matriz de observação H_m é constante, onde:

$$H_m = \frac{\partial h_m(x)}{\partial x} \quad (4.2)$$

Considera-se que os erros de medição são independentes entre si, o que justifica o uso de uma forma diagonal para a matriz R_m isto é,

$$E\{\eta^T \eta\} = R_m = \text{diag}\{\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_m^2\} \quad (4.3)$$

onde σ_i^2 é a variância da i -ésima medida.

Modificando a equação (4.1) conforme abaixo:

$$J(x) = [z_m - H_m x]^T R_m^{-0.5} R_m^{-0.5} [z_m - H_m x] \quad (4.4)$$

e como $R_m = R_m^T$ pois R_m é diagonal, então:

$$J(x) = [R_m^{-0.5} (z_m - H_m x)]^T [R_m^{-0.5} (z_m - H_m x)] \quad (4.5)$$

Como a norma Euclidiana não se altera com a aplicação de transformações ortogonais [5],[21] armazenadas na matriz Q , então a equação (4.6) é verdadeira.

$$J(x) = [Q R_m^{-0.5} (z_m - H_m x)]^T [Q R_m^{-0.5} (z_m - H_m x)] \quad (4.6)$$

Sendo Q definida de modo a triangularizar H_m , temos:

$$[Q] * [R_m^{-0.5} H_m] = \begin{bmatrix} U \\ 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} (n \times n) \\ (m - n \times n) \end{matrix} \quad (4.7)$$

$$[Q] * [R_m^{-0.5} z_m] = \begin{bmatrix} v \\ e \end{bmatrix} \begin{matrix} (n \times 1) \\ (m - n \times 1) \end{matrix} \quad (4.8)$$

A equação (4.6) pode então ser representada por:

$$J(x) = (v - U x)^T (v - U x) + e^2 \quad (4.9)$$

onde e^2 é a soma dos quadrados dos resíduos de estimação [39],[3]. O valor de x que minimiza $J(x)$ é encontrado através de (4.10):

$$U x = v \quad (4.10)$$

onde a matriz U é triangular superior e a solução é obtida através de substituição inversa.

4.2.1 Inclusão das Restrições de Igualdade

A inclusão das restrições de igualdade nos métodos ortogonais para a solução de problemas baseados no método dos mínimos quadrados ponderados vem sendo estudada continuamente. Em [48],[49],[50],[22], encontram-se métodos para solucionar problemas com restrições de igualdade através de transformações ortogonais. Uma análise destes métodos é realizado em [21], onde o método proposto por Van Loan, em 1985 [22], foi considerado o mais apropriado à solução dos problemas contendo restrições de igualdade. Por esta razão, este método foi utilizado neste trabalho e é apresentado no Apêndice C.

O problema linearizado restrito é formulado como:

$$\begin{aligned} \text{Min } J(x) &= [z_m - H_m x]^T R_m^{-1} [z_m - H_m x] \\ \text{s.a. } Gx &= 0 \end{aligned} \tag{4.11}$$

A matriz G é constante nesta formulação, pois $g(x)$ é linear em x , onde :

$$G = \frac{\partial g(x)}{\partial x} \tag{4.12}$$

Este problema é resolvido pelo método dos pesos com refinamento iterativo das restrições de igualdade (IRWM), proposto em [22]. A aplicação do método IRWM à EESP é detalhado em [21] e sumarizado no Apêndice C desta dissertação.

4.3 Representação das Restrições Operacionais e Estruturais

No Capítulo 3, seguindo o que é feito em [15],[16], as restrições operacionais e estruturais $h_o(x) = 0$ e $h_s(x) = 0$ são ambas inseridas no conjunto de restrições de igualdade de modo que, após a linearização destas restrições, a matriz G definida em (4.12) torna-se:

$$G = \begin{bmatrix} H_o \\ H_s \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

onde

$$H_o = \frac{\partial h_o(x)}{\partial x}; \quad (4.14)$$

$$H_s = \frac{\partial h_s(x)}{\partial x}. \quad (4.15)$$

Nesta dissertação, é dado um tratamento diferenciado às restrições operacionais e estruturais. Apenas as restrições estruturais são consideradas restrições de igualdade, ou seja, a equação (4.13) fica reduzida a:

$$G = [H_s] \quad (4.16)$$

Portanto, no método IRWM (revisto no Apêndice C) apenas as restrições estruturais sofrem o processo de refinamento iterativo. Há uma explicação mais intuitiva para isto: admitindo incertezas na topologia (e não apenas nas medidas), associam-se variâncias às informações sobre a topologia, que estão em H_o .

O tratamento diferenciado das restrições operacionais, ou seja, não representá-las como restrições de igualdade, é portanto consequência de dois fatores:

1. Através da formulação apresentada em (4.11), verifica-se que todas as informações contidas nas restrições de igualdade são determinísticas, ou seja, supõem que não há incertezas sobre as mesmas;
2. Do ponto de vista computacional, o refinamento iterativo das restrições de igualdade (supostas determinísticas) pelo método IRWM, dificultaria a detecção dos ET. Esta dificuldade está relacionada à minimização dos resíduos das restrições de igualdade no processo iterativo.

Em virtude destes argumentos, as informações operacionais sobre os *status* de disjuntores são representados como informações probabilísticas, ou seja, pseudomedidas, ao invés de informações determinísticas. Isto significa que os dados sobre a topologia da rede recebem o mesmo tratamento dado às medidas do plano de medição.

Conforme visto no Capítulo 2, o valor dos pesos das medidas estão relacionados à precisão dos medidores correspondentes, de forma que medidores mais precisos recebem ponderações maiores. Neste trabalho, é suposto que a precisão das informações topológicas tem o mesmo nível de precisão da medida analógica mais precisa do plano de medição.

Em função da discussão acima, o problema de EESP com representação explícita

dos ramos chaveáveis passa a ser formulada como:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & 1/2 \{ (z_m - H_m x)^T R_m^{-1} (z_m - H_m x) + (H_o x)^T R_o^{-1} (H_o x) \} \\ \text{s.a.} \quad & -H_s x = 0 \end{aligned} \tag{4.17}$$

Define-se r_o como o vetor de resíduos associados aos dados topológicos sobre os *status* de disjuntores da rede, dado por:

$$r_o \triangleq -H_o x \tag{4.18}$$

4.4 Informações *a Priori*

As informações *a priori* são informações previamente disponíveis sobre os valores das variáveis de estado [28]. Estas informações podem ser incluídas no processo de solução, conforme proposto em [16] pois, entre outros motivos, contribuem para melhorar o condicionamento numérico do problema de estimação de estados.

Em transformações ortogonais, precisamente nos métodos solucionados por rotações de Givens, a inclusão destas informações é facilmente implementada através da inicialização dos pesos associados às linhas da matriz triangular U , que compõem a matriz diagonal D {ver equações (2.42) e (2.43)}. A argumentação que sustenta esta abordagem é dada abaixo.

De acordo com o Capítulo 2, item 2.6.2, verifica-se que a variável w equivale ao peso de cada linha da matriz que sofre o processo de transformações ortogonais. Em EESP o peso destas linhas equivale à importância de cada informação (medida ou

restrição) na solução do problema, neste trabalho representada por $R_{m_{ii}}^{-1}$, $R_{o_{ii}}^{-1}$ e μ^2 . Também verifica-se que a variável d_{ii} corresponde ao peso de cada linha da matriz triangular superior U , e esta matriz por sua vez está relacionada às variáveis de estado do sistema. Desta forma, fazendo uma analogia entre as variáveis w e d percebe-se que o valor atribuído a d_{ii}^0 pode ser interpretado como o peso dado ao valor de x_i^0 . Como no método dos mínimos quadrados ponderados os pesos são tomados como o inverso das variáveis associadas aos dados, d_{ii}^0 pode ser interpretada como o inverso da variância atribuída a x_i^0 .

Na abordagem convencional para a EESP, o valor inicial da variável d_{ii} é zero, indicando uma variância infinita, associada às informações *a priori*. No caso de haver algum conhecimento do grau de incerteza sobre o valor inicial para o estado, x_i^0 , este conhecimento pode ser quantificado sob a forma de um valor de variância, cujo inverso é então utilizado como valor inicial de d_{ii} , $i = 1, 2, \dots, n$.

Considerando que todos os valores do intervalo das informações *a priori* tenham a mesma probabilidade de ocorrência (Distribuição Uniforme), então são encontrados os valores das variâncias correspondentes e apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Variâncias dos Erros dos Estados "a Priori"

Estado <i>a priori</i>	Ângulo das Tensões (rad.)	Fluxo de Potência (pu.)
Intervalo considerado	$[-\pi/2, \pi/2]$	$[-\gamma_{ij}, \gamma_{ij}]$
Variância do erro (σ^2)	$(\pi^2)/12$	$(\gamma_{ij}^2)/3$
Onde γ_{ij} é a capacidade de transmissão da linha ij e $\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x)^2 f(x) dx$.		

4.5 Detecção de Erros de Topologia

Com a mudança de tratamento dada às informações operacionais, que agora passam a ser tratadas como pseudomedidas as invés de restrições, o uso de MLN para processamento de ET, conforme visto na seção 2.5, deixa de ser adequado. Em seu lugar serão utilizados os resíduos normalizados, também definidos na seção 2.5, para as informações operacionais, com o mesmo objetivo.

É oportuno ressaltar que os multiplicadores de Lagrange e os resíduos guardam a seguinte relação entre si {ver Apêndice B, equação (B.12)}.

$$\lambda_i = R_{ii}^{-1} r_i \quad (4.19)$$

Portanto, através de análises dos valores dos resíduos normalizados associados às informações operacionais, a detecção dos ET é alcançada. A detecção consiste em se verificar a existência de resíduos normalizados cujos valores absolutos são superiores a um limiar pré-determinado (um valor típico para este limiar é 3.0, já que 99,7% dos valores de uma variável aleatória com distribuição normal e média zero, encontram-se no intervalo $[-3\sigma, +3\sigma]$, onde σ é o desvio padrão).

Anterior a esta análise, deve ser realizado o cálculo dos resíduos (r_o), da matriz de covariância dos erros (C_{r_o}) e dos resíduos normalizados (r_{oN}) relativos aos dados topológicos.

4.5.1 Cálculo dos Resíduos

O cálculo dos resíduos das restrições operacionais é facilmente obtido através da formulação apresentada em (4.17), resultando em:

$$r_o = -H_o x \quad (4.20)$$

O próximo passo é encontrar a matriz de covariância dos resíduos dos dados topológicos.

4.5.2 Obtenção da Matriz de Covariância dos Resíduos

O processo de obtenção da matriz C_{r_o} necessita de algumas relações encontradas na solução do método IRWM. Neste método verifica-se que o processo de transformação ortogonal é realizado sobre a matriz M , onde:

$$M = R^{-0,5} H \quad (4.21)$$

A equação (4.21) deve incorporar todas as informações do sistema, ou seja, as medidas do plano de medição, dados topológicos e restrições estruturais. Por esta razão, as matrizes H e R são formadas conforme abaixo:

$$H = \begin{bmatrix} H_m \\ H_o \\ H_s \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

$$R = \begin{bmatrix} R_m & 0 & 0 \\ 0 & R_o & 0 \\ 0 & 0 & I \mu^{-2} \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

onde I é a matriz identidade de dimensão $s \times s$, s é o número de restrições estruturais, e μ é um fator de ponderação das restrições estruturais utilizado no método dos pesos com refinamento iterativo (ver Apêndice C). A inclusão do multiplicador μ na matriz R é necessário, pois o mesmo informa o peso das restrições de igualdade (estruturais) na solução do laço externo do IRWM.

A matriz de transformações ortogonais do método de Givens deve obedecer às seguintes relações:

$$Q M = \begin{bmatrix} U \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

$$Q^T D Q = I \quad (4.25)$$

onde a matriz D armazena os valores das variáveis d_{ii} em sua diagonal principal. O aparecimento da matriz D na equação (4.25) é consequência da utilização do método de Givens sem raízes quadradas.

Com estas relações e através da equação da matriz de covariância dos resíduos (C_r) utilizada no método da equação Normal [29], inicia-se o processo de obtenção da matriz C_{r_o} . A expressão que define a matriz C_r é dada por (4.26):

$$C_r = R - H (H^T R^{-1} H)^{-1} H^T \quad (4.26)$$

O termo a ser invertido, no lado direito de (4.26) pode ser re-escrito como:

$$H^T R^{-1} H = H^T R^{-0,5} R^{-0,5} H \quad (4.27)$$

Sabendo que $R = R^T$, pois R é diagonal e usando (4.25) na equação acima, temos:

$$H^T R^{-1} H = H^T (R^{-0,5})^T (Q^T D Q) R^{-0,5} H \quad (4.28)$$

$$= (Q R^{-0,5} H)^T D (Q R^{-0,5} H) \quad (4.29)$$

$$= \begin{bmatrix} U \\ 0 \end{bmatrix}^T D \begin{bmatrix} U \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

Como a parte nula "0" da equação (4.30) não proporciona nenhuma informação adicional, esta parcela pode ser ignorada juntamente com sua respectiva parcela da matriz D . Desta forma a equação (4.27) é reduzida e apresentada em (4.31)

$$H^T R^{-1} H = U^T D U \quad (4.31)$$

A equação (4.26) utiliza a inversa da expressão acima, que é dada por:

$$(H^T R^{-1} H)^{-1} = U^{-1} D^{-T} U^{-T} \quad (4.32)$$

Utilizando (4.32) em (4.26), encontra-se:

$$C_r = R - H U^{-1} D^{-T} U^{-T} H^T \quad (4.33)$$

Analisando a equação (4.33) observa-se a presença de elementos semelhantes, que é explorada e através da definição:

$$V \triangleq H U^{-1} \quad (4.34)$$

sendo fornecida a nova representação de (4.33):

$$C_r = R - V D^{-T} V^T \quad (4.35)$$

Como a matriz D é diagonal, a equação (4.35) é re-escrita e encontra-se a fórmula da matriz de covariância de todas as informações do sistema, a partir da formulação ortogonal:

$$C_r = R - V D^{-1} V^T \quad (4.36)$$

Considerando m o número de medidas, o o número de restrições operacionais e s o número de restrições estruturais, as matrizes de covariância dos resíduos destas informações são obtidas conforme demonstrado abaixo:

$$C_r = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & m & m+o & m+o+s \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ m \\ m+o \\ m+o+s \end{matrix} & \begin{bmatrix} C_{rm} & XX_1 & XX_2 \\ XX_3 & C_{ro} & XX_4 \\ XX_5 & XX_6 & C_{rs} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (4.37)$$

4.5.3 Cálculo dos Resíduos Normalizados

Após encontrados os resíduos e sua matriz de covariância, os resíduos normalizados para os dados topológicos do problema (*status* dos disjuntores) são obtidos através da equação abaixo:

$$r_{oN(i)} = \frac{r_o(i)}{\sqrt{C_{ro(ii)}}} \quad i = 1, 2, \dots, o. \quad (4.38)$$

Note que apenas os elementos da diagonal principal da matriz C_{ro} são utilizados.

Caso aconteça a detecção dos ET, resta a identificação dos elementos erroneamente modelados. O procedimento de identificação inicia procedendo à seleção dos $r_{oN(i)}$ que possuem valores absolutos maiores que o limiar (3.0), sendo seus respectivos elementos são considerados suspeitos de terem sido erroneamente modelados.

Em seguida, os demais passos do procedimento de identificação são realizados, conforme descrito abaixo.

4.6 Identificação de Erros de Topologia

Realizada a detecção do erro de topologia, as condições de operação dos disjuntores suspeitos são modificadas sequencialmente, de modo a gerar o conjunto de hipóteses alternativas (H_i).

Estas mudanças devem ser refletidas na matriz U , pois a mesma é utilizada no cálculo das probabilidades de H_i quando da aplicação do teorema de Bayes. A determinação das alterações em U correspondentes a cada hipótese alternativa é abordada a seguir.

4.6.1 Alterações na Matriz Triangular Superior Unitária “U”

A obtenção da matriz U , para cada hipótese alternativa H_i é alcançada através da matriz U da hipótese básica H_0 , ou seja, não é necessário reprocessar todas as informações para obter a matriz U_i .

Através da fase de detecção de ET, os disjuntores suspeitos são determinados. Os demais disjuntores ficam com seus *status* inalterados, e portanto suas informações não sofrem modificações, ou seja, estas informações não se alteram em H_i comparadas à H_0 e desta forma não necessitam de reprocessamento.

Os disjuntores suspeitos possuem, em algumas hipóteses alternativas, seu *status* modificado em relação a H_0 . Na ocorrência desta modificação, a informação contida em H_0 deve ser retirada de U , formando U_i , e a nova informação referente à H_i deve ser adicionada à U_i . Estas operações são realizadas tendo por base a propriedade de reprocessamento de dados das rotações de Givens [39],[3] e são sumarizadas conforme a Tabela 4.2.

A utilização da propriedade de reprocessamento de dados das rotações de Givens diminui o tempo necessário à obtenção de C_r referente às hipóteses alternativas, pois as medidas, restrições estruturais e as informações operacionais dos disjuntores que não modificaram sua condição de operação não necessitam de um novo processamento através das transformações ortogonais.

Tabela 4.2 - Alterações na Matriz Triangular Superior “U”

Operação	Procedimento
• Retirada de informações	Supondo que a informação recebeu o peso de valor w no processamento original correspondente à hipótese H_0 , sua remoção consiste em seu reprocessamento, porém com peso igual ao negativo do peso inicial, ou seja $(-w)$.
• Inserir novas informações	Processo idêntico ao normalmente utilizado em H_0 , onde o peso de cada informação é fornecido por seu respectivo valor de w . A única diferença é que o ponto de partida utilizado é a matriz U_i .

4.6.2 Aplicação do Teorema de Bayes

A aplicação do Teorema de Bayes tem por objetivo final encontrar a modelagem correta do sistema. Como já mencionado, a partir dos resultados da estimação referentes à hipótese básica pode-se encontrar as probabilidades de todas as hipóteses alternativas, ou seja, não é necessária a re-estimação dos estados.

O teorema de Bayes é demonstrado em [44] e adaptado à EESP em [16] para a identificação de ET e em [37] para a identificação de transações bilaterais não-reveladas. Sua forma relevante estabelece que:

$$P(H_i | z) = \frac{f(z | H_i) P(H_i)}{\sum_{j=1}^{nds} f(z | H_j) P(H_j)} \quad (4.39)$$

onde $P(H_i | z)$ é a probabilidade condicional *a posteriori* da hipótese i ; $z \triangleq [z_m^T \ 0^T \ 0^T]^T$; $f(z | H_i)$ é a função densidade de probabilidade condicional de

z dado que H_i é verdadeira; $P(H_i)$ é a probabilidade *a priori* da hipótese i e nds é o número de disjuntores suspeitos.

Para calcular $P(H_i | z)$, é necessário o cálculo de $f(z | H_i)$ e o conhecimento de $P(H_i)$ para todas as (2^{nds}) hipóteses. O valor de $f(z | H_i)$ é obtido através da equação abaixo [44]:

$$f(z | H_i) = (2\pi)^{-\frac{m}{2}} \sqrt{|W_i|} e^{\left\{-\frac{1}{2} (z-H\bar{x})^T W_i (z-H\bar{x})\right\}} \quad (4.40)$$

onde m é o número total de medidas, restrições estruturais e informações operacionais; $|W_i|$ o determinante da matriz de covariância do vetor z na hipótese i ; H a matriz contendo as informações de $H_m(x^k)$, $H_s(x^k)$ e $H_{o(i)}(x^k)$ e \bar{x} contém as informações *a priori* sobre as variáveis de estado.

A matriz W é obtida através da equação abaixo [16]:

$$W = (H P H^T + R)^{-1} \quad (4.41)$$

entretanto, existe uma forma alternativa de obter W a partir da matriz C_r . Esta forma é mais atraente ao método ortogonal utilizado e pode ser escrita como:

$$W = R^{-1} C_r R^{-1} \quad (4.42)$$

O cálculo de $P(H_i)$ pode ser obtido através de distribuição binomial, sendo dado por:

$$P(H_i) = \binom{nds}{k} p^k (1-p)^{(nds-k)} \quad (4.43)$$

onde k é o número de disjuntores suspeitos que tiveram os *status* modificados da hipótese H_0 em comparação a H_i e p é a probabilidade de cada disjuntor ter seu *status* modificado em H_i comparado a H_0 .

Ao final, o maior valor de $P(H_i | z)$ indica a hipótese que recebe maior respaldo das medidas e pseudomedidas do plano de medição e portanto é considerada a topologia correta para a rede elétrica.

Capítulo 5

Simulações e Resultados

5.1 Introdução

Apresentam-se, neste capítulo, os resultados obtidos através da aplicação dos métodos ortogonais à identificação de ET, focado no capítulo anterior.

Estes resultados foram obtidos através da aplicação do método proposto sobre um sistema de 5 nós e 6 ramos e sobre parte do sistema IEEE de 30 barras, onde ET foram simulados. Os resultados apresentam os valores dos resíduos normalizados e das probabilidades *a posteriori* das hipóteses existentes de cada caso simulado.

Nas simulações realizadas os resíduos normalizados são comparados com os MLN obtidos através do método de identificação de ET baseado no *Tableau* Esparso [16] mencionado no Capítulo 3.

A ferramenta computacional utilizada para a implementação do método proposto

foi o MATLAB.

5.2 Sistema de 5 Nós e 6 Ramos

O sistema pode ser visualizado na Figura 5.1, cuja configuração de *status* de disjuntores para a condição de operação considerada, esta descrita abaixo:

Tabela 5.1 - Sistema em Operação

Disjuntor	Status
2 – 4	Fechado
2 – 5	Aberto
3 – 4	Aberto
3 – 5	Fechado

O plano de medição adotado para este sistema está descrito na Tabela 5.2 e é visualizada, na tonalidade azul, na Figura 5.1, onde os pontos correspondem aos fluxos de potência nos ramos e as setas às injeções de potência nas barras.

Tabela 5.2 - Plano de Medição

Fluxo de Potência Ativa	
• ramos convencionais	1-5 e 4-1
• ramos chaveáveis	2-4 e 3-5
Injeções de Potência Ativa	
• barras	1 e 2

As seções de barra 4 e 5 são consideradas barras de passagem, e por esta razão, as injeções de potência nestes nós são nulas, isto é, P_4 e P_5 são iguais a zero. A barra

considerada como barra de referência é a barra 1, logo $\delta_1 = 0$. Este conjunto de informações formam as restrições estruturais.

Um erro simples de topologia é inserido nesta configuração, onde o disjuntor 2-4 é erroneamente modelado como aberto, ou seja, ele está fechado em operação mas foi configurado como aberto. As restrições operacionais, da hipótese básica, são formadas pelas informações dos *status* dos disjuntores 2-4 ($\delta_2 - \delta_4 = 0$), 2-5 ($t_{25} = 0$), 3-4 ($t_{34} = 0$) e 3-5 ($\delta_3 - \delta_5 = 0$).

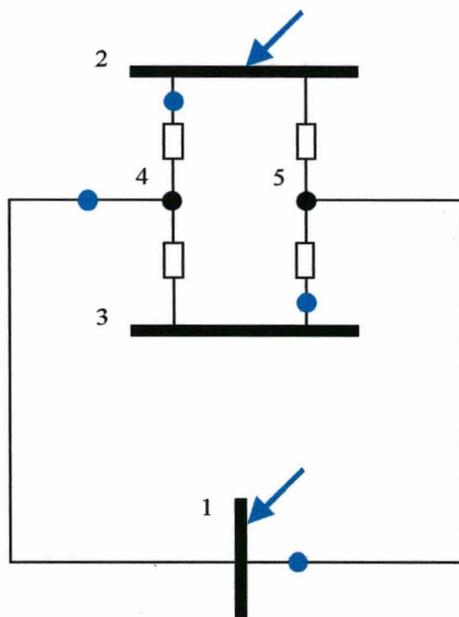


Figura 5.1: Sistema 5 Nós e 6 Ramos

Os resultados obtidos dos MLN (λ_{oN}) e dos resíduos normalizados (r_{oN}), respectivamente obtidos do método do *Tableau* Esparsos e do método Ortogonal, são visualizados abaixo.

Tabela 5.3 - Resultado dos λ_{oN} e r_{oN} do Sistema 5 Nós e 6 Ramos

Disjuntor	λ_{oN}	r_{oN}
2 – 4	680.1654	680.1663
2 – 5	270.6462	270.6470
3 – 4	317.6295	317.6307
3 – 5	-0.2006	-0.0015

Através dos resultados dos r_{oN} , verificamos que os elementos suspeitos são três (2-4, 2-5 e 3-4). O teste de hipóteses via teorema de Bayes é então utilizado para determinar a configuração destes elementos. Seus resultados são apresentados abaixo.

Tabela 5.4 - Resultado da Probabilidade *a Posteriori* do Sistema 5 Nós e 6 Ramos

Disjuntor	2 – 4	2 – 5	3 – 4	$P(H_i z)$
Hipótese H_0	Aberto	Aberto	Aberto	0.0
Hipótese H_1	Aberto	Aberto	Fechado	0.0
Hipótese H_2	Aberto	Fechado	Aberto	0.0
Hipótese H_3	Aberto	Fechado	Fechado	0.0
Hipótese H_4	Fechado	Aberto	Aberto	1.0
Hipótese H_5	Fechado	Aberto	Fechado	0.0
Hipótese H_6	Fechado	Fechado	Aberto	0.0
Hipótese H_7	Fechado	Fechado	Fechado	0.0

O disjuntor 3-5 não participou do processo de decisão, pois não foi identificado como errôneo.

A Hipótese H_0 equivale à hipótese básica e as restantes equivalem as hipóteses alternativas. A condição de operação adotada pelo critério de decisão foi a representada por Hipótese H_4 , pois a mesma possui o maior valor de $P(H_i | z)$, que corresponde à configuração do sistema em operação (Tabela 5.1). Observe que o disjuntor que alterou seu *status* em relação à hipótese básica foi o disjuntor 2-4, justamente o disjuntor cujo *status* foi modificado para provocar o erro de topologia.

5.3 Sistema IEEE de 30 Barras

Seguindo o mesmo procedimento adotado por [12], [15] e [16] as barras 12 e 15, do sistema IEEE 30 barras, são consideradas como suspeitas e sua modelagem, a nível de seção de barra, é apresentada na Figura 5.2. Os retângulos vazios representam disjuntores abertos e os retângulos preenchidos representam disjuntores fechados.

As barras foram renomeadas de acordo com a Tabela 5.5 abaixo:

Tabela 5.5 - Barras do Sistema IEEE de 30 Barras

Figura 5.2	1	2	3	4	5	6	7	8
IEEE 30 barras	13	12	4	14	15	16	23	18

Na Figura 5.2, as barras 9 e 10 e os nós de 11 à 19 são oriundos da modelagem a nível de seção de barra e por este motivo suas injeções de potência devem ser nulas. A barra 1 foi considerada como barra de referência e as barras 9 e 10 e as seções de barra 14 e 16 são vértices isolados. Para permitir a estimação de estados para toda a rede representada, os ângulos das tensões nestas barras devem ser definidos como

zero. Estas informações (injeções nulas e definição de ângulos) formam o conjunto das restrições estruturais.

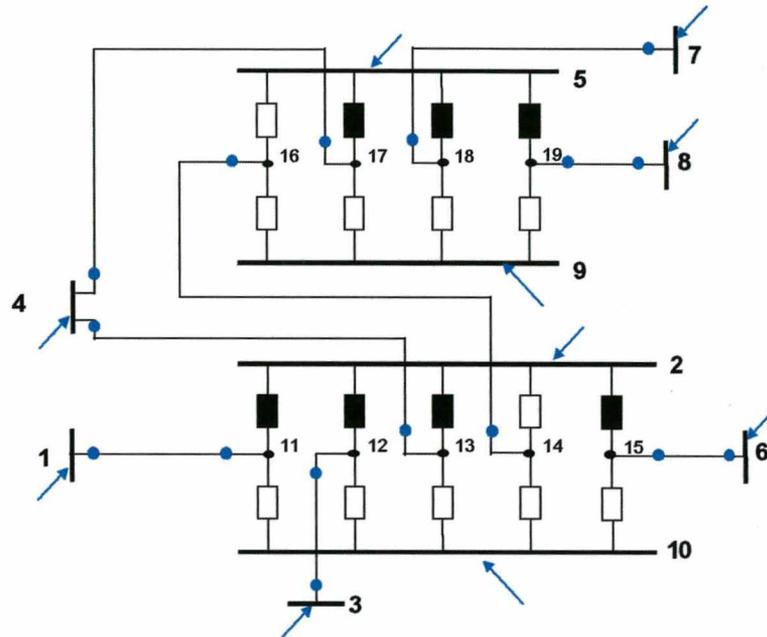


Figura 5.2: Sistema-teste IEEE de 30 Barras

Os ET simulados neste sistema foram:

Tabela 5.6 - Erros de Topologia Simulados no Sistema IEEE de 30 Barras

Caso	Erro Simulado
1	disjuntor 5-17 considerado aberto no modelo do sistema;
2	disjuntor 2-15 considerado aberto no modelo do sistema;
3	disjuntor 2-12 considerado aberto no modelo do sistema;
4	disjuntores 2-14 e 5-16 considerados fechados no modelo do sistema.

Os casos 1, 2 e 3 são considerados erros simples, pois é modificado o *status* de

apenas um disjuntor simples, enquanto que o caso 4 é considerado como erro de inclusão, pois o mesmo insere a linha 14-16 erroneamente no sistema.

O plano de medição adotado neste sistema compreende todas as injeções de potência nas barras (1 à 8) e de todos os fluxos de potência, em ambas as extremidades, dos ramos convencionais.

5.3.1 Erro Simples

Erros simples de topologia são os erros que apenas um disjuntor possui seu *status* erroneamente modelado [15]. Este erro foi simulado para três disjuntores distintos, em casos separados.

Conforme indicado em [15], o máximo valor dos MLN correspondente às restrições operacionais é relativo ao disjuntor errôneo. Esta propriedade é repassada aos resíduos normalizados conforme Apêndice B, fato confirmado na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 - Resultados de Erros Simples no Sistema IEEE de 30 Barras

Erro	λ_{oN}	r_{oN}	$P(H_0 z)$	$P(H_1 z)$
1 (5-17)	405.8902	405.8908	0.0	1.0
2 (2-15)	-149.1640	-149.1642	0.0	1.0
3 (2-12)	357.6130	357.6136	0.0	1.0

Nos três erros simulados os λ_{oN} e r_{oN} de todas as outras restrições operacionais possuem valores abaixo de 1.2, implicando na aplicação do teorema de Bayes a apenas duas hipóteses, ou seja, para a hipótese básica H_0 , apontada como falsa pelos resíduos normalizados, e para a hipótese alternativa H_1 . Em todos os casos simulados,

a hipótese alternativa (H_1 - disjuntor fechado) foi indicada como correta conforme verificado na Tabela 5.7.

5.3.2 Erro de Inclusão

Erros de inclusão acontecem quando uma linha de transmissão não está em operação no sistema e é incluída no modelo deste sistema [15]. A modelagem errônea dos disjuntores 2-14 e 5-16, ambos supostos fechados, provoca este tipo de erro, como pode ser visto na Figura 5.2, pois os mesmos incluem a linha 14-16 (Caso 4) na modelagem do sistema.

Através de um aplicativo de análise de criticidade de medidas e/ou restrições [43], foi verificada a formação de um conjunto crítico envolvendo as restrições operacionais referentes ao conjunto de disjuntores (2-13, 2-14, 5-16 e 5-17). Por este motivo, todos estes disjuntores são identificados como suspeitos, já que seus resíduos normalizados são todos iguais.

O resultado do processamento deste erro de inclusão está indicado na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 - Resultados do Erro de Inclusão em IEEE 30 Barras

Disj. suspeitos	$ \lambda_{oN} $	$ r_{oN} $	<i>Status</i> correto	<i>Status</i> simulado
2-13	437.685	437.685	F	F
2-14	437.685	437.685	A	F
5-16	437.685	437.685	A	F
5-17	437.685	437.685	F	F

Onde F equivale a *status* fechado e A *status* aberto.

Podemos observar na Tabela 5.8 a igualdade dos $|\lambda_{oN}|$ e os $|r_{oN}|$ das restrições operacionais que compõem o conjunto de restrições críticas.

O teorema de Bayes é aplicado sobre estes quatro disjuntores e suas probabilidades condicionais, diferentes de zero, das hipóteses são apresentados na Tabela 5.9:

Tabela 5.9 - Probabilidades *a Posteriori* do Erro de Inclusão em IEEE 30 Barras

Disjuntor	2-13	2-14	5-16	5-17	$P(Hi z)$
Hipótese 1	F	A	A	F	0.9992
Hipótese 2	F	A	F	F	0.0008
Hipótese 3	F	F	A	F	0.0000
Todas as outras hipóteses possuem $P(Hi z)$ iguais a zero.					

Como podemos observar, a hipótese que recebe maior respaldo das medidas, através de $P(Hi | z)$, é a Hipótese 1 que corresponde à hipótese correta.

5.4 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos através da metodologia proposta nesta dissertação para a identificação de ET utilizando testes de hipóteses e estatística Bayesiana. Os resultados obtidos foram também comparados aos obtidos com o método proposto em [16].

Todos os testes de ET simulados foram identificados com precisão, pois mesmo em conjuntos de restrições críticas (Caso 4) as probabilidades fornecidas pelos testes de hipóteses indicam a hipótese correta sobre a configuração dos disjuntores do sistema. Fica evidenciado portanto o bom desempenho do método.

Outro ponto a ser destacado foi a verificação do cumprimento das propriedades de medidas ou restrições críticas e conjuntos de medidas e/ou restrições críticas com respeito aos resíduos normalizados [32]. Assim foi constatado que o valor dos resíduos normalizados das restrições críticas são muito aproximadamente nulos e os resíduos normalizados dos elementos de conjuntos críticos são praticamente iguais entre si.

Capítulo 6

Conclusões Finais

6.1 Introdução

Este capítulo está subdividido em três seções. A seção 6.2 contém as conclusões sobre a identificação de ET através do método ortogonal baseado em rotações de Givens e a seção 6.3 apresenta as sugestões para trabalhos posteriores.

6.2 Conclusões

Esta dissertação propõe a identificação de ET através da utilização de um estimador de estados ortogonal e teste de hipóteses apoiado sobre o Teorema de Bayes.

Inicialmente foi apresentada a ferramenta de EESP. Sua modelagem através dos métodos dos mínimos quadrados ponderados e as principais formas de resolução também foram apresentadas. Em seguida, os conceitos de detecção e identificação de

ET baseados no método do *Tableau* Esperso foram abordados, incluindo a análise de criticidade de medidas e/ou restrições.

O estimador de estados ortogonal restrito foi modificado para introduzir a modelagem a nível de seção de barra, onde os fluxos de potência sobre disjuntores foram representados como novas variáveis de estado. As restrições de igualdade deste estimador representam as injeções de potência nulas, bem como, a definição de referências angulares.

Efetuada a estimação dos estados, os valores estimados das variáveis de estado são considerados corretos se os valores absolutos dos resíduos normalizados associados às medidas (r_{mN}) e às informações topológicas (r_{oN}) possuírem valores inferiores à 3.0, determinando o final do processo. Em caso contrário, os r_{oN} que ultrapassam este limite indicam os disjuntores suspeitos de estarem mal configurados na hipótese básica. Somente os elementos suspeitos modificam suas condições de operação, formando o conjunto de hipóteses alternativas. Esta restrição no número de elementos suspeitos diminui o número de hipóteses alternativas e conseqüentemente o esforço computacional. O teste de hipóteses e o teorema de Bayes foram utilizados para verificar qual das hipóteses recebe maior respaldo do conjunto de medidas do plano de medição, restrições estruturais e dados operacionais, o que é indicado pelo maior valor das probabilidades condicionais *a posteriori* das hipóteses. A hipótese que receber maior respaldo é considerada a hipótese válida e os valores das variáveis de estados são re-estimados.

Os resultados dos casos testados, em ambos os sistemas, confirmam que o maior valor das probabilidades *a posteriori* indicam a correta condição de operação dos disjuntores, e conseqüentemente a correta topologia da rede. Mesmo em conjunto críticos de informações operacionais, onde os ET não são identificáveis, o teste de hipóteses em conjunto com o teorema de Bayes encontraram a correta topologia da rede, evidenciando sua robustez.

Em resumo, a detecção e identificação de ET baseado em métodos ortogonais, teste de hipóteses e teorema de Bayes constitui uma ferramenta muito atraente para a operação mais segura dos sistemas elétricos de potência.

6.3 Sugestões para Trabalhos Futuros

No decorrer deste trabalho, algumas melhorias foram observadas e são sugeridas para futuras pesquisas.

1. Estender o trabalho proposto ao modelo AC.
2. Incluir a detecção e identificação de erros grosseiros de medidas, melhorando a confiabilidade da base de dados do sistema.
3. Explorar a obtenção da matriz de covariância dos resíduos $C_r(H_i)$ das hipóteses alternativas a partir da hipótese básica $C_r(H_0)$, minimizando o esforço computacional.

Apêndice A

Estimador de Estados Linearizado

O estimador de estados linearizado [5], semelhante ao Fluxo de Potência Linearizado [51], utiliza as aproximações apresentadas na Tabela AA.1, onde V e δ são respectivamente o módulo e ângulo das tensões complexas nas barras.

Tabela AA.1 - Aproximações do EESP Linearizado

- V de todas as barras do sistema possuem valor igual a 1 pu.;
 - Elementos *shunt* das linhas de transmissão são desprezados;
 - As resistências das linhas de transmissão são desprezadas;
 - $\cos(\delta_{ik}) \cong 1$ para $|\delta_{ik}|$ pequenos (rad.);
 - $\sin(\delta_{ik}) \cong \delta_{ik}$ em radianos, para $|\delta_{ik}|$ pequenos.
-
-

Neste método as grandezas físicas de potência reativa são desprezadas, ou seja, apenas grandezas físicas de potência ativa (injeções e fluxos) são utilizadas . As injeções (P) e fluxos de potência ativa são relacionadas às aberturas angulares nas linhas de transmissão conforme a Tabela AA.2 .

Tabela AA.2 - Relação entre Potência Ativa e Abertura Angular

Grandezas	Representação em relação aos ângulos
• Fluxo da barra i à j	$t_{ij} = \gamma_{ij} (\delta_i - \delta_j)$
• Injeção na barra i	$P_i = \sum_{j \in \Omega_i} t_{ij}$

Onde γ_{ij} é a admitância da linha ij e Ω corresponde ao conjunto de barras vizinhas à barra i . Estas grandezas formam a base de dados ($h_m(x)$) em tempo real.

O modelo de medição linearizado é dado por:

$$z = H_m x + \eta \quad (\text{A.1})$$

onde η é o erro de medição e H_m é representado na equação abaixo:

$$H_m = \frac{\partial h_m(x)}{\partial x} \quad (\text{A.2})$$

Como $h_m(x)$ possui apenas fatores de primeira ordem em relação à x , a matriz H_m é constante e formada pelas susceptâncias das linhas γ .

A formulação do estimador de estados linearizado é apresentada abaixo:

$$\text{Min } J(x) = [z - H_m x]^T R^{-1} [z - H_m x] \quad (\text{A.3})$$

Apêndice B

Igualdade entre Resíduos

Normalizados e Multiplicadores de

Lagrange Normalizados

Para calcular os resíduos normalizados r_N , inicialmente deve-se obter os resíduos r a partir da equação abaixo:

$$r = z - h(x) \quad (\text{B.1})$$

logo após, a matriz de covariância dos resíduos C_r deve ser obtida através da equação (B.3).

$$C_r = E\{r^T r\} \quad (\text{B.2})$$

$$C_r = R - H (H^T R^{-1} H)^{-1} H^T \quad (\text{B.3})$$

Calculadas estas variáveis, os resíduos normalizados r_N são encontrados conforme abaixo:

$$r_{N\ i} = \frac{r_i}{\sqrt{C_{r\ ii}}} \quad (\text{B.4})$$

Através do método do *Tableau* esparsa a equação (B.5) é obtida, possibilitando o cálculo dos multiplicadores de Lagrange a partir dos resíduos.

$$R^{-1} r = \lambda \quad (\text{B.5})$$

O cálculo da matriz de covariância dos multiplicadores de Lagrange (W) a partir de C_r , é dada por:

$$W = E\{\lambda^T \lambda\} \quad (\text{B.6})$$

$$W = R^{-T} E\{r^T r\} R^{-1} \quad (\text{B.7})$$

Como a matriz R é diagonal, então $R = R^T$. Aplicando (B.2) em (B.7), tem-se a expressão de W dependente de C_r .

$$W = R^{-1} C_r R^{-1} \quad (\text{B.8})$$

Os multiplicadores de Lagrange normalizados são calculados através de [15]:

$$\lambda_{N\ i} = \frac{\lambda_i}{\sqrt{W_{ii}}} \quad (\text{B.9})$$

Deve-se observar que nas equações (B.4) e (B.9) apenas os elementos diagonais das matrizes C_r e W são utilizados. Aproveitando-se de R ser diagonal, o cálculo de cada elemento diagonal W_{ii} a partir de $C_{r\ ii}$, pode ser obtido como:

$$W_{ii} = R_{ii}^{-1} C_{r\ ii} R_{ii}^{-1} \quad (\text{B.10})$$

A equação (B.10) é formada apenas por elementos escalares, permitindo sua alteração para:

$$W_{ii} = R_{ii}^{-2} C_{r ii} \quad (\text{B.11})$$

A representação de cada elemento da equação (B.5) torna-se necessária e encontra-se abaixo:

$$\lambda_i = R_{ii}^{-1} r_i \quad (\text{B.12})$$

Aplicando (B.11) e (B.12) em (B.9), tem-se:

$$\lambda_{N i} = \frac{R_{ii}^{-1} r_i}{\sqrt{R_{ii}^{-2} C_{r ii}}} \quad (\text{B.13})$$

Utilizando operações matemáticas em (B.13) a confirmação da igualdade entre os multiplicadores de Lagrange e os resíduos normalizados é alcançada em (B.16).

$$\lambda_{N i} = \frac{R_{ii}^{-1} r_i}{R_{ii}^{-1} \sqrt{C_{r ii}}} \quad (\text{B.14})$$

$$= \frac{r_i}{\sqrt{C_{r ii}}} \quad (\text{B.15})$$

$$\lambda_{N i} = r_{N i} \quad (\text{B.16})$$

Apêndice C

Método dos Pesos com Refinamento Iterativo (IRWM)

A idéia básica do IRWM consiste em minimizar a norma Euclidiana dos resíduos correspondentes às restrições de igualdade, obtidos através da variante convencional do método dos pesos [22].

Considere a seguinte formulação do problema:

$$\min \quad J(\Delta x^k) = [\Delta z - H(x^k) \Delta x^k]^T R^{-1} [\Delta z - H(x^k) \Delta x^k] \quad (\text{C.1})$$

$$s.a. \quad G(x^k) \Delta x^k = \Delta b$$

onde:

$$\Delta z = z - h(x^k) \quad (\text{C.2})$$

$$\Delta b = b - g(x^k) \quad (\text{C.3})$$

O algoritmo do IRWM é apresentado abaixo, onde a variável μ corresponde ao peso das restrições de igualdade [21].

1. Inicializar as variáveis de estado x^0 e indicar o valor de μ ;
2. Determinar a estrutura da matriz Jacobiana aumentada (M) dada por:

$$M = \begin{bmatrix} R^{-0.5} H \\ \mu G \end{bmatrix}; \quad (\text{C.4})$$

3. Determine a matriz de Informação $A = M^T M$;
4. Ordenar as colunas de A utilizando o algoritmo de mínimo grau [52] e determinar a matriz de permutação P_C ;
5. Ordenar as linhas de M utilizando o mínimo índice da coluna, determinando a matriz de permutação P_1 ;
6. Início do laço externo; inicialize seu contador ($\rho = 0$);
7. Se atender o critério de convergência*, pare. Caso contrário prossiga ao passo 8;
8. Calcule a matriz M através da equação (C.4);
9. Calcule:

$$\Delta w = \begin{bmatrix} R^{-0.5} \Delta z \\ \mu \Delta b \end{bmatrix}; \quad (\text{C.5})$$

10. Aplique rotações de Givens para resolver o problema abaixo:

$$Q P_1 [R^{-0,5} (M \mid \Delta w)] P_c = \begin{bmatrix} U \mid \Delta v \\ 0 \mid w \end{bmatrix}; \quad (\text{C.6})$$

11. Resolva o sistema linear $U \Delta x^\rho = \Delta v$;

12. Início do laço interno; inicialize seu contador ($k = 0$);

13. $\Delta x^k = \Delta x^\rho$;

14. Se atender o critério de convergência**, vá ao passo 19. Caso contrário prossiga ao próximo passo;

15. $r^k = \Delta b - G \Delta x^k$;

16. Aplique rotações de Givens para resolver o problema:

$$\min \left\| R^{-0,5} M \Delta(\Delta x^k) - \begin{pmatrix} 0 \\ \mu r^k \end{pmatrix} \right\|^2; \quad (\text{C.7})$$

17. $\Delta x^{k+1} = \Delta x^k + \Delta(\Delta x^k)$;

18. $k = k + 1$ e retorne ao passo 14;

19. $\rho = \rho + 1$;

20. Atualize as variáveis de estado, $x^\rho = x^{\rho-1} + \Delta x^k$ e retorne ao passo 7.

* Critério de convergência do laço externo:

$$\|\Delta x\|_{\infty} \leq \epsilon_e \quad (\text{C.8})$$

onde ϵ_e é a tolerância do laço externo.

** Critério de convergência do laço interno:

$$\|\Delta b - G\Delta x^k\| \leq \epsilon_i \|G\|_{\infty} \|\Delta x^k\| \quad (\text{C.9})$$

onde ϵ_i é a tolerância do laço interno.

Apêndice D

Dados dos Sistemas-Teste

D.1 Sistema 5 Barras e 6 Ramos

Neste sistema, as injeções de potência (pu.) nas barras são apresentadas na Tabela AD.1, enquanto que a Tabela AD.2 apresenta os dados das linhas de transmissão (LT).

Tabela AD.1 - Injeções de Potência do Sistema 5 Barras e 6 Ramos

Barra	1	2	3	4	5
Injeção de Potência	1.2	- 0.4	- 0.8	0.0	0.0

Onde as injeções negativas indicam cargas do sistema

Tabela AD.2 - LT do Sistema 5 Barras e 6 Ramos

De	Barra Para	Reatância da LT x (pu.)
1	4	0.218
1	5	0.202

D.2 Sistema IEEE de 30 Barras

Conforme realizado em [12], [15] e [16] as barras 12 e 15 são consideradas como suspeitas, estas barras possuem seus números modificado para 2 e 5 respectivamente, na Figura 5.2. As injeções de potência nas barras são apresentadas na Tabela AD.3.

Tabela AD.3 - Injeções do Sistema IEEE 30 Barras Modificado

Barra	Injeções de Potência (pu.)
1	0.275
2	- 0.120
3	0.170
4	- 0.060
5	- 0.080
6	- 0.070
7	- 0.060
8	- 0.055
9	0.000
10	0.000

Onde as injeções negativas indicam cargas do sistema

A Tabela AD.4 apresenta os dados das linhas de transmissão (LT).

Tabela AD.4 - Dados da LT do Sistema IEEE 30 Barras Modificado

Barra		Reatância da LT x (pu.)
De	Para	
1	11	0.256
3	12	0.140
4	13	0.256
4	17	0.200
6	15	0.200
7	18	0.218
8	19	0.202
14	16	0.202

Bibliografia

- [1] FILHO X. V., SALGADO E., PILOTTO L. A. S., et al.. “Blecaute de 11 de Março : Medidas de Curto Prazo para Aumento da Segurança do Sistema Elétrico e Principais Aspectos dos Relatórios Elaborados por Especialistas Internacionais”. *VII SEPOPE*, 2000.
- [2] SCHWEPPE F. C. “Power System Static State Estimation, Part i, ii, iii”. *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, 89(1):120–135, Jan. 1970.
- [3] SIMÕES COSTA A., QUINTANA V. H. “An Orthogonal Row Processing Algorithm for Power System Sequential State Estimation”. *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, (8):3791–3800, Aug. 1981.
- [4] GJELSVIK A., AAM A., HOLTEN L. “Augmented Matrix Method: A Rapid Method for Improving Numerical Stability in Power System State Estimation”. *IEEE Transaction on Power Application and System*, 104(6):2987–2993, Nov. 1985.
- [5] SIMÕES COSTA A. J. A., SALGADO R. S., MACHADO L. J. B. “Análise

de Segurança de Sistemas de Potência - Notas de Aula". Pós-Gaduação em Engenharia Elétrica - UFSC, 1999.

- [6] HOLTEN L., GJELSVIK A., AAM A., et al.. "Comparison of Different Methods for State Estimation". *IEEE Transaction on Power System*, 3(4):1798–1806, Nov. 1988.
- [7] VEMPATI N., SLUTSKER I. W., TINNEY W. F. "Enhancements to Givens Rotations for Power Systems State Estimation". *IEEE Trans. on Power Systems*, 6(2):842–849, May 1991.
- [8] LUGTU R. L., HACKETT D. F., LIU K. C., MIGHT D. D. "Power System State Estimation: Detection of Topological Errors". *IEEE Trans. on Power App. and Systems*, 99(6):2406–2412, Nov/Dec 1980.
- [9] CLEMENTS K. A., DAVIS P. W. "Detection and Identification of Topology Errors in Electric Power Systems". *IEEE Trans. on Power Systems*, 3(4):176–183, Nov 1988.
- [10] WU F. F., LIU W. E. "Detection of Topology Errors by State Estimation". *IEEE Trans. on Power Systems*, 4(1):176–183, Feb 1989.
- [11] SIMÕES COSTA A., LEÃO J. A. "Identification of Topology Errors in Power System State Estimation". *IEEE Trans. on Power Systems*, 8(4):1531–1538, Nov 1993.

- [12] ABUR A., KIM H., CELIK M. K. "Identifying the Unknown Circuit Breaker Statuses in Power Networks". *IEEE Trans. on Power Systems*, 10(4):2029–2037, Nov. 1995.
- [13] MONTICELLI A. "The Impact of Modeling Short Circuit Branches in State Estimation". *IEEE Trans. on Power Systems*, 8(1):364–370, Jan 1993.
- [14] MONTICELLI A. "Modeling Circuit Breakers in Weighted least squares State Estimation". *IEEE Trans. on Power Systems*, 8(3):1143–1149, Aug 1993.
- [15] CLEMENTS K. A., SIMÕES COSTA A. "Topology Error Identification using Normalized Lagrange Multipliers". *IEEE Trans. on Power Systems*, 13(2):347–353, May 1998.
- [16] LOURENÇO E. M. "Identificação de Erros de Topologia via Multiplicadores de Lagrange Normalizados e Testes de Hipóteses". *Relatório para Exame de Qualificação - Universidade Federal de Santa Catarina*, Dez. 1999.
- [17] IRVING M. R., STERLING M. J. H. "Substation Data Validation". *IEE Proceedings, Pt. C*, 129(3):119–122, May 1982.
- [18] SOUZA S. G. "Identificação de Erros de Topologia em Sistemas de Potência Utilizando Técnicas de Sistemas Especialistas". *Diss. Mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina - Florianópolis, SC, Brasil*, Aug. 1995.
- [19] MILI L., STEENO G., DOBRACA F., et al.. "Hypoteses Testing Identification

- : A New Method for Bad Data Analysis in Power System State Estimation". *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, 103(11):3239–3252, 1984.
- [20] JUNIOR S. I. S. "Introdução de Restrições de Igualdade a Estimação de Estados em Sistemas de Potência Utilizando Técnicas Ortogonais Sequenciais". *Diss. Mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina*, 1985.
- [21] GOUVÊA J. P. S. "Estimadores de Estados Ortogonais com Restrições de Igualdade e Desigualdade para a Modelagem Não-Reduzida da Rede Externa". *Tese de Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina*, 1998.
- [22] VAN LOAN C. F. "On the Method of Weighting for Equality Constrained Least-Squares Problems". *SIAM J. Numer. Anal.*, 22(5):851–864, Oct. 1985.
- [23] MONTICELLI A. "Testing Equality Constraint Hypothesis in Weighted Least Squares State Estimation". *Power Industry Computational Application Conference*, 1999.
- [24] AMARAL S. "Métodos para Processamento de Erros Grosseiros Múltiplos em Estimadores de Estado Sequenciais Ortogonais". *Dissertação de Mestrado - Florianópolis, Santa Catarina, Brasil*, 1987.
- [25] ALSAÇ O., VEMPATI N., STOTT B., et al. "Generalized State Estimation". *IEEE Trans. on Power Systems*, 13(3):1069–1075, Aug. 1998.
- [26] COLZANI L. "Determinação de Sub-redes Relevantes para a Identificação de

- Erros de Topologia em Sistemas de Potência”. *Diss. Mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina - Florianópolis, SC, Brasil*, Fev. 2001.
- [27] SCHWEPPE F. C., HANDSCHIN E. J. “Static State Estimation in Electric Power Systems”. *Proceedings of the IEEE*, 62(7):972–982, Jul. 1974.
- [28] SWERLING P. “Modern State Estimation Methods from the Viewpoint of the Method of Least Squares”. *IEEE Transaction on Automatic Control*, 16(6):707–719, Dec. 1971.
- [29] BOSE A., CLEMENTS K. A. “Real-Time Modeling of Power Networks”. *Proceedings of the IEEE*, 75(12):1607–1622, Dec. 1987.
- [30] CLEMENTS K. A., WOLLEMBERG B. F. “An Algorithm for Observability Determination in Power System State Estimation”. *IEEE PES Summer Meeting*, Jul. 1975.
- [31] QUINTANA V. H., SIMÕES COSTA A., MANDEL A. “Power System Topological Observability Using a Direct Graph-Theoretic Approach”. *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, 1982.
- [32] SIMÕES COSTA A., PIAZZA T. S., MANDEL A. “Qualitative Methods To Solve Qualitative Problems in Systems State Estimation”. *IEEE Trans. on Power Systems*, (3):941–949, Aug. 1990.
- [33] SIMÕES COSTA A., QUINTANA V. H. “A Robust Numerical Technique for

- Power System State Estimation". *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, (2):691–698, Feb. 1981.
- [34] ASCHMONEIT F. C., PETERSON N. M., ADRIAN A. C. "State Estimation with Equality Constraints". *Proc. PICA*, 1977.
- [35] ASCHMONEIT F. C., PETERSON N. M., ADRIAN E. C. "State Estimation With Equality Constraints". *Power Industry Computer Applications Conference*, 1977.
- [36] LOURENÇO E. M., SIMÕES COSTA A. J. A. "Identificação de Erros de Topologia via Multiplicadores de Lagrange Normalizados e Testes de Hipóteses". *Congresso Brasileiro de Automática*, 2000.
- [37] CLEMENTS K. A., SIMÕES COSTA A. J. A., AGUDELO A. M. "Identification of Undisclosed Bilateral Transaction through State Estimation and Hypothesis Testing". *Artigo submetido ao IEEE Trans. on Power Systems*, 1999.
- [38] WU F. F., LIU W. E., HOLTEN L., et al.. "Observability Analysis and Bad Data Processing for State Estimation Using Hachtel's Augmented Matrix Method". *IEEE Trans. on Power Systems*, 3(2):604–611, May 1988.
- [39] SIMÕES COSTA A. J. A. "*Power System State Estimation: Orthogonal Methods for Estimation and Techniques for Topological Observability*". Tese de Doutorado - Waterloo, Ontário, Canadá, 1981.

- [40] GENTLEMAN W. M. "Least Square Computations by Givens Transformations Without Square Roots". *Journal of Inst. Math Applics*, 12, 1974.
- [41] MONTICELLI A., GARCIA A. "Modeling Zero Impedance Branches in Power System State Estimation". *IEEE/PES Winter Meeting*, 8(1):364–370, Jan 1991.
- [42] PIAZZA T. S. "Aplicações de Métodos Combinatórios à Estimação de Estados em Sistemas de Potência: Determinação de Medidas e Conjuntos Críticos e Alocação de Pseudomedidas". *Diss. Mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina*, Jul. 1989.
- [43] SIMÕES COSTA A. J. A., LOURENÇO E. M., CLEMENTS K. A. "Power System Topological Observability Analysis Including Switching Branches". *Artigo submetido ao IEEE Trans. on Power Systems*.
- [44] PAPOULIS A. "*Probability, Random Variables and Stochastic Processes*". 3rd. Ed., McGraw Hill, 1991.
- [45] CLEMENTS K. A. "Static State Estimation with A Priori Information". *Internal Report - WPI*, 1998.
- [46] CLEMENTS K. A. "Bilateral Transaction Reconciliation". *Internal Report - WPI*, 1998.
- [47] SIMÕES COSTA A. J. A. "Identification of Undisclosed Bilateral Transaction through State Estimation and Hypothesis Testing". *Internal Report - WPI*, 1998.

- [48] LAWSON C. L., HANSON R. J. “*Solving Least Squares Problems*”. (reimp. from Prentice-Hall, New Jersey, 1974) SIAM, Philadelphia, 1995.
- [49] BJÖRCK A. “*Numerical Methods for Least Squares Problems*”. SIAM, Philadelphia, 1996.
- [50] HEATH M. T. “Some Extensions of an Algorithm for Sparse Linear Least Squares Problems”. *SIAM J. Sci. Stat. Comput.*, 3(2):223–237, Jun. 1982.
- [51] MONTICELLI A. “*Fluxos de Carga em Redes de Energia Elétrica*”. Edgard Blücher Ltda., São Paulo, Brasil, 1983.
- [52] TINNEY W. F., J. WALTER. “Direct Solution of Sparse Network Equations by Optimally Ordered Triangular Factorization”. *Proceedings of the IEEE*, 55, 1967.