

FLÁVIO FERREIRA VOSGERAU

**COESTIMAÇÃO DE ESTADOS E
TOPOLOGIA EM SISTEMAS DE
POTÊNCIA**

FLORIANÓPOLIS

2011

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**COESTIMAÇÃO DE ESTADOS E TOPOLOGIA EM
SISTEMAS DE POTÊNCIA**

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

FLÁVIO FERREIRA VOSGERAU

Florianópolis, Fevereiro de 2011

COESTIMAÇÃO DE ESTADOS E TOPOLOGIA EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

FLÁVIO FERREIRA VOSGERAU

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

Prof. Antonio J. A. Simões Costa, Ph.D
Orientador

Prof. Roberto de Souza Salgado, Ph.D.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

Prof. Antonio J. A. Simões Costa, Ph.D.
Presidente

Prof. João Bosco London Jr., Dr.

Prof. Roberto de Souza Salgado, Ph.D.

Prof. Elizete Maria Lourenço, Dr^a.

*Dedico este trabalho a meus pais
Roberto e Jurema.*

AGRADECIMENTOS

À minha querida esposa Glaucia, pelo companheirismo e apoio em todos os momentos.

Ao orientador Antonio J. A. Simões Costa, pela amizade e confiança em mim depositados.

À professora Elizete Maria Lourenço, pela amizade, incentivo e apoio com os sistemas-teste.

Aos colegas do LABSPOT, engenheiros André Albuquerque, Leonardo e Daniel, pelo apoio com a apresentação e figuras.

Aos professores e funcionários do PGEEL.

À Companhia Paranaense de Energia, por investir na capacitação de seus colaboradores e fornecer subsídios materiais para que este trabalho se tornasse realidade.

Aos colegas da COPEL, pelo incentivo constante.

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

COESTIMAÇÃO DE ESTADOS E TOPOLOGIA EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

Flávio Ferreira Vosgerau

Fevereiro / 2011

Orientador: Prof. Antonio J. A. Simões Costa, Ph.D.

Área de Concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Palavras-chave: Estimação de Estados em Sistemas de Potência, Estimação de Topologia em Sistemas de Potência, Coestimação de Estados e Topologia, Método Primal-Dual de Pontos Interiores, Modelagem em Tempo Real de Sistemas de Potência.

Número de Páginas: 70

Este trabalho propõe um método unificado para a estimação conjunta de *estados e topologia* em sistemas de potência. O método proposto estima as variáveis analógicas do sistema de potência e valida a topologia atual da rede em um único procedimento. Isto é possível mediante a formulação do problema de estimação de estados como um problema de otimização cuja função objetivo inclui tanto os resíduos das medidas analógicas quanto as restrições operacionais relacionadas aos status dos ramos chaveáveis. A contribuição dos resíduos para a função objetivo se dá sob a forma do tradicional critério dos mínimos quadrados ponderados (MQP), enquanto que as restrições operacionais associadas aos ramos chaveáveis compõem termos do tipo mínimos valores absolutos ponderados (MVAP). A dissertação apresenta a base teórica para a coestimação de estados e topologia, bem como a solução do problema de otimização correspondente através de uma aplicação especializada do método Primal-Dual de Pontos Interiores. Após ilustrar as etapas do método proposto com o auxílio de um sistema-exemplo de pequeno porte, seu desempenho é avaliado através da aplicação a dois sistemas-teste: a rede de 24 barras do IEEE anteriormente utilizada na literatura em estudos de estimação de estados generalizada, e uma rede real de uma concessionária brasileira. Os resultados obtidos indicam que a abordagem unificadora proposta é muito promissora para a modelagem em tempo real de sistemas elétricos de potência.

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

POWER SYSTEM STATE AND TOPOLOGY COESTIMATION

Flávio Ferreira Vosgerau

February / 2011

Advisor: Prof. Antonio J. A. Simões Costa, Ph.D.

Area of Concentration: Electric Energy Systems.

Keywords: Power System State Estimation, Power System Topology Estimation, State and Topology Coestimation, Primal-Dual Interior Point Method, Real-Time Power System Modeling.

Number of pages: 70

A joint power system state and topology estimator based on a combined Weighted Least Squares (WLS) and Weighted Least Absolute Value (WLAV) strategy is proposed. The resulting coestimation algorithm is devised to simultaneously provide estimates to the analog power system variables and validate the current topology of the electric network. This is accomplished by formulating the state & topology coestimation problem through an optimization framework whose objective function involves both the analog measurement residuals and the operational conditions dictated by circuit-breaker statuses. The former are treated as arguments of a conventional WLS function, whereas the latter compose the WLAV term. The paper presents a theoretical framework for state & topology coestimation and proposes a specialized primal/dual Interior Point approach to solve the corresponding optimization problem. Results obtained by applying the joint estimator to the IEEE 24-bus test system and to the network of a Brazilian utility are reported in the paper, and indicate that the proposed unifying approach is a very promising one to provide simultaneous solutions to both real-time modeling problems.

SUMÁRIO

Introdução	1
1.1 Introdução	1
1.2 Revisão bibliográfica	2
1.2.1 Detecção e identificação de erros de topologia	4
1.2.2 Estimção Conjunta de Estados e Topologia	6
1.3 Contribuição da dissertação	7
1.4 Organização da dissertação	8
Estimção de Estados em Sistemas de Potência	9
2.1 Introdução	9
2.2 Modelo de medição	9
2.2.1 Resíduos de estimção	10
2.3 Estimção de estados pelo método dos MQP	10
2.3.1 Função objetivo	10
2.3.2 Método da equação normal	11
2.3.3 Método da matriz aumentada	12
2.3.3.1 Inclusão de informações <i>a priori</i>	13
2.3.4 Métodos ortogonais	14
2.4 Estimção de estados pelo método dos MVAP	14
2.4.1 O método dos MVAP e os pontos de alavancamento	16
2.5 Estimção de estados generalizada	18
2.5.1 Restrições estruturais	18
2.5.2 Restrições operacionais	19
2.5.3 Formulação do problema de EEG	20
2.6 Conclusões	21
Coestimção de Estados e Topologia	23
3.1 Introdução	23
3.2 Formulação do Problema	23
3.3 Solução pelo método primal-dual de pontos interiores	26
3.3.1 Atualização das variáveis	28
3.3.2 Atualização do parâmetro μ	29
3.3.3 Teste de convergência	29
3.4 Estimção da topologia	30
3.5 Aspectos computacionais	33
3.6 Aplicação ilustrativa da CET	34

3.7	Conclusões	42
	Resultados de Simulações	43
4.1	Introdução	43
4.2	Sistema IEEE de 24 barras	43
4.2.1	Resultados - Caso A	46
4.2.2	Resultados - Caso B	48
4.2.3	Resultados numéricos	49
4.3	Sistema COPEL	50
4.4	Desempenho do Método de Coestimação	55
4.4.1	Comparação dos resultados	55
4.4.2	Desempenho computacional	55
4.5	Conclusões	56
	Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	57
5.1	Conclusões	57
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	58
	Apêndice A – Dados do sistema COPEL de 55 barras	61
	Referências Bibliográficas	64

LISTA DE FIGURAS

2.1	Comparação das características dos métodos MQP e MVAP .	17
2.2	Ponto de alavancamento	17
3.1	Sistema-teste com 4 ramos chaveáveis	35
4.1	Sistema IEEE 24 barras, com plano de medição	44
4.2	Região suspeita da rede para o Caso A	45
4.3	Região suspeita da rede para o Caso B	46
4.4	Sistema COPEL de 55 barras	51
4.5	Subestação UMB 230 kV modelada no nível de seção de barra	53

LISTA DE TABELAS

3.1	Parâmetros do sistema com 4 ramos chaveáveis e valores medidos	35
3.2	Resultado final da CET para o sistema com 4 ramos chaveáveis	41
3.3	Convergência do processo iterativo para tolerância $\delta = 1.10^{-6}$	42
4.1	Resultados da aplicação do método de CET ao sistema IEEB de 24 barras - sem erros de topologia	45
4.2	Erros de topologia - Casos A e B	47
4.3	Resultados - Caso A1	47
4.4	Resultados - Caso A2	48
4.5	Resultados Caso A3 - Condição inicial <i>flat start</i>	48
4.6	Resultados - Casos B1 e B2	49
4.7	Resultados Caso B3 - Condição inicial <i>flat start</i> “todos abertos”	49
4.8	Componentes da função objetivo com e sem erros de topologia	50
4.9	Resultados da aplicação do método de CET ao sistema COPEL - sem erros de topologia	52
4.10	Sistema COPEL - Resultado da CET para erro no disjuntor interligador de barra	54
4.11	Sistema COPEL - Resultado da CET para a condição inicial <i>flat start</i> “todos abertos”	54
4.12	Sistema COPEL - Componentes da função objetivo com e sem erros de topologia	55
A.1	Dados de linha do sistema COPEL	61

LISTA DE SIGLAS

CET	Coestimação de Estados e Topologia.
COPEL	Companhia Paranaense de Energia.
DC	Direct current.
EEG	Estimação de Estados Generalizada.
EESP	Estimação de Estados em Sistemas de Potência.
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers.
MPDPI	Método Primal-Dual de Pontos Interiores.
MQP	Mínimos Quadrados Ponderados.
MVAP	Mínimos Valores Absolutos Ponderados.
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition.
SEP	Sistemas Elétricos de Potência.
UMF	Unidade de Medição Fasorial.
WLAV	Weighted Least Absolute Value.
WLS	Weighted Least Squares.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Introdução

Muitos são os desafios para a monitoração em tempo real de Sistemas Elétricos de Potência (SEP), particularmente em ambientes caracterizados pelo grande número de empresas participantes, em que muitas vezes não se tem acesso direto a todos os pontos de telemidas e parâmetros da rede. Além disto, outros fatores como o atraso de tempo que ocorre na varredura das medidas pelo sistema SCADA, erros de precisão dos medidores, erros de configuração de medidores (como fator de escala, por exemplo), erros na transmissão dos dados, entre outros, influem na confiabilidade das informações que chegam ao operador. Neste contexto a Estimação de Estados em Sistemas de Potência (EESP) assume papel relevante, por fornecer os estados do sistema - magnitudes e ângulos das tensões complexas nas barras - a partir das informações disponíveis, com alto grau de confiabilidade.

Uma vez obtidos os estados pela EESP é possível a determinação coerente de todas as outras variáveis de interesse, como fluxos nas linhas de transmissão, injeções de potência nas barras, etc, que podem ser aplicados para a determinação do estado operativo do sistema (normal, emergência ou restaurativo), para a análise de contingências e também para subsidiar estudos de previsão de carga e fluxo de potência ótimo, entre outros. A importância da estimação de estados reside portanto na geração de bases de dados confiáveis para a execução de uma série de aplicações cada vez mais importantes para a operação e planejamento dos SEP modernos.

As implementações convencionais para a modelagem em tempo real de sistemas de potência seguem um procedimento que consiste de seis etapas (BOSE; CLEMENTS, 1987), (MONTICELLI, 2000): 1) aquisição dos dados, 2) processamento da topologia da rede, 3) análise de observabilidade, 4) estimação de estados, 5) processamento de erros grosseiros e 6) identificação do modelo da rede.

Para o adequado funcionamento da etapa de estimação de estados, é necessário que as funções abaixo sejam executadas com sucesso:

- Pré-processamento
 - Pré-filtragem: rejeita ou corrige preliminarmente as telemidas flagrantemente inconsistentes;
 - Configurador de redes: determina o modelo barra-ramo da rede com base no status presumido dos ramos chaveáveis. Nesta etapa

são realizadas verificações de consistência simples.

- **Análise de observabilidade:** determina se o sistema é observável e, se necessário, adiciona pseudomedidas ou divide o sistema original em subsistemas observáveis.

Após a obtenção de um modelo barra-ramo observável da rede, é realizada a estimação de estados propriamente dita e as etapas de detecção e identificação de erros grosseiros. Se houver erros, este processo corrige e/ou elimina as telemidas consideradas errôneas, produzindo como resultado uma fotografia da condição de operação do sistema elétrico para determinado momento.

Conforme descrito na Seção 1.2 a seguir, as etapas de detecção e identificação de erros grosseiros em medidas analógicas, desde que prevaleçam condições adequadas de redundância de medidas, podem ser atualmente executadas com eficiência e eficácia, salvo raras exceções. Se houver porém erros de topologia não identificados pelo configurador de redes, a análise de observabilidade e a estimação de estados ficam comprometidas. Normalmente esta situação leva à identificação errônea de erros grosseiros múltiplos pelo estimador de estados, que tende a eliminar como espúrias medidas corretas na vizinhança da região aonde ocorreu o erro de topologia (ALSAC et al., 1998). Neste caso o procedimento mais adequado é a execução da Estimação de Estados Generalizada, em que a parte da rede suspeita de conter erros de topologia é representada no nível de seção de barra e novos estados, bem como pseudomedidas, são inseridos no problema. A referência (ALSAC et al., 1998) também aborda o problema de identificação de erros em parâmetros.

Ao contrário do caso envolvendo medidas analógicas, a detecção e identificação de erros de topologia na Estimação de Estados Generalizada constitui-se um tópico de pesquisa ainda em desenvolvimento. A proposta desta dissertação é a apresentação de uma abordagem unificadora para a formulação e resolução do problema conjunto de estimação de estados e dos “status” de chaves e disjuntores, através do qual a topologia da rede é estimada diretamente.

1.2 Revisão bibliográfica

A Estimação de Estados em Sistemas de Potência surgiu como uma necessidade no final da década de 60 pela conjunção de fatores como a crescente complexidade na operação de sistemas de potência e a evolução dos computadores digitais e telecomunicações, que permitiram o surgimento de

funções ligadas à monitoração e análise de segurança pelos centros de controle. Segundo o artigo (SCHWEPPE; HANDSCHIN, 1974), a EESP é a única maneira de se obter um conjunto de dados altamente confiável (modelo em tempo-real do sistema elétrico) a partir das informações disponíveis sobre a rede (telemedidas e banco de dados *offline*). Daquela época até os dias atuais esta afirmação tornou-se cada vez mais verdadeira, por um lado com o aumento da dimensão dos sistemas elétricos de potência e do número de agentes envolvidos - principalmente nos Estados Unidos e Europa - em que há uma limitação de acesso aos dados de medição de terceiros, e por outro lado com o grande aumento na capacidade de processamento dos microcomputadores, melhoria das técnicas existentes e desenvolvimento de novas abordagens para a modelagem e resolução do problema de EESP.

Desde as proposições iniciais (SCHWEPPE; WILDES, 1970) a formulação dominante para o problema de estimação de estados está relacionada com a minimização da soma ponderada dos quadrados dos resíduos de estimação. Neste contexto, são vários os métodos de resolução e técnicas de pós processamento que produzem uma solução confiável, livre da presença de erros grosseiros em medidas. Uma abrangente bibliografia sobre estimação de estados até o ano de 1989 é apresentada em (COUTTO FILHO; SILVA; FALCÃO, 1990). Uma discussão sobre o estado da arte do tema, até o ano 2000, é apresentada em (MONTICELLI, 2000).

Além da formulação pelo critério dos mínimos quadrados ponderados (MQP), outras alternativas foram propostas, como a utilização de estimadores não-quadráticos, que visam reduzir o peso relativo das medidas com resíduos muito elevados (HANDSCHIN et al., 1975), (PIRES; SIMÕES COSTA; MILI, 1999), proporcionando ao estimador uma capacidade maior de rejeição de medidas com erros grosseiros. Porém, dentre as formulações alternativas, a baseada nos mínimos valores absolutos ponderados (MVAP) recebeu especial atenção (IRVING; OWEN; STERLING, 1978), (KOTIUGA; VIDYASAGAR, 1982), (FALCÃO; ASSIS, 1988), (SINGH; ALVARADO, 1995), (ABUR; KIM; CELIK, 1995), (BAGCHI et al., 1994), (SINGH; ALVARADO, 1994). A utilização do critério MVAP apresenta como principais atrativos: 1) possibilidade de resolução do problema com a utilização de técnicas de programação linear e mais recentemente métodos numéricos de otimização como os baseados em pontos interiores, e 2) propriedade de interpolação altamente seletiva, que teoricamente rejeitaria automaticamente as medidas espúrias, dispensando as etapas de pós-processamento para detecção e identificação de erros grosseiros. Entretanto, posteriormente verificou-se que os estimadores MVAP são suscetíveis aos chamados pontos de alavancamento (*leverage points*), o que compromete a

sua confiabilidade pois, caso haja erro grosseiro em um destes pontos, este será não-detectável (MILI, 1988). Em (CELIK; ABUR, 1992), foi constatado que na presença de erros grosseiros simultâneos em múltiplos pontos de alavancamento, até mesmo estimadores baseados no critério MQP podem falhar. De acordo com (MILI; PHANIRAJ; ROUSSEEUW, 1991) os pontos de alavancamento estão relacionados com medidas em ramos de baixa impedância e também em situações tais como: a) medidas de fluxo de potência em ramos de baixa impedância, b) medidas de injeção de potência em nós adjacentes a ramos de baixa impedância, e c) medidas de injeção de potência em nós com um grande número de ramos incidentes.

Com relação a novos desenvolvimentos tecnológicos, a utilização de unidades de medição fasorial (UMFs^{1.1}) aparece como uma possibilidade para a medição direta dos estados do SEP. A referência (ZIVANOVIC; CAIRNS, 1996) fornece uma das primeiras contribuições nesta área.

1.2.1 Detecção e identificação de erros de topologia

A abordagem do problema referente a erros de topologia foi tratada inicialmente no artigo (LUGTU et al., 1980), na qual é proposto um método estatístico baseado em testes de hipóteses para a identificação de erros no modelo barra-ramo da rede. Uma proposta considerando a modelagem no nível de seção de barra é apresentada em (IRVING; STERLING, 1982).

Nos artigos (CLEMENTS; DAVIS, 1988) e (WU; LIU, 1989) são apresentadas propostas relativas à determinação de condições de detectabilidade e identificabilidade de erros de topologia. Clements e Davis (1988) concluíram que a detecção de erros de topologia em ramos críticos não é possível através da análise dos resíduos de medição. Já no artigo (SIMÕES COSTA; LEÃO, 1993) é proposto um índice de correlação para a identificação de erros de topologia.

Os trabalhos (ABUR; KIM; CELIK, 1995) e (SINGH; ALVARADO, 1995) propõem a utilização da formulação MVA para a resolução da estimação de estados e eliminação direta dos erros de topologia, porém a confiabilidade do método para estes casos ficaria prejudicada na presença de pontos de alavancamento, conforme descrito anteriormente.

Abriu-se uma nova perspectiva para a abordagem do problema com a publicação dos artigos (MONTICELLI; GARCIA, 1991; MONTICELLI, 1993b), nos quais é proposta a inclusão dos fluxos de potência nos ramos chaveáveis como variáveis de estado. Esta modelagem implica na utilização direta do modelo de seção de barra no problema de estimação. Uma consequência natural da

^{1.1}Na sigla em inglês PMU - phasor measurement unit.

representação do sistema elétrico no nível de seção de barra foi a proposição da Estimção de Estados Generalizada (EEG) apresentada em (ALSAC et al., 1998). A EEG é uma extensão da estimção de estados tradicional através da inclusão de novas variáveis de estado e pseudomedidas associadas aos ramos chaveáveis. Para a manutenção da dimensão do problema dentro de limites aceitáveis, foram introduzidos os conceitos de *pocketing* e *zooming*, isto é, apenas a parte da rede suspeita de conter erros de topologia é modelada no nível de seção de barra, evitando-se assim o aumento excessivo da dimensão do problema. Neste trabalho, o conceito de *pocketing* é referido como “determinação de uma zona de anomalia” e o conceito de *zooming* como “detalhamento da zona de anomalia no nível de seção de barra”. Deve-se ressaltar que a identificação da zona de anomalia - ou seja, selecionar a parte da rede suspeita de conter erros de topologia - não é um problema trivial. Uma técnica para a determinação de uma zona de anomalia é apresentada em (SIMÕES COSTA; LOURENÇO; COLZANI, 2007).

Em (CLEMENTS; SIMÕES COSTA, 1998) é apresentada uma extensão da metodologia tradicional de detecção de erros em medidas - através da análise dos multiplicadores de Lagrange associados aos resíduos de medição - para o contexto da EEG, na qual os multiplicadores de Lagrange normalizados associados às restrições operacionais são utilizados para a detecção e identificação de erros de topologia. Uma análise da observabilidade topológica em sistemas representados no nível de seção de barra é apresentada no artigo (SIMÕES COSTA; LOURENÇO; CLEMENTS, 2002) e alguns desenvolvimentos da técnica de detecção e identificação de erros de topologia através dos multiplicadores de Lagrange normalizados são apresentados nos artigos (LOURENÇO; SIMÕES COSTA; CLEMENTS, 2004; LOURENÇO et al., 2006).

Uma outra abordagem do tema é apresentada no artigo (CARO; CONEJO; ABUR, 2010), o qual propõe a análise da topologia de todo o sistema como uma etapa de pré-processamento. Neste caso é utilizado o modelo (DC) da rede e uma técnica de programação inteira-mista. Outra proposta para detecção de erros de topologia, porém sem modelar a rede no nível de seção de barra, é apresentada em (HASSAINE et al., 2005); neste caso, é necessário um banco de dados *offline* das configurações topológicas possíveis já assumidas por cada subestação.

O conceito de estimção topológica é proposto inicialmente em (VEMPATI et al., 2005). Utilizando EEG e as funções de determinação de uma zona de anomalia e modelagem desta no nível de seção de barra, os autores propõem um estimador de topologia cuja solução está baseada na união de um estimador MQP com técnicas combinatórias para a determinação dos status

do ramos chaveáveis. É utilizado um modelo DC da rede e a saída do estimador proposto seria utilizada tanto para aplicações de mercado de energia e segurança bem como seria uma entrada de dados de topologia confiável para o estimador de estados convencional. Observa-se que na metodologia proposta os status dos ramos chaveáveis não são estimados diretamente, no sentido proposto nesta dissertação e descrito na Seção 1.3.

1.2.2 *Estimação Conjunta de Estados e Topologia*

A EESP é uma área do conhecimento que tem sido objeto de muito interesse nas últimas décadas, fato refletido pelo grande número de publicações dedicadas a este tema e apresentadas na subseção anterior. Naquela subseção, procurou-se destacar as principais contribuições nos tópicos mais relevantes sob o ponto de vista da fundamentação teórica para o presente trabalho, a saber:

- Formulação do problema
- Métodos de solução da estimação de estados convencional;
- Estimação de estados generalizada;
- Processamento de erros de topologia.

Verifica-se que há algumas variações na maneira de tratar a questão da detecção e identificação de erros de topologia. Podem ser identificadas duas abordagens principais para o problema (ABUR; GÓMEZ EXPÓSITO, 2004):

1. Pré-processamento: esta abordagem busca eliminar erros de topologia acrescentando-se métodos de estimação de estados ao tradicional configurador de rede, isto é, em uma etapa anterior à estimação de estados convencional. Os artigos (VEMPATI et al., 2005), (CARO; CONEJO; ABUR, 2010) e (MILI et al., 1999) utilizam esta concepção.
2. Pós-processamento: neste caso os erros de topologia são identificados após a execução da estimação de estados tradicional. Aqui ainda há dois tratamentos claramente distintos:
 - (a) sem utilizar a modelagem no nível de subestação. Esta abordagem é utilizada em (LUGTU et al., 1980), (SIMÕES COSTA; LEÃO, 1993) e (SINGH; ALVARADO, 1995), entre outros, a maioria anterior à proposição da EEG.

- (b) utilizando a EEG e as técnicas de determinação de uma zona de anomalia e detalhamento da região no nível de seção de barra (ALSAC et al., 1998), (CLEMENTS; SIMÕES COSTA, 1998), (LOURENÇO; SIMÕES COSTA; CLEMENTS, 2004), (LOURENÇO et al., 2006). Neste caso os status dos ramos chaveáveis são determinados após a execução da estimação de estados generalizada, o que varia são as técnicas utilizadas para a detecção e identificação dos erros de topologia.

A abordagem utilizada neste trabalho pode ser caracterizada como de pós-processamento, no sentido de que é executada após a EESP convencional e determinação de uma zona de anomalia e modelagem da região suspeita no nível de seção de barra. O diferencial do método proposto é a maneira como são determinados os status dos ramos chaveáveis, uma vez que estes são estimados simultaneamente com os estados tradicionais. Não há portanto etapas de detecção e identificação de erros de topologia realizadas na forma convencional, já que a topologia é estimada diretamente.

1.3 Contribuição da dissertação

O presente trabalho insere-se no contexto da Estimação de Estados Generalizada e tem por objetivo a apresentação de uma abordagem unificadora para a determinação conjunta de estados e topologia em sistemas de potência, ou seja, uma Coestimação de Estados e Topologia (CET).

A CET caracteriza-se pela estimação simultânea dos estados do SEP e dos status dos ramos chaveáveis. O método consiste na proposição de uma função multi-objetivo em que o termo correspondente aos resíduos das medidas analógicas é formulado pelo tradicional critério dos mínimos quadrados ponderados (MQP) e o termo correspondente às restrições operacionais é modelado pelo critério dos mínimos valores absolutos ponderados (MVAP). Aproveita-se assim a propriedade de rejeição de erros dos estimadores MVAP para a detecção e identificação de erros de topologia. Este conceito foi inicialmente proposto em (CLEMENTS, 2006), mas a idéia inicial não havia ainda sido desenvolvida até início da pesquisa que gerou esta dissertação. A principal vantagem da Coestimação de Estados e Topologia é que a topologia é estimada diretamente através do problema de otimização, obtendo-se a configuração melhor respaldada pelas medidas adquiridas em tempo real.

Para a formulação do problema de Coestimação, parte-se do princípio que os estágios correspondentes a execução da estimação de estados conven-

cional, identificação de uma zona de anomalia e modelagem da parte suspeita da rede no nível de seção de barra já foram executadas. O método de Coestimação de Estados e Topologia proposto irá então estimar os estados e os status de chaves e dispositivos, fornecendo uma promissora alternativa para a validação do modelo em tempo real do SEP. A metodologia proposta e alguns resultados preliminares obtidos com o método de Coestimação de Estados e Topologia em Sistemas de Potência foram apresentados em (VOSGERAU et al., 2010b) e também em (VOSGERAU et al., 2010a).

1.4 Organização da dissertação

A dissertação está estruturada em cinco capítulos. Complementando a introdução realizada no Capítulo 1, no Capítulo 2 é feita uma revisão da EESP e seus principais aspectos como o modelo de medição, as principais formulações para o problema, os métodos de solução e a Estimação de Estados Generalizada.

No Capítulo 3 é apresentada a formulação do problema de Coestimação de Estados e Topologia em Sistemas de Potência proposto, bem como sua resolução por um Método Primal-Dual de Pontos Interiores especializado para este problema. Além disso, as etapas de aplicação da metodologia proposta são ilustradas com o auxílio de um sistema teste de pequeno porte.

No Capítulo 4 são apresentados e comentados os resultados de simulações conduzidas com o sistema-teste de 24 barras do IEEE, bem como com parte da rede da Companhia Paranaense de Energia - COPEL, abrangendo a região metropolitana de Curitiba.

Finalmente, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 ESTIMAÇÃO DE ESTADOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

2.1 Introdução

Este capítulo tem por objetivo a descrição do problema de estimação de estados em sistemas de potência. É apresentado o modelo de medição na Seção 2.2 e também alguns dos principais métodos para a resolução do problema, como o método dos MQP e algumas das suas principais formulações que são apresentadas na Seção 2.3. O método dos MVAP é descrito na Seção 2.4. O problema da estimação de estados generalizada (EEG), em que partes da rede elétrica são modeladas no nível de seção de barra, é apresentado na Seção 2.5.

Os tópicos apresentados neste capítulo fornecem o embasamento teórico para o desenvolvimento do método de Coestimação de Estados e Topologia (CET), apresentado no Capítulo 3.

2.2 Modelo de medição

Considerando-se um sistema de potência qualquer que tenha m medidas e N barras, o modelo de medição não-linear é dado por:

$$z = h(x) + e \quad (2.1)$$

onde z é o vetor ($m \times 1$) das quantidades medidas, x é um vetor de dimensão ($n \times 1$), sendo $n = 2N - 1$, que contém os estados verdadeiros, $h(\cdot)$ é um vetor ($m \times 1$) formado por funções não-linear que relacionam os estados aos valores medidos e e é o vetor ($m \times 1$) que modela os erros aleatórios de medição. Os estados x são dados pelas tensões e ângulos nas barras, excetuando-se o ângulo da barra de referência que é conhecido.

Os erros de medição são aleatórios e supõe-se que apresentam distribuição normal com média zero e matriz de covariância R . Supõe-se também que os erros de medição são independentes entre si, e portanto a matriz R é diagonal, ou seja, $R_{ij} = 0$, $i \neq j$, e $R_{ii} = \sigma_i^2$, onde σ_i^2 é a variância da i -ésima medida.

O vetor z normalmente é composto pela telemedição dos fluxos ativo e reativo nos ramos da rede elétrica, injeções de potência ativa e reativa nas barras e magnitudes das tensões, além de eventuais pseudomedidas provenientes de outras fontes, como resultados de estimações anteriores ou estudos de previsão de carga.

2.2.1 Resíduos de estimação

Define-se o resíduo de estimação r_i como:

$$r_i = z_i - h_i(\hat{x}) \quad (2.2)$$

onde r é um vetor de dimensão $(m \times 1)$.

Os métodos de solução da estimação de estados buscam basicamente minimizar a soma dos resíduos de estimação ponderados pelo inverso das variâncias, sendo este método dos mínimos quadrados ponderados (MQP) o mais amplamente utilizado.

2.3 Estimação de estados pelo método dos MQP

O método dos Mínimos Quadrados Ponderados ou WLS^{2.1} foi primeiramente aplicado à estimação de estados em sistemas de potência em (SCHWEPPE; WILDES, 1970) e pode ser formulado matematicamente como um problema de otimização com uma função custo quadrática. Restrições de igualdade e desigualdade também podem ser utilizadas para a inclusão de informações adicionais ao problema, como a informação relativa às barras que possuem injeção de potência nula.

2.3.1 Função objetivo

A função objetivo do problema de estimação de estados pelo método dos MQP pode ser descrita por:

$$J(\hat{x}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \frac{r_i^2}{R_{ii}} \quad (2.3)$$

sendo r definido na equação (2.2). Na forma matricial temos:

$$J(\hat{x}) = \frac{1}{2} r^T R^{-1} r \quad (2.4)$$

A ponderação pelo inverso das variâncias implica que as medições com menor variância, ou seja, com maior grau de confiabilidade, terão mais influência no valor da função custo J .

^{2.1}Do inglês *Weighted Least Squares*

2.3.2 Método da equação normal

A maioria das implementações práticas de estimadores de estado na atualidade utiliza o método de Gauss-Newton (MONTICELLI, 2000).

Considerando o problema de otimização não-restrito da função custo (2.4), temos:

$$\min_{\hat{x}} J(\hat{x}) = \frac{1}{2} r^T R^{-1} r \quad (2.5)$$

cuja condição de otimalidade é dada por

$$\left. \frac{\partial J}{\partial x} \right|_{(\hat{x})} = - \sum_{i=1}^m \frac{r_i}{R_{ii}} \frac{\partial h_i}{\partial x} = 0 \quad (2.6)$$

ou na forma matricial

$$-H^T R^{-1} r = 0 \quad (2.7)$$

sendo a matriz Jacobiana H de dimensão $(m \times n)$, onde n é o número de estados, dada por $H = \frac{\partial h(\hat{x})}{\partial x}$.

A solução da equação (2.7) pode ser obtida por processo iterativo, cujo passo Δx é obtido através de linearização por expansão em série de Taylor:

$$\frac{\partial J(\hat{x}^k + \Delta x)}{\partial \Delta x} \approx \left. \frac{\partial J}{\partial x} \right|_{(\hat{x}^k)} + \left. \frac{\partial^2 J}{\partial x^2} \right|_{(\hat{x}^k)} \Delta x = 0 \quad (2.8)$$

onde a matriz Hessiana $\nabla^2 J$ é dada por:

$$\nabla^2 J = \sum_{i=1}^m R_{ii}^{-1} \frac{\partial h_i}{\partial x} \left(\frac{\partial h_i}{\partial x} \right)^T - \sum_{i=1}^m \frac{r_i}{R_{ii}} \frac{\partial^2 h_i}{\partial x^2} \quad (2.9)$$

Considerando-se que nas proximidades da solução as variações na matriz $H(\hat{x}^k)$ são desprezíveis, o segundo termo de (2.9) é desconsiderado (ADBY; DEMPSTER, 1974) e a matriz resultante é denominada matriz ganho G . Na forma matricial:

$$G = H^T R^{-1} H \quad (2.10)$$

Substituindo-se as equações (2.10) e (2.6) em (2.8) obtém-se o sistema linear:

$$G(\hat{x}^k) \Delta x = H^T(\hat{x}^k) R^{-1} r \quad (2.11)$$

e a atualização do vetor de estados em cada etapa do processo iterativo é dada por

$$\hat{x}^{k+1} = \hat{x}^k + \Delta x \quad (2.12)$$

até que uma tolerância pré-definida para a variação do passo Δx seja alcançada. Esta variante para a solução do problema de EESP pelo abordagem de Gauss-Newton é chamada de método da Equação Normal.

Uma deficiência do método da Equação Normal está na susceptibilidade a mau condicionamento numérico quando da resolução do sistema linear dado pela equação (2.11). Este problema está relacionado com a forma quadrática da matriz ganho ($H^T H$). Com efeito, pode-se provar que para a Equação Normal de Gauss o condicionamento numérico da matriz ganho obedece a seguinte relação (SIMÕES COSTA; QUINTANA, 1981b)

$$\text{Cond}(H^T H) = (\text{Cond}(H))^2 \quad (2.13)$$

ou seja, se H não for muito bem condicionada, G será mal condicionada.

O número de condicionamento $\text{Cond}(\cdot)$ é definido pela razão entre o maior e o menor valor singular de uma matriz. Valores muito altos do número de condicionamento indicam que a solução de um sistema linear como (2.11) é muito susceptível a erros de aproximação e arredondamento, como os resultantes do armazenamento de G em computador digital (NOCEDAL; WRIGHT, 1999).

2.3.3 Método da matriz aumentada

Também conhecido por Método do Tableau Esperso ou Método de Hachtel, sua aplicação na estimação de estados em sistemas de potência foi proposta inicialmente por (GJELSVIK; AAM; HOLTEN, 1985). Este método tem como vantagens a formulação e implementação relativamente simples, além de uma robustez numérica superior àquela obtida através do método da equação normal.

A equação básica do método da matriz aumentada pode ser obtida através da resolução do problema de otimização com restrições apresentado a seguir.

$$\begin{aligned} \min \quad & J(r) = \frac{1}{2}r^T R^{-1}r \\ \text{sujeito a} \quad & r = z - h(\hat{x}) \end{aligned} \quad (2.14)$$

A função Lagrangeana deste problema é expressa por:

$$\mathcal{L}(r, \hat{x}, \lambda) = \frac{1}{2}r^T R^{-1}r + \lambda^T (z - h(\hat{x}) - r) \quad (2.15)$$

onde λ é um vetor de dimensão ($m \times 1$) dos multiplicadores de Lagrange associados aos resíduos de estimação. Aplicando-se as condições de otimalidade de primeira ordem é obtido o seguinte conjunto de equações não lineares:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial r} &= R^{-1}r - \lambda &= 0 \\ \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \hat{x}} &= -H^T(\hat{x})\lambda &= 0 \\ \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \lambda} &= z - h(\hat{x}) - r &= 0 \end{aligned} \quad (2.16)$$

A solução deste sistema de equações não-lineares pode ser obtida pela aplicação do método de Newton. Considerando a eliminação da variável r através da substituição da primeira equação de (2.16) na terceira equação, o sistema linear a ser resolvido a cada iteração é dado por:

$$\begin{bmatrix} 0 & H^T(\hat{x}^k) \\ H(\hat{x}^k) & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ z - h(\hat{x}^k) \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

e a atualização dos estados é análoga à descrita na equação (2.12).

O método da matriz aumentada é mais robusto que o método da equação normal, apresentando estabilidade numérica intermediária entre este e os métodos ortogonais (HOLTEN et al., 1988).

2.3.3.1 Inclusão de informações *a priori*

A disponibilidade de informações *a priori* \bar{x} sobre as variáveis de estado também pode ser considerada no problema de estimação apresentado em (2.14). As informações *a priori* contribuem para a estabilidade numérica do problema e também para manutenção da observabilidade do mesmo, o que pode ser relevante na estimação de estados generalizada (LOURENÇO; SIMÕES COSTA; CLEMENTS, 2004). O problema de otimização restrito com a inclusão das informações *a priori* pode ser expresso por:

$$\begin{aligned} \min \quad & J(r, \hat{x}) = \frac{1}{2}r^T R^{-1}r + \frac{1}{2}p^T P^{-1}p \\ \text{sujeito a} \quad & r = z - h(\hat{x}) \end{aligned} \quad (2.18)$$

onde $p = (\hat{x} - \bar{x})$ é um vetor de dimensão $(n \times 1)$ e P é a matriz de covariância das informações *a priori*, que reflete o nível de incerteza relativo às mesmas. Na falta de informação mais adequada, considera-se $V_i = 1,0$ p.u., $\theta_i = 0$ rad e P uma matriz cujos valores são calculados considerando-se que os estados \bar{x}_i são não correlacionados e uniformemente distribuídos no intervalo $[-x_{i, \text{lim}}, x_{i, \text{lim}}]$, onde $x_{i, \text{lim}}$ estabelece o valor máximo a ser atingido pelas variáveis de estado em condição de operação em regime permanente.

Aplicando-se o método de Newton, o sistema de equações a ser resolvido a cada etapa do processo iterativo fica da seguinte forma (LOURENÇO, 2001):

$$\begin{bmatrix} -P^{-1} & H^T(\hat{x}^k) \\ H(\hat{x}^k) & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P^{-1} p^k \\ z - h(\hat{x}^k) \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

$$\hat{x}^{k+1} = \hat{x}^k + \Delta x \quad (2.20)$$

2.3.4 Métodos ortogonais

A utilização de um método baseado em transformações ortogonais para a resolução de problemas de EESP foi originalmente proposta por (SIMÕES COSTA; QUINTANA, 1981a) e posteriormente por (VEMPATI; SLUTSKER; TINNEY, 1991). Os métodos ortogonais tem como principal vantagem a robustez numérica, uma vez que as transformações ortogonais evitam o produto $H^T H$. As transformações ortogonais mais adequadas para a utilização na estimação de estados em sistemas de potência são as rotações de Givens.

2.4 Estimação de estados pelo método dos MVAP

O método dos Mínimos Valores Absolutos Ponderados ou WLAV^{2.2} consiste na formulação do problema de EESP considerando a norma ℓ_1 ^{2.3} dos resíduos de estimação. O problema de otimização restrito pode ser expresso como:

^{2.2}Do inglês *Weighted Least Absolute Value*.

^{2.3}O termo l_1 norm é comumente utilizado nos artigos de EESP que utilizam métodos baseados no critério dos MVAP. A norma unitária, ou norma l_1 , é definida para um dado vetor x como segue (NOCEDAL; WRIGHT, 1999):

$$\|x\|_1 \triangleq \sum_{i=1}^n |x_i|$$

$$\begin{aligned} \min \quad & w^T |r| \\ \text{sujeito a} \quad & r = z - h(\hat{x}) \end{aligned} \quad (2.21)$$

onde w é um vetor de dimensão $(m \times 1)$ dos pesos associados aos valores medidos. Cada elemento do vetor w é dado por $w_i = \frac{1}{\sigma_i^2}$, sendo que σ_i^2 é a variância da i -ésima medida.

Para evitar problemas decorrentes da descontinuidade das derivadas dos módulos de r_i , é utilizado um artifício matemático baseado na definição da função módulo:

$$|r| = \begin{cases} r, & r \geq 0 \\ -r, & r < 0 \end{cases} \quad (2.22)$$

O artifício consiste na introdução de duas variáveis não-negativas, η e ρ , correspondentes às magnitudes das partes positiva e negativa de r , respectivamente. Portanto:

$$\begin{aligned} r &= \eta - \rho \\ \eta, \rho &\geq 0 \end{aligned} \quad (2.23)$$

e

$$|r| = \eta + \rho \quad (2.24)$$

Pode-se provar que, na solução do problema e para dado r_i , uma das variáveis auxiliares, η_i ou ρ_i , será sempre igual a zero.

Visando a utilização do método Primal-Dual de Pontos Interiores e no intuito de preservar a não-negatividade de η e ρ , funções do tipo barreira logarítmica são inseridas, de modo que o problema pode ser reescrito como:

$$\begin{aligned} \min \quad & w^T (\eta + \rho) - \mu \sum_{i=1}^m (\ln \eta_i + \ln \rho_i) \\ \text{sujeito a} \quad & \eta - \rho = z - h(\hat{x}) \end{aligned} \quad (2.25)$$

onde μ é o parâmetro de ajuste da barreira logarítmica (WRIGHT, 1996).

A solução deste tipo de problema segue os mesmos procedimentos descritos na sub-seção (2.3.3), ou seja, encontra-se a função Lagrangeana de (2.25), aplicam-se as condições de otimalidade de primeira ordem e o conjunto de equações não-lineares resultante é resolvido através de sucessivas linearizações. Para o método primal-dual de pontos interiores o sistema de equações a ser resolvido a cada passo do processo iterativo possui a forma

descrita por (BAGCHI et al., 1994):

$$H^T D H \Delta x = H^T M \quad (2.26)$$

onde $H = \frac{\partial h(x^k)}{\partial x}$ e a matriz D , bem como o vetor M , dependem da formulação adotada.

2.4.1 O método dos MVAP e os pontos de alavancamento

Por sua simplicidade e robustez, o método dos MVAP apresentava-se com potencial para ser uma excelente alternativa à formulação dos MQP na solução de problemas de EESP. A característica natural dos métodos baseados na norma ℓ_1 de eleger n medidas (FALCÃO; ASSIS, 1988) - dentre as m disponíveis - que terão resíduo nulo automaticamente excluiria as medidas com erros grosseiros de medição, caracterizando assim a “robustez” do método dos mínimos valores absolutos. Porém certas características do problema podem fazer com que determinadas medidas sempre pertençam ao grupo que possui resíduo nulo, mascarando assim eventuais erros associados a estes elementos. O exemplo a seguir ilustra o comportamento do método dos MVAP.

A Figura 2.1^{2.4}, página 17, representa uma regressão linear $z = a + bx$, cujos valores a serem estimados são \hat{a} e \hat{b} . A legenda LS indica a solução encontrada pelo método dos mínimos quadrados (MQ) e a legenda L_1 representa a solução encontrada pelo método dos mínimos valores absolutos (MVA). O símbolo “○” indica os valores de entrada do problema, ou valores medidos, - sendo que um dos valores possui erro grosseiro - e o símbolo “+” representa o valor exato da quantidade medida que foi simulada com erro. Pode-se observar que a solução pelo método dos MVA eliminou automaticamente a medida errônea, obtendo diretamente a melhor estimativa. Por sua vez, a solução encontrada com o método dos MQ foi afetada pelo erro grosseiro, sendo necessária uma etapa de pós-processamento em que o erro seria identificado pela análise dos resíduos normalizados de estimação; após a identificação e eliminação da medida errônea, o resultado final será, para este caso, idêntico ao encontrado pelo método dos MVA. Como o método dos MVA encontra diretamente a solução pode ser considerado robusto.

Na Figura 2.2 é apresentada uma situação em que a medida portadora de erro grosseiro está deslocada do conjunto de pontos no sentido do eixo x , caracterizando a existência de um ponto de alavancamento. Para esta situação ambos os métodos são afetados pelo erro grosseiro e o método dos MQ

^{2.4}As Figuras 2.1 e 2.2 foram adaptadas do artigo (MONTICELLI, 2000).

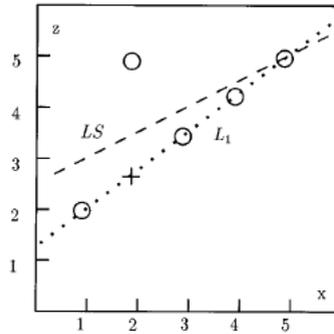


Figura 2.1: Comparação das características dos métodos MQP e MVAP

comporta-se como no caso anterior, em que o erro pode ser detectado e identificado em uma etapa de pós-processamento. O mesmo não ocorre com o método dos MVA, que sempre irá atender o elemento deslocado, mascarando-se assim a presença do erro grosseiro.

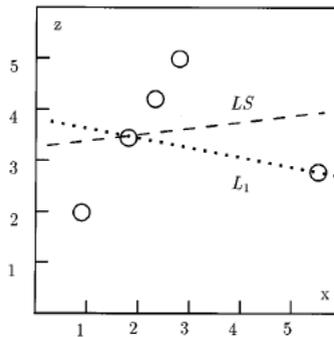


Figura 2.2: Ponto de alavancamento

Em (MILI; PHANIRAJ; ROUSSEEUW, 1991), pontos de alavancamento são definidos como os pontos de uma regressão que estão bem distantes da massa de pontos no espaço fator. Considerando o modelo linear do modelo de medição $z = Hx + r$, onde x é um vetor de estados de dimensão $(n \times 1)$, o espaço fator é o espaço m -dimensional formado pelas linhas da matriz H . Cada linha da matriz H define um ponto no espaço fator.

Conforme já mencionado na Seção 1.2, em sistemas de potência os

pontos de alavancamento estão relacionados com medidas em ramos de baixa impedância e também com medidas de injeção em determinados nós, como por exemplo:

- medida de fluxo de potência em ramo de baixa impedância;
- medidas de injeção de potência em nós adjacentes a ramos de baixa impedância;
- medida de injeção de potência em nós com um grande número de ramos incidentes.

O exemplo da Figura 2.2 ilustra a vulnerabilidade do método WLAV à presença de pontos de alavancamento, o que se torna um obstáculo à sua utilização prática, já que é difícil se determinar *a priori* se o modelo da rede elétrica apresentará ou não estes pontos de alavancamento.

2.5 Estimação de estados generalizada

A chamada EEG caracteriza-se pela modelagem da rede elétrica - ou parte dela - no nível de seção de barra. Considerando-se um determinado ramo chaveável entre os nós i e j , são modeladas no problema novas variáveis de estado, que são os fluxos de potência ativa t_{ij} e reativa u_{ij} nos ramos chaveáveis, além da inclusão de restrições estruturais e operacionais à formulação do problema pelo método dos mínimos quadrados. Nos procedimentos descritos à seguir, será suposto que os parâmetros da rede são bem conhecidos e isentos de erro.

A montagem das matrizes de observação das restrições operacionais e estruturais é descrita nos itens subsequentes.

2.5.1 Restrições estruturais

A modelagem das restrições estruturais no problema de estimação de estados busca o aproveitamento de certas características físicas do sistema, como a existência de barras de passagem ou transferência que possuem injeção de potência nula. Estas injeções de potência são modeladas como restrições de igualdade da forma, para uma barra i qualquer:

$$\begin{aligned} P_i(V, \delta) &= 0 \\ Q_i(V, \delta) &= 0 \end{aligned} \tag{2.27}$$

Fluxos de potência em ramos convencionais incidentes em nós de injeção nula são tratados conforme sugerido em (MONTICELLI, 1993a).

Outra informação que pode ser modelada como restrição de igualdade é a barra de referência angular:

$$\delta_i = 0 \quad (2.28)$$

As restrições estruturais são representadas no problema de EESP como um vetor de funções não-lineares $h_s(\cdot)$ da forma:

$$h_s(\hat{x}) = 0 \quad (2.29)$$

onde $h_s(\hat{x})$ tem dimensão $(n_s \times 1)$ e n_s é o número de restrições estruturais do problema.

2.5.2 Restrições operacionais

A modelagem das restrições operacionais no problema de EEG busca representar a condição operativa presumida dos ramos chaveáveis, explorando as características elétricas do sistema. Desta maneira, um disjuntor fechado irá apresentar diferença angular nula e queda de tensão nula entre as barras a jusante e a montante do mesmo:

$$\begin{aligned} \delta_i - \delta_j &= 0 \\ V_i - V_j &= 0 \end{aligned} \quad (2.30)$$

Já um disjuntor aberto apresentará fluxo de potência ativa e reativa nulo entre as barras a jusante e a montante do mesmo:

$$\begin{aligned} t_{ij}(V, \delta) &= 0 \\ u_{ij}(V, \delta) &= 0 \end{aligned} \quad (2.31)$$

As restrições operacionais são representadas no problema de EESP como um vetor de funções não-lineares $h_o(\cdot)$ da forma:

$$h_o(\hat{x}) = 0 \quad (2.32)$$

onde $h_o(\hat{x})$ tem dimensão $(n_o \times 1)$ e n_o é o número de restrições operacionais do problema.

2.5.3 Formulação do problema de EEG

Considerando-se a modelagem do problema de EESP com a utilização de informações *a priori* apresentada na Equação (2.18), a formulação do problema de otimização restrito para a EEG é apresentado na equação abaixo.

$$\begin{aligned} \min \quad & J(r, \hat{x}) = \frac{1}{2} r^T R_m^{-1} r + \frac{1}{2} p^T P^{-1} p \\ \text{sujeito a} \quad & r = z_m - h_m(\hat{x}) \\ & h_s(\hat{x}) = 0 \\ & h_o(\hat{x}) = 0 \end{aligned} \quad (2.33)$$

onde o vetor de estados x tem dimensão $(n + n_o) \times 1$ e o vetor r tem dimensão $(m \times 1)$.

As informações *a priori* são particularmente úteis na EEG pois ao fornecerem alguma informação sobre todas as barras evitam perda de observabilidade do problema decorrente de ilhamentos, que são comuns quando se modela o sistema elétrico no nível de seção de barra.

A solução do problema pelo método do tableau esparsa de Hachtel (LOURENÇO; SIMÕES COSTA; CLEMENTS, 2004) passa pela resolução iterativa de um sistema de equações análogo ao apresentado na Equação (2.19):

$$\begin{bmatrix} -P^{-1} & H^T(\hat{x}^k) \\ H(\hat{x}^k) & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P^{-1} p^k \\ z - h(\hat{x}^k) \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

$$\hat{x}^{k+1} = \hat{x}^k + \Delta x \quad (2.35)$$

porém z , $h(\cdot)$, λ e as matrizes H e R são agora definidos como segue:

$$z \triangleq \begin{bmatrix} z_m \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} ; \quad \lambda \triangleq \begin{bmatrix} \lambda_m \\ \lambda_s \\ \lambda_o \end{bmatrix} ; \quad h(\hat{x}) \triangleq \begin{bmatrix} h_m(\hat{x}) \\ h_s(\hat{x}) \\ h_o(\hat{x}) \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

onde a dimensão dos vetores z , λ e $h(\cdot)$ é $(m + n_s + n_o) \times 1$. Além disso,

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial h(\hat{x})}{\partial x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_m(\hat{x})}{\partial x} \\ \frac{\partial h_s(\hat{x})}{\partial x} \\ \frac{\partial h_o(\hat{x})}{\partial x} \end{bmatrix} \triangleq \begin{bmatrix} H_m(\hat{x}) \\ H_s(\hat{x}) \\ H_o(\hat{x}) \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

onde a dimensão da matriz H é $(m + n_s + n_o) \times (n + n_o)$. E também,

$$R \triangleq \begin{bmatrix} R_m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

onde R é uma matriz quadrada de dimensão $m + n_s + n_o$. Já a dimensão da matriz diagonal P de covariância das informações *a priori* é $n + n_o$.

Pela análise das equações apresentadas nesta subseção pode-se perceber que a transformação do problema de EESP em um problema de EEG implica um aumento considerável da dimensão do problema. Portanto, a modelagem de subestações de um SEP no nível de seção de barra é um procedimento justificável apenas para situações específicas, como por exemplo quando se está interessado na identificação de erros de topologia envolvendo uma determinada subestação, ou quando há necessidade do conhecimento da distribuição dos fluxos internos a ela. A execução de uma modelagem detalhada sem o comprometimento do desempenho computacional da estimação de estados é viabilizada através da adoção de técnicas de determinação de zonas de anomalia, já citadas neste trabalho.

2.6 Conclusões

Neste capítulo foram apresentados alguns dos principais métodos para a resolução dos problemas de EESP e EEG. O método dos mínimos quadrados ponderados, em suas várias formulações, é a formulação mais utilizada em implementações reais de estimadores de estados. Apesar de muito pesquisado, o método dos MVAP teve a aplicação em EESP limitada, entre outros motivos, pela questão dos pontos de alavancamento.

A formulação da CET, que será apresentada no Capítulo 3, busca tirar proveito da característica de rejeição automática de erros grosseiros da formulação MVAP sem apresentar susceptibilidade aos pontos de alavancamento, uma vez que o termo MVAP representará apenas as restrições operacionais do problema, que geram componentes homogêneos do espaço fator da matriz Jacobiana.

3 COESTIMAÇÃO DE ESTADOS E TOPOLOGIA

3.1 Introdução

Neste capítulo será apresentada a formulação do problema de CET bem como a resolução passo a passo do problema através de um Método Primal-Dual de Pontos Interiores (MPDPI). A idéia da estimação direta da topologia da rede através da formulação da EEG como um problema multi-objetivo foi proposta inicialmente por (CLEMENTS, 2006) e desenvolvida neste trabalho, cujo objetivo é operacionalizar e comprovar a viabilidade do método.

A formulação do problema de CET é apresentada na Seção 3.2 e os procedimentos para a resolução do mesmo por um MPDPI desenvolvido especificamente para este problema são apresentados na Seção 3.3. O algoritmo utilizado para a detecção, identificação e correção de erros de topologia, tendo por base a propriedade interpoladora altamente seletiva do termo MVAP, é apresentado na Seção 3.4. Comentários sobre alguns aspectos computacionais do problema são feitos na Seção 3.5 e por fim é apresentada na Seção 3.6, a título ilustrativo, a aplicação do método de CET a um sistema-teste de pequena dimensão.

3.2 Formulação do Problema

A Coestimação de Estados e Topologia é um problema de EEG no que se refere à modelagem de partes da rede no nível de seção de barra, porém a topologia da rede é estimada diretamente através da inclusão de um termo na função objetivo que representa as restrições operacionais. Este termo é modelado pelo critério dos MVAP. A função objetivo $J(\cdot)$ proposta para o problema de otimização combina então a aplicação do critério dos MQP para os resíduos de medição e do critério MVAP para as restrições operacionais, resultando num problema de otimização multi-objetivo, como segue:

$$J(r, x) = J_{mqp}(r) + J_{mvap}(\hat{x}) \quad (3.1)$$

Tendo em vista os objetivos exploratórios desta dissertação e ainda que (VEMPATI et al., 2005):

1. Há uma excelente correlação entre o status de um ramo chaveável e a existência de fluxo em MW através deste, e os valores aproximados para os fluxos em MW obtidos através do modelo linear não interferem

nesta relação, e que

2. o esforço computacional para a resolução do problema linear é consideravelmente menor do que para a solução do problema completo, não-linear, o que é desejável em aplicações de tempo real,

opta-se pela utilização de um modelo linear (“DC”) para a rede elétrica. As bem conhecidas hipóteses simplificadoras nas quais se baseia o modelo DC são (MONTICELLI, 1983):

- As magnitudes de tensão nas barras do SEP são consideradas todas iguais entre si;
- As resistências e admitâncias transversais das linhas de transmissão são consideradas desprezíveis;
- As aberturas angulares das linhas são supostas pequenas o suficiente para justificar a aproximação $\sin(\delta_i - \delta_j) \approx (\delta_i - \delta_j)$ rads.

Assim, a Equação (3.1), considerando-se o modelo linear da rede, pode ser expressa por:

$$J(r, x) = \frac{1}{2} r^T R_m^{-1} r + w^T |H_o \hat{x}| \quad (3.2)$$

onde $r = z - H_m \hat{x}$ é o vetor dos resíduos de estimação, R_m é a matriz diagonal de covariância dos erros de medição, H_m e H_o são as matrizes de observação das medidas e das restrições operacionais, respectivamente, e w é o vetor de pesos das restrições operacionais. Para a resolução do problema de EEG também pode-se definir uma matriz de observação para as restrições estruturais, H_s . As matrizes H_o e H_s são definidas de modo análogo à matriz H_m do estimador de estados linearizado.

A solução ótima de um problema multi-objetivos desta natureza passa pela definição de prioridades e/ou pesos entre os vários objetivos, de forma que ambos os termos contribuam na forma desejada para o critério de otimização. Neste caso, o primeiro termo da função objetivo, responsável pelo processamento das medidas analógicas, é ponderado da maneira usual, ou seja, pelo inverso da covariância dos erros de medição, R_m^{-1} . O segundo termo, correspondente ao processamento da topologia da rede, é ponderado de forma a proporcionar uma contribuição equivalente de ambos os termos com relação ao critério de otimização. Considera-se que o nível de informação sobre os status dos disjuntores na região suspeita de conter erros de topologia é uniforme, e portanto todos os pesos associados a estes dispositivos assumem o

mesmo valor, w_o . Para cumprir o objetivo de balancear as contribuições dos componentes do critério de otimização, o seguinte procedimento de cálculo para os pesos w_o é utilizado nesta dissertação:

$$w_o = \frac{k_w}{\bar{R}_{m,ii}} \quad (3.3)$$

onde k_w é um fator de calibração real positivo e $\bar{R}_{m,ii}$ é o valor médio das variâncias das medidas. Tipicamente, $k_w \leq 0.01$.

Para modelar o termo MVAP da função objetivo (3.1) foi adotado o mesmo procedimento apresentado em (SINGH; ALVARADO, 1994), que consiste na substituição das restrições operacionais $H_o\hat{x}$ por $\eta - \rho$, onde η e ρ representam as partes positiva e negativa de $H_o\hat{x}$, respectivamente. A não-negatividade de η e ρ é garantida pela inclusão de uma função barreira logarítmica no problema de otimização.

Finalmente, é considerada a disponibilidade de informações *a priori* \bar{x} sobre as variáveis de estado. A inclusão das informações *a priori*, além de contribuir na melhoria da estabilidade numérica durante a solução do problema, tem a relevante função de garantir a observabilidade do sistema, evitando-se assim a implementação de procedimentos adicionais para definição de barras de referência em eventuais ilhamentos decorrentes da modelagem no nível de seção de barra. Na falta de informação melhor, utiliza-se $\bar{x}_\eta = 0$ para todos os estados.

O problema de otimização com restrições resultante para o método de coestimação é apresentado nas equações abaixo:

$$\begin{aligned} \min \quad & \frac{1}{2}r^T R_m^{-1}r + w^T(\eta + \rho) + \frac{1}{2}p^T P^{-1}p - \mu \sum_i^{n_o} (\ln \eta_i + \ln \rho_i) \\ \text{sujeito a} \quad & r = z - H_m\hat{x} \\ & H_s\hat{x} = 0 \\ & H_o\hat{x} = \eta - \rho \end{aligned} \quad (3.4)$$

onde $p = \hat{x} - \bar{x}$ e P é a matriz de covariância das informações *a priori*, cujos valores são não-correlacionados e calculados de acordo com (LOURENÇO; SIMÕES COSTA; CLEMENTS, 2004).

A função Lagrangeana do Problema (3.4) é dada por:

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & \frac{1}{2}r^T R_m^{-1}r + w^T(\eta + \rho) + \frac{1}{2}p^T P^{-1}p - \mu \sum_i^{n_o} (\ln \eta_i + \ln \rho_i) \\ & - \lambda_m^T (r - z + H_m \hat{x}) - \lambda_s^T (H_s \hat{x}) - \lambda_o^T (H_o \hat{x} - \eta + \rho) \end{aligned} \quad (3.5)$$

onde λ_m , λ_s e λ_o são os multiplicadores de Lagrange das medidas, das restrições estruturais e das restrições operacionais, respectivamente.

3.3 Solução pelo método primal-dual de pontos interiores

O Problema (3.4) formulado na Seção 3.2 é resolvido pela aplicação do algoritmo primal-dual de pontos interiores, especialmente adaptado para este problema. Para tal, aplicam-se as condições de otimalidade de Karush-Kuhn-Tucker (KKT) com base na função Lagrangeana da Equação (3.5), procedimento que gera as condições de factibilidade primal e de factibilidade dual.

- Factibilidade dual

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial r} &= R_m^{-1}r - \lambda_m = 0 \\ \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial p} &= P^{-1}p - H_m^T \lambda_m - H_s^T \lambda_s - H_o^T \lambda_o = 0 \\ \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \hat{x}} &= w + \lambda_o - \mu D_\eta^{-1}e = 0 \rightarrow D_\eta \sigma_\eta - \mu e = 0 \\ \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \eta} &= w + \lambda_o - \mu D_\eta^{-1}e = 0 \rightarrow D_\eta \sigma_\eta - \mu e = 0 \\ \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \rho} &= w - \lambda_o - \mu D_\rho^{-1}e = 0 \rightarrow D_\rho \sigma_\rho - \mu e = 0 \end{aligned} \quad (3.6)$$

sendo e um vetor unitário de dimensão ($n_o \times 1$). As variáveis σ_η e σ_ρ e as matrizes D_η e D_ρ são definidas como segue:

$$\begin{aligned} \sigma_\eta &\triangleq w + \lambda_o \\ \sigma_\rho &\triangleq w - \lambda_o \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} D_\eta &\triangleq \text{diag}(\eta) \\ D_\rho &\triangleq \text{diag}(\rho) \end{aligned} \quad (3.8)$$

onde a função $\text{diag}(\cdot)$ transforma um vetor em uma matriz diagonal.

- Factibilidade primal

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \lambda_m} &= -r + z - H_m \hat{x} = 0 \\ \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \lambda_s} &= -H_s \hat{x} = 0 \\ \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \lambda_o} &= -H_o \hat{x} + \eta - \rho = 0 \end{aligned} \quad (3.9)$$

Considerando-se as equações (3.6) e (3.9), o conjunto de equações a ser resolvido para um valor genérico μ é:

$$\begin{aligned}
 H^T \lambda - P^{-1} p &= 0 \\
 D_\eta \sigma_\eta - \mu e &= 0 \\
 D_\rho \sigma_\rho - \mu e &= 0 \\
 H_m \hat{x} + R_m \lambda_m - z &= 0 \\
 H_s \hat{x} &= 0 \\
 H_o \hat{x} - \eta + \rho &= 0
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

onde o vetor λ e a matriz H são definidos como:

$$\lambda \triangleq \begin{bmatrix} \lambda_m \\ \lambda_s \\ \lambda_o \end{bmatrix}_{(m+n_s+n_o)} ; \quad H \triangleq \begin{bmatrix} H_m \\ H_s \\ H_o \end{bmatrix}_{(m+n_s+n_o) \times n} \tag{3.11}$$

Aplicando-se o método de Newton para a obtenção de uma direção de busca Δy tem-se, para um determinado valor de μ :

$$\nabla^2 \mathcal{L}|_k \Delta y = -\nabla \mathcal{L}|_k \tag{3.12}$$

onde Δy é definido como segue:

$$\Delta y \triangleq \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \eta \\ \Delta \rho \\ \Delta \lambda \end{bmatrix}_{(n+4n_o+m+n_s)} \tag{3.13}$$

O sistema de equações lineares a ser resolvido a cada iteração, correspondente à Equação (3.12), é apresentado abaixo na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} -P^{-1} & 0 & 0 & H_m^T & H_s^T & H_o^T \\ 0 & D_{\sigma_\eta}^k & 0 & 0 & 0 & D_\eta^k \\ 0 & 0 & D_{\sigma_\rho}^k & 0 & 0 & -D_\rho^k \\ H_m & 0 & 0 & R_m & 0 & 0 \\ H_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ H_o & -I & I & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \eta \\ \Delta \rho \\ \Delta \lambda_m \\ \Delta \lambda_s \\ \Delta \lambda_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P^{-1} p^k - H^T \lambda^k \\ \mu e - D_\eta^k \sigma_\eta^k \\ \mu e - D_\rho^k \sigma_\rho^k \\ z_m - H_m x^k - R_m \lambda_m^k \\ -H_s x^k \\ -H_o x^k + \eta^k - \rho^k \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

onde as matrizes D_{σ_η} e D_{σ_ρ} são definidas como segue:

$$\begin{aligned} D_{\sigma_\eta} &\triangleq \text{diag}(\sigma_\eta) \\ D_{\sigma_\rho} &\triangleq \text{diag}(\sigma_\rho) \end{aligned} \quad (3.15)$$

3.3.1 Atualização das variáveis

Uma vez obtida a direção de busca, é feito o cálculo dos passos de atualização primal e dual. Para isto são utilizadas características peculiares da formulação proposta, expressas na segunda e terceira equações em (3.10): como o parâmetro de barreira μ é um número positivo ao longo do processo iterativo e as variáveis primais η e ρ tem a não-negatividade garantida pela função barreira logarítmica, as variáveis duais σ_η e σ_ρ deverão ser necessariamente não-negativas. O cálculo dos passos de atualização primal e dual garante a manutenção da não-negatividade destas variáveis durante o processo iterativo e é expresso por:

$$\begin{aligned} \alpha_p &= \min \left\{ \min_{\Delta \eta_i < 0} \frac{\eta_i}{|\Delta \eta_i|}, \min_{\Delta \rho_i < 0} \frac{\rho_i}{|\Delta \rho_i|}, 1 \right\} \\ \alpha_d &= \min \left\{ \min_{\Delta \sigma_{\eta_i} < 0} \frac{\sigma_{\eta_i}}{|\Delta \sigma_{\eta_i}|}, \min_{\Delta \sigma_{\rho_i} < 0} \frac{\sigma_{\rho_i}}{|\Delta \sigma_{\rho_i}|}, 1 \right\} \end{aligned} \quad (3.16)$$

onde, das equações (3.7), temos:

$$\begin{aligned} \Delta \sigma_\eta &= \Delta \lambda_o \\ \Delta \sigma_\rho &= -\Delta \lambda_o \end{aligned} \quad (3.17)$$

A atualização das variáveis é feita através da aplicação de procedimentos usuais do método primal-dual de pontos interiores (WRIGHT, 1996):

$$y^{k+1} = y^k + \kappa \alpha \Delta y \quad (3.18)$$

sendo $\alpha = \alpha_p$ para as variáveis primais, $\alpha = \alpha_d$ para as variáveis duais e $\kappa = 0,9995$ visa garantir que a solução esteja dentro da região viável.

3.3.2 Atualização do parâmetro μ

A estratégia utilizada para a atualização do parâmetro de barreira μ baseia-se igualmente na segunda e terceira equações em (3.10). De fato, os produtos $\eta_i \sigma_{\eta_i}$ e $\rho_i \sigma_{\rho_i}$ podem ser considerados como condições de folga complementar. Portanto o parâmetro de barreira pode ser atualizado tendo por base a brecha de dualidade (WRIGHT, 1996):

$$\mu = \frac{(\eta^k)^T \sigma_{\eta}^k + (\rho^k)^T \sigma_{\rho}^k}{2\beta n_o} \quad (3.19)$$

onde $\beta = 10$ e n_o é o número de restrições operacionais.

3.3.3 Teste de convergência

A convergência do processo iterativo é determinada pelo cumprimento das condições de KKT expressas em (3.10). Considerando-se uma tolerância de convergência δ (tipicamente $\delta = 1 \times 10^{-6}$), a convergência é obtida quando as condições abaixo são simultaneamente atendidas^{3.1}:

$$\begin{aligned} \|P^{-1} p^k - H^T \lambda^k\|_2 &\leq \delta \\ \|D_{\eta}^k \sigma_{\eta}^k\|_{\infty} &\leq \delta \\ \|D_{\rho}^k \sigma_{\rho}^k\|_{\infty} &\leq \delta \\ \|z_m - H_m x^k - R_m \lambda_m^k\|_2 &\leq \delta \\ \|H_s x^k\|_2 &\leq \delta \\ \|H_o x^k + \eta^k - \rho^k\|_2 &\leq \delta \end{aligned} \quad (3.20)$$

^{3.1} Para um determinado vetor x , por definição (NOCEDAL; WRIGHT, 1999):

$$\begin{aligned} \|x\|_2 &\triangleq (x^T x)^{1/2} \\ \|x\|_{\infty} &\triangleq \max_{i=1..n} |x_i| \end{aligned}$$

Na convergência o parâmetro de barreira $\mu \rightarrow 0$ e nenhum dos produtos $D_{\eta_i}^k \sigma_{\eta_i}^k$ e $D_{\rho_i}^k \sigma_{\rho_i}^k$, $i = 1 \dots n_o$, deve ser maior do que a tolerância.

As etapas de execução do Método Primal-Dual de Pontos Interiores para solução do problema de CET estão descritas no Algoritmo 1, localizado na página 31. Após a convergência do algoritmo, são obtidos os estados estimados para o sistema de potência, além dos multiplicadores de Lagrange associados às medidas, restrições estruturais e restrições operacionais.

3.4 Estimação da topologia

Uma condição necessária para que a detecção de erros de topologia na EEG seja possível é que os estados t_{ij} correspondentes aos fluxos nos ramos chaveáveis sejam observáveis. Conforme demonstrado em (MONTICELLI, 1993a), quando há ocorrência de laços envolvendo ramos de impedância nula, ou *loop flows*, o sistema só será observável do ponto de vista topológico se pelo menos um dos ramos chaveáveis que compõem o laço de impedância nula for monitorado. Graças à presença de informações *a priori*^{3,2} o não atendimento desta condição não impede a convergência do algoritmo de CET, porém a estimação dos estados associados aos *loop flows* não será confiável. Em situações reais esta condição é por vezes atendida, uma vez que é comum a instalação de TCs junto aos disjuntores principais.

Após obtida a convergência do método de CET, conforme descrito no Algoritmo 1, tornam-se disponíveis as variáveis de estado, a saber, ângulos das tensões nas barras e fluxos de potência nos disjuntores. Os status estimados dos disjuntores são determinados através da comparação do valor das variáveis de estado associadas aos fluxos nos disjuntores com uma pequena tolerância $\varepsilon_{fluxo} > 0$, determinada estatisticamente. Este procedimento é proposto inicialmente no contexto de sistemas de potência em (CLEMENS; SIMÕES COSTA, 1998) e reproduzido abaixo.

$$\varepsilon_{fluxo_i} = \sigma_{disj_i} N_{1-\frac{\alpha}{2}} \quad (3.21)$$

onde $N_{1-\frac{\alpha}{2}}$ é o 100 $(1 - \frac{\alpha}{2})$ percentil da distribuição normal padrão, α é probabilidade de falso alarme (adotada como 0,05 neste trabalho) e σ_{disj}^2 é a variância do fluxo através dos disjuntores, obtida a partir da diagonal da matriz Σ , definida na equação abaixo.

^{3,2}Nesses casos, a presença de informações *a priori* sobre os estados associados aos ramos chaveáveis fornece condições para a convergência do MPDPI.

Algoritmo 1 Solução do problema de CET pelo Método Primal-Dual de Pontos Interiores

1. Dados:

- (a) Vetor de medidas analógicas z e vetor de informações *a priori* \bar{x} ;
- (b) Matrizes de observação H_m , H_s e H_o (topologia presumida);
- (c) Matrizes de covariância R_m , P e vetor de pesos w ;
- (d) Valores iniciais para as variáveis de estado x^0 , η^0 , ρ^0 e λ^0 e para o parâmetro de barreira μ^0 ;
- (e) Tolerância δ para convergência e número máximo de iterações $maxIter$.

2. Montar vetor y^0 e calcula variáveis σ_η^0 e σ_ρ^0 ;3. Enquanto $k < maxIter$

- (a) Atualizar matrizes: D_η^k , D_ρ^k , $D_{\sigma_\eta}^k$, $D_{\sigma_\rho}^k$, equações (3.8) e (3.15);
 - (b) Calcular gradiente: vetor do lado direito em (3.14);
 - (c) Testar a convergência: equações (3.20). Em caso afirmativo, FIM;
 - (d) Montar matriz Hessiana: lado esquerdo da equação (3.14);
 - (e) Resolver o sistema linear (3.12) para obtenção de Δy ;
 - (f) Calcular as variáveis Δ_{σ_η} e Δ_{σ_ρ} , equações (3.17);
 - (g) Calcular os passos de atualização das variáveis primais e duais, equações (3.16);
 - (h) Atualizar variáveis do problema de acordo com equação (3.18);
 - (i) Atualizar as variáveis σ_η^k e σ_ρ^k , equações (3.7);
 - (j) Atualizar parâmetro de barreira μ^k conforme equação (3.19);
 - (k) Incrementar a variável k .
-

$$\Sigma \triangleq [\nabla^2 \mathcal{L}|_k]_{n_o \times n_o}^{-1} \quad (3.22)$$

onde n_o é o número de restrições operacionais do problema. A matriz Σ é formada portanto pela partição da inversa da matriz Hessiana associada aos estados correspondentes aos fluxos nos ramos chaveáveis. O valor de σ_{disj} é dado por:

$$\sigma_{disj_i} = \sqrt{|\Sigma_{ii}|} \quad (3.23)$$

Se o valor do estado estimado, em módulo, for maior do que a tolerância calculada a partir da Equação (3.21) o disjuntor é considerado fechado; caso contrário é considerado aberto. Desta maneira os erros de topologia são identificados através da comparação do status estimado para o disjuntor de acordo com a metodologia descrita acima com o status presumido originalmente.

Uma vez garantida a possibilidade de detecção de erros de topologia conforme descrito no início desta seção, a propriedade de interpolação altamente seletiva do termo MVAP da função objetivo mostra-se bastante eficaz para a identificação de disjuntores cujos status tenham sido porventura presumidos erroneamente. Após a identificação destes erros de topologia, estes são corrigidos e é executada uma nova coestimação, conforme descrito no Algoritmo 2. Os ajustes na topologia presumida são feitos através de modificações na estrutura da matriz de observação H_o . Este procedimento é repetido até que não sejam encontradas diferenças entre os status presumidos e estimados. Deve-se observar que o espaço fator composto pelas linhas da matriz H_o é homogêneo e portanto o método de CET não está sujeito a pontos de alavancamento.

Adicionalmente, é indicado no algoritmo a execução do tradicional teste do qui-quadrado no valor do termo J_{mqp} para a verificação de erro grosseiro nas medidas analógicas. O limiar K_{mqp} é obtido da distribuição do qui-quadrado. Deve-se ressaltar porém que o estudo de erros de topologia em conjunto com erros grosseiros em medidas analógicas está fora do escopo deste trabalho de dissertação.

Algoritmo 2 CET: Ajuste da topologia presumida para a topologia estimada

1. Executar a CET, método PDPI, conforme descrito no Algoritmo 1;
 2. Buscar valores calculados para as tolerâncias ϵ_{fluxo_k} e K_{mqp} para a probabilidade α de falso alarme, sendo k a última iteração do MPDPI (Algoritmo 1);
 3. Calcular o valor dos termos da função objetivo de acordo com a Equação (3.2);
 4. Ajustar topologia presumida para a estimada e verificar presença de erros em medidas analógicas:
 - (a) Se ($J_{mqp} > K_{mqp}$) ou (status estimados para os disjuntores são *diferentes* dos status presumidos):
 - i. Se apenas o primeiro teste é verdadeiro, não há erros de topologia, ir para o passo 5;
 - ii. Caso contrário, existem ajustes a serem feitos na topologia, ir para o passo 6;
 - (b) Se ($J_{mqp} < K_{mqp}$) e (status estimados para os disjuntores são *iguais* aos status presumidos) ou número máximo de iterações é atingido, PARAR, a CET foi concluída e a topologia do sistema estimada.
 5. Executar a análise de erros de medidas analógicas, remover erros grosseiros e retornar para o passo 1;
 6. Atualizar a matriz H_o para ajustar os status presumidos dos disjuntores aos status estimados ao fim da CET e retornar ao passo 1.
-

3.5 Aspectos computacionais

O método de CET foi implementado em MATLAB. As maiores dificuldades na fase de desenvolvimento e implementação do método foram a definição dos procedimentos para a atualização dos passos primal e dual, além do parâmetro de barreira μ , e também a determinação do critério para o cálculo dos pesos w associados às restrições operacionais. Outro ponto que

demandou grande esforço foi a interpretação das variáveis do problema para a elaboração do procedimento para ajuste da topologia presumida.

A matriz Hessiana da Equação (3.14) apresentou em geral um bom condicionamento numérico, sendo que o inverso do número de condicionamento^{3.3} é da ordem de 1.10^{-7} para o sistema-teste da Seção 3.6. Porém, para a aplicação em sistemas com grande número de ramos chaveáveis representados, podem ser utilizadas matrizes diagonais de covariâncias não-nulas auxiliares R_s e R_o , conforme ilustrado abaixo, com o objetivo de melhorar o condicionamento numérico do problema. Neste trabalho, bons resultados foram obtidos com R_s e R_o iguais a εI , onde I é uma matriz identidade de ordem apropriada e $\varepsilon = 1.10^{-8}$.

$$\nabla^2 \mathcal{L}|_k = \begin{bmatrix} -P^{-1} & 0 & 0 & H_m^T & H_s^T & H_o^T \\ 0 & D_{\sigma_\eta}^k & 0 & 0 & 0 & D_\eta^k \\ 0 & 0 & D_{\sigma_\rho}^k & 0 & 0 & -D_\rho^k \\ H_m & 0 & 0 & R_m & 0 & 0 \\ H_s & 0 & 0 & 0 & R_s & 0 \\ H_o & -I & I & 0 & 0 & R_o \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

3.6 Aplicação ilustrativa da CET

Nesta seção a aplicação do método de CET é ilustrada com o auxílio de um sistema-teste com 4 ramos chaveáveis. Para garantir a observabilidade dos ramos chaveáveis nos casos testados, foi considerado nas simulações o número mínimo de medidas de fluxo em ramos chaveáveis que evitam a formação de laços de impedância nula sem monitoração.

O sistema-teste é apresentado na Figura 3.1, já com a indicação dos valores em p.u. das medidas, geradas a partir de um estudo de fluxo de potência no nível de seção de barra (LOURENÇO; SIMÕES COSTA; RIBEIRO, 2010). Para a geração das medidas foi inserido um erro aleatório com distribuição normal aos resultados convergidos do fluxo de potência. Os parâmetros do sistema e quantidades medidas com os respectivos valores de variância são apresentados na Tabela 3.1. Foram utilizados valores de precisão para os me-

^{3.3}Para esta cálculo foi utilizada a função *rcond(.)* do MATLAB, que fornece o recíproco do número de condicionamento estimado. O resultado será próximo ao valor unitário se a matriz for bem condicionada e próximo à zero se a matriz for mal condicionada. Na prática o MATLAB começa e emitir alerta para matriz próxima à singularidade para valores inferiores a 1.10^{-16} . Este procedimento de cálculo não é tão preciso quanto o apresentado na Equação (2.13), mas é mais eficiente do ponto de vista computacional, o que justifica a sua utilização.

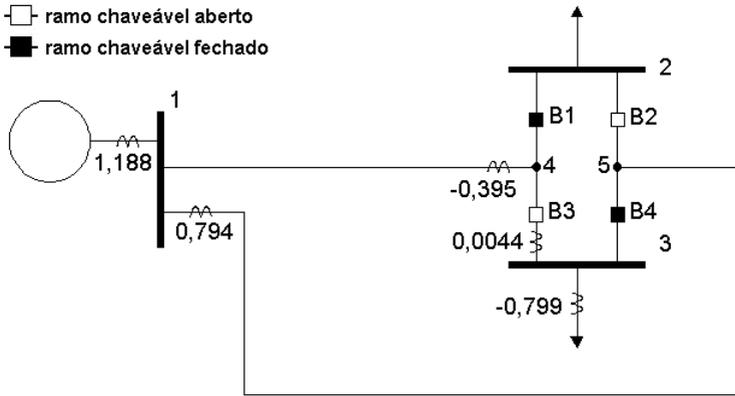


Figura 3.1: Sistema-teste com 4 ramos chaveáveis

Tabela 3.1: Parâmetros do sistema com 4 ramos chaveáveis e valores medidos

Reatância das LTs (p.u.)		Valor fluxo	Valor medido	Variância da medida
x_{14}	0,40	-0,4	-0,3954	$8,32 \cdot 10^{-5}$
x_{15}	0,25	0,8	0,7943	$9,28 \cdot 10^{-5}$
		0,0	0,0044	$8 \cdot 10^{-5}$
		1,2	1,1884	$10,88 \cdot 10^{-5}$
		-0,8	-0,7994	$9,28 \cdot 10^{-5}$

didores iguais a $1,0 \times 10^{-2}$ p.u. tanto para as medidas de fluxo de potência nos ramos quanto de injeção de potência nas barras.

O vetor de estados do problema é dado por:

$$x = [\delta_1 \quad \delta_2 \quad \delta_3 \quad \delta_4 \quad \delta_5 \quad t_{24} \quad t_{25} \quad t_{34} \quad t_{35}]^T$$

As restrições estruturais são dadas por:

$$\delta_1 = 0$$

$$P_4 = 0$$

$$P_5 = 0$$

Considerando-se que não há informações disponíveis sobre os ramos

chaveáveis, supõe-se que todos estão abertos. Esta condição inicial pode ser interpretada como análoga à condição inicial *flat start* dos problemas de estimação de estados convencional. Neste caso, as restrições operacionais são dadas por:

$$\begin{aligned} t_{24} &= 0 \\ t_{25} &= 0 \\ t_{34} &= 0 \\ t_{35} &= 0 \end{aligned}$$

As matrizes de observação H_m , H_s e H_o são dadas por:

$$H_m = \begin{array}{ccccccccc|c} \delta_1 & \delta_2 & \delta_3 & \delta_4 & \delta_5 & t_{24} & t_{25} & t_{34} & t_{35} & \\ \hline -2,5 & 0 & 0 & 2,5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & t_{41} \\ 4 & 0 & 0 & 0 & -4 & 0 & 0 & 0 & 0 & t_{15} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & t_{34} \\ 6,5 & 0 & 0 & -2,5 & -4 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & P_3 \end{array}$$

$$H_s = \begin{array}{ccccccccc|c} \delta_1 & \delta_2 & \delta_3 & \delta_4 & \delta_5 & t_{24} & t_{25} & t_{34} & t_{35} & \\ \hline 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \delta_1 \\ -2,5 & 0 & 0 & 2,5 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & P_4 \\ -4 & 0 & 0 & 0 & 4 & 0 & -1 & 0 & -1 & P_5 \end{array}$$

$$H_o = \begin{array}{ccccccccc|c} \delta_1 & \delta_2 & \delta_3 & \delta_4 & \delta_5 & t_{24} & t_{25} & t_{34} & t_{35} & \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & t_{24} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & t_{25} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & t_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & t_{35} \end{array}$$

Os status presumidos para os disjuntores correspondem à condição inicial “*flat start*” de topologia, ou todos abertos, conforme mencionado anteriormente, e o vetor de pesos w associados às restrições operacionais é calculado de acordo com a Equação (3.3), com $k_w = 0,005$, e é dado por:

$$w = [55 \quad 55 \quad 55 \quad 55]^T$$

Considera-se que as informações *a priori* relativas aos estados (ângulos das barras) são todas nulas, $\bar{x}_i = 0$, e para o cálculo da matriz P de covariância associada a estas pressupõe-se distribuição uniforme dos ângulos

$$\begin{aligned}\sigma_{\eta}^0 &= w + \lambda_o^0 = 55,2_{(4 \times 1)} \\ \sigma_{\rho}^0 &= w - \lambda_o^0 = 54,8_{(4 \times 1)}\end{aligned}$$

O parâmetro de barreira μ , que deverá tender a zero no final do processo iterativo, foi inicializado com um valor alto o suficiente para não comprometer a convergência nas iterações iniciais:

$$\mu^0 = 50$$

Após a montagem do problema e definição dos valores iniciais, é executado o método primal-dual de pontos interiores, Algoritmo 1, que convergiu após 9 iterações. Esta etapa corresponde ao item 1 do Algoritmo 2, que inclui as etapas de ajuste da topologia estimada. Cada iteração deste algoritmo completo é denominada CET_ n , onde n indica o número da iteração. A seguir é apresentada a seqüência de execução do Algoritmo 2:

1. Item 2 - Tolerâncias ε_{fluxo_k} e limiar K_{mqp}

O número de iterações obtido foi $k = 9$. Para probabilidade de falso alarme $\alpha = 0,05$ temos:

Estado	ε_{fluxo_k}
t_{24}	0,0146671
t_{25}	0,000217693
t_{34}	0,000919651
t_{35}	0,0121723

Valor obtido para o limiar K_{mqp} :

$$K_{mqp} = 3,841$$

2. Item 3 - Termos da função objetivo

Parâmetro	Valor
J	65,5933
J_{mqp}	0,316021
J_{mvap}	65,2772

3. Item 4 - Comparação entre a topologia presumida e a topologia estimada

Comparando-se os valores estimados para os fluxos nos ramos chaveáveis e as tolerâncias para estes fluxos, verifica-se que há ajustes a serem feitos na topologia presumida:

Estado	Valor estimado	ε_{fluxo_k}	Status estimado	Status presumido
t_{24}	-0,3919	0,0146671	FECHADO	ABERTO
t_{25}	$-1,745 \cdot 10^{-9}$	0,0002177	ABERTO	ABERTO
t_{34}	$-5,854 \cdot 10^{-8}$	0,0009196	ABERTO	ABERTO
t_{35}	-0,7949	0,0121723	FECHADO	ABERTO

Como neste caso $J_{mqp} < K_{mqp}$, o algoritmo segue para o passo 6.

4. Item 6 - Atualiza matriz H_o : ajuste da topologia presumida para a topologia estimada

Ajustando-se os status estimados para os status presumidos, as restrições operacionais são alteradas para:

$$\begin{aligned}\delta_2 - \delta_4 &= 0 \\ t_{25} &= 0 \\ t_{34} &= 0 \\ \delta_3 - \delta_5 &= 0\end{aligned}$$

E a matriz H_o fica como segue:

$$H_o = \begin{bmatrix} \delta_1 & \delta_2 & \delta_3 & \delta_4 & \delta_5 & t_{24} & t_{25} & t_{34} & t_{35} \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} t_{24} \\ t_{25} \\ t_{34} \\ t_{35} \end{matrix}$$

Após o ajuste da matriz de observação H_o , é realizada uma nova iteração do método de CET.

5. Item 1 - CET_2, nova execução do Algoritmo 1

Com o ajuste da topologia presumida o método convergiu em 8 iterações.

6. Item 2 - Tolerâncias ε_{fluxo_k} e limiar K_{mqp}

Como da CET_1 para a CET_2 ocorreram apenas mudanças internas na matriz H_o , o limiar K_{mqp} não sofre alterações. Abaixo são apresentados os resultados para as tolerâncias ε_{fluxo_k} com probabilidade de falso alarme $\alpha = 0,05$, em que podem ser observadas pequenas alterações com relação aos valores obtidos na Coestimação anterior.

Estado	ε_{fluxo_k} CET_2	ε_{fluxo_k} CET_1
t_{24}	0,0146489	0,0146671
t_{25}	0,000342053	0,000217693
t_{34}	0,000256498	0,000919651
t_{35}	0,0121681	0,0121723

7. Item 3 - Termos da função objetivo

Para facilitar a comparação, são repetidos abaixo os valores da 1ª CET. Pode-se observar um grande decréscimo no valor do termo J_{mvap} .

Parâmetro	Valor CET_2	Valor CET_1
J	0,224595	65,5933
J_{mqp}	0,224588	0,316021
J_{mvap}	$6.88793 \cdot 10^{-6}$	65,2772

8. Item 4 - Ajuste da topologia presumida para a topologia estimada

Comparando-se os valores estimados para os fluxos nos ramos chaveáveis e as tolerâncias para estes fluxos, verifica-se que a topologia presumida ao se iniciar esta etapa do algoritmo coincide com a topologia estimada:

Estado	Valor estimado	ε_{fluxo_k}	Status estimado	Status presumido
t_{24}	-0,3940	0,0146489	FECHADO	FECHADO
t_{25}	$-2,852 \cdot 10^{-8}$	0,0003421	ABERTO	ABERTO
t_{34}	$9,836 \cdot 10^{-9}$	0,0002565	ABERTO	ABERTO
t_{35}	-0,7961	0,0121681	FECHADO	FECHADO

Como $J_{mqp} < K_{mqp}$, e não há ajustes de topologia a serem feitos, o algoritmo é encerrado, tendo-se como resultado a topologia que melhor se adapta às medidas analógicas disponíveis no problema.

Os valores finais obtidos na CET_2 são mostrados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Resultado final da CET para o sistema com 4 ramos chaveáveis

Estado	Fluxo de potência	Valor estimado
δ_1	0	$1,12 \cdot 10^{-11}$
δ_2	-0,16	-0,1576
δ_3	-0,2	-0,1990
δ_4	-0,16	-0,1576
δ_5	-0,2	-0,1990
t_{24}	-0,4	-0,3940
t_{25}	0	$2,85 \cdot 10^{-8}$
t_{34}	0	$9,84 \cdot 10^{-9}$
t_{35}	-0,8	-0,7961

Parâmetro	Valor
J	0,2246
J_{mqp}	0,2246
J_{mvap}	$6,89 \cdot 10^{-6}$
μ	$7,12 \cdot 10^{-8}$

A Tabela 3.3 ilustra o cumprimento das condições de KKT ao final do processo iterativo. Pode-se observar pela análise das colunas 2 e 3 a evolução do resultado dos produtos $\eta_i \sigma_{\eta_i}$ e $\rho_i \sigma_{\rho_i}$, que determinam o decréscimo do parâmetro de barreira μ . O teste de convergência é feito com o maior dentre os produtos citados, o que justifica a utilização da norma infinita $\|\cdot\|_\infty$.

Para este sistema e condições iniciais em particular, os passos de atualização das variáveis primais e duais, α_p e α_d , foram iguais à unidade em todas as iterações, para a CET_2.

Tabela 3.3: Convergência do processo iterativo para tolerância $\delta = 1.10^{-6}$

k	$\ p^{-1}p^k - H^T \lambda^k\ _2$	$\ D_{\eta}^k \sigma_{\eta}^k\ _{\infty}$	$\ D_{\rho}^k \sigma_{\rho}^k\ _{\infty}$	$\ z_m - H_m x^k - R_m \lambda_m^k\ _2$	$\ H_s x^k\ _2$	$\ H_o x^k + \eta^k - \rho^k\ _2$
0	0	0	0	1,6848	0	0
1	$3,3346 \cdot 10^{-12}$	49,801	82,141	0,00084241	$6,21 \cdot 10^{-7}$	$1,0866 \cdot 10^{-6}$
2	$3,8657 \cdot 10^{-14}$	5,0194	7,915	$4,212 \cdot 10^{-7}$	$6,07 \cdot 10^{-8}$	$1,0664 \cdot 10^{-7}$
3	$2,8864 \cdot 10^{-14}$	0,50438	0,7376	$2,106 \cdot 10^{-10}$	$4,88 \cdot 10^{-8}$	$8,538 \cdot 10^{-8}$
4	$1,9514 \cdot 10^{-14}$	0,054863	0,05069	$1,0589 \cdot 10^{-13}$	$8,84 \cdot 10^{-9}$	$1,8291 \cdot 10^{-8}$
5	$2,9407 \cdot 10^{-14}$	0,011345	0,00509	$4,9606 \cdot 10^{-15}$	$6,63 \cdot 10^{-8}$	$1,306 \cdot 10^{-7}$
6	$9,0695 \cdot 10^{-15}$	0,0013561	0,00058	$2,3322 \cdot 10^{-15}$	$2,92 \cdot 10^{-8}$	$4,1667 \cdot 10^{-8}$
7	$1,3682 \cdot 10^{-14}$	$8,89 \cdot 10^{-5}$	$6,97 \cdot 10^{-5}$	$3,7328 \cdot 10^{-16}$	$5,43 \cdot 10^{-9}$	$2,479 \cdot 10^{-9}$
8	$3,7461 \cdot 10^{-14}$	$7,16 \cdot 10^{-6}$	$7,09 \cdot 10^{-6}$	$1,4921 \cdot 10^{-16}$	$3,10 \cdot 10^{-10}$	$1,8788 \cdot 10^{-10}$
9	$2,0028 \cdot 10^{-14}$	$7,12 \cdot 10^{-7}$	$7,12 \cdot 10^{-7}$	$1,4895 \cdot 10^{-16}$	$1,93 \cdot 10^{-11}$	$2,1968 \cdot 10^{-11}$

3.7 Conclusões

Este capítulo introduz o Método de Coestimação de Estados e Topologia. Verifica-se que os objetivos propostos pelo método de CET são plenamente atingidos com a utilização da modelagem DC da rede elétrica. O desenvolvimento do Método Primal-Dual de Pontos Interiores para a resolução do problema é mostrado em detalhes, bem como o algoritmo para a determinação da topologia estimada.

O método implementado em MATLAB apresenta boas características de convergência, como fica demonstrado no exemplo ilustrativo. A capacidade de rejeição automática de erros do termo MVAP, aproveitada no algoritmo para o ajuste da topologia, dispensa a necessidade de análise de outras informações disponíveis como subproduto do método primal-dual de pontos interiores, como por exemplo os multiplicadores de Lagrange associados às restrições operacionais e o valor do termo J_{mvap} . Apesar destas informações não serem utilizadas neste trabalho, elas podem ser úteis em futuros estudos que utilizem o método de CET.

4 RESULTADOS DE SIMULAÇÕES

4.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados das simulações do método de CET para dois sistemas. O primeiro é o sistema IEEE de 24 barras e o segundo é um sistema de 55 barras da Companhia Paranaense de Energia - COPEL, no qual a subestação Umbará (UMB) é modelada no nível de seção de barra. Para a geração das medidas simuladas foram superpostos erros aleatórios com distribuição normal aos resultados convergidos de estudos de fluxo de potência. Nas Seções 4.4 e 4.5 são apresentados comentários e discussões.

4.2 Sistema IEEE de 24 barras

Os dados do sistema IEEE de 24 barras podem ser encontrados nos artigos (IEEE RTS SUBCOMMITTEE, 1979) e (BILLINTON; VOHRA; KUMAR, 1985). Como já antecipado na Seção 3.2, um modelo linear (“DC”) é utilizado para o sistema. Por conta deste fato, o compensador síncrono da barra 14 foi substituído por um pequeno gerador. O sistema IEEE 24 barras é apresentado na Figura 4.1.

Para testar a capacidade de recuperação de erros do estimador proposto, são considerados os seguintes erros de topologia:

- *Inclusão*: quando uma linha de transmissão é incluída erroneamente no modelo do sistema;
- *Exclusão*: quando uma linha de transmissão é excluída erroneamente do modelo do sistema, considerando-se que isto pode ocorrer devido à informações incorretas sobre o status de um ou mais disjuntores;
- *By-pass*: quando o erro de topologia leva à interconexão indevida de dois circuitos de transmissão incidentes em uma subestação, de tal forma a ignorar as demais conexões existentes na subestação.

Com o intuito de melhor ilustrar os resultados e a título comparativo, foram realizadas exatamente as mesmas simulações apresentadas em (LOURENÇO; SIMÕES COSTA; CLEMENTS, 2004), referência que utiliza um estimador de estados generalizado de mínimos quadrados dotado de um procedimento para identificação de erros de topologia. Além disto, foi incluída a situação em

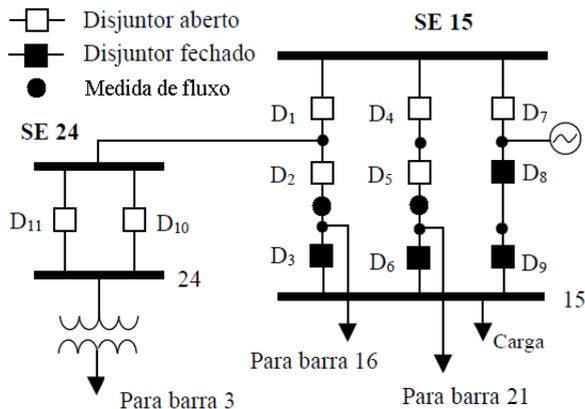


Figura 4.2: Região suspeita da rede para o Caso A

que não há conhecimento nenhum acerca dos status dos ramos chaveáveis e a partida do algoritmo iterativo consiste no “*flat start*” de topologia, isto é, considera-se inicialmente que todos os ramos chaveáveis estão abertos.

Para a execução das simulações são considerados dois casos distintos, Caso A e Caso B. Para o Caso A a zona de anomalia é composta pelas subestações 15 e 24 da Figura 4.1, e para o Caso B a zona de anomalia é composta pelas subestações 14 e 16. As Figuras 4.2 e 4.3 mostram as regiões suspeitas da rede modeladas no nível de seção de barra, inclusive a representação dos status corretos dos ramos chaveáveis e as medições de fluxo de potência através destes para os casos A e B, respectivamente.

Os resultados da aplicação do método de CET ao sistema IEEE de 24 barras, Casos A e B, com a topologia presumida igual à topologia correta são apresentados na Tabela 4.1 abaixo. Para ambos os casos, foi necessária apenas uma CET para validar a topologia presumida.

Tabela 4.1: Resultados da aplicação do método de CET ao sistema IEEE de 24 barras - sem erros de topologia

Casos	J	J_{mqp}	J_{mvap}	Iterações MPDPI	Tempo de execução (s)
A	6,752	6,531	0,221	10	0,250
B	4,857	4,481	0,376	10	0,234

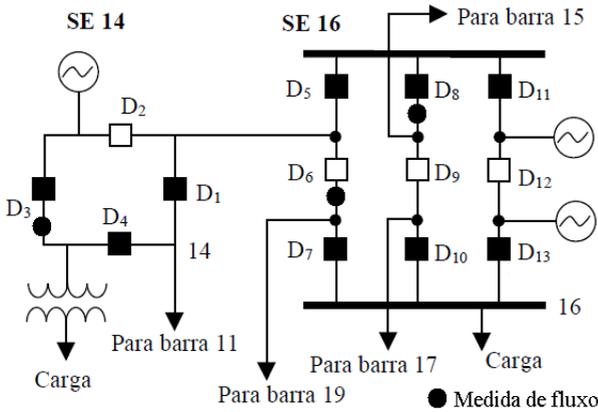


Figura 4.3: Região suspeita da rede para o Caso B

Os erros de topologia simulados para os Casos A e B são apresentados na Tabela 4.2, onde “0” representa disjuntor aberto e “1” representa disjuntor fechado.

4.2.1 Resultados - Caso A

Neste caso a zona de anomalia, ou região suspeita da rede, determinada mediante estimação de estados no nível barra-ramo executada previamente, é composta pelas subestações 15 e 24 da Figura 4.1, que são modeladas no nível de seção de barra conforme Figura 4.2. De acordo com a Tabela 4.2, são simulados separadamente os erros de *Exclusão Simples* (Caso A1), em que o status incorreto do disjuntor D_6 tira de operação a linha que liga as subestações 15 e 21 e o erro de *Inclusão* (Caso A2), em que os status incorretos dos disjuntores D_1 , D_7 e D_{10} incluem no modelo a linha entre as subestações 15 e 24, que na verdade está fora de operação.

O resultado da aplicação do Algoritmo 1, descrito na Seção 3.3, para o Caso A1 é apresentado na Tabela 4.3. As duas primeiras linhas da tabela indicam os status corretos e presumidos para os ramos chaveáveis. Os status presumidos incorretamente estão destacados em *itálico*. As demais linhas apresentam o resultado dos status estimados ao final de cada iteração, obtidos após a execução completa do método de CET. Os status estimados em uma iteração determinam os status presumidos da iteração seguinte. As diferenças entre os status presumidos e estimados estão destacadas em *negrito*. Para o

Tabela 4.2: Erros de topologia - Casos A e B

Caso	Erro simulado	Disj.	Status correto	Status simulado
A1	Exclusão	D_6	1	0
A2	Inclusão	D_1	0	1
		D_7	0	1
		D_{10}	0	1
B1	<i>By-Pass</i>	D_8	1	0
		D_9	0	1
		D_{10}	1	0
B2	Exclusão	D_1	1	0
		D_5	1	0

Tabela 4.3: Resultados - Caso A1

	Ramos chaveáveis
Status	D6
Correto	1
Presumido	0
Iteração 1	1
Iteração 2	1

caso A1, conforme se verifica na Tabela 4.3, já na segunda iteração não há diferenças entre os status presumidos e estimados, de modo que o processo é encerrado e a topologia correta obtida nesta iteração. Observar que apenas os ramos chaveáveis que tiveram seus status alterados ao longo do processo iterativo são apresentados: os demais permaneceram inalterados.

Os resultados para o Caso A2 são apresentados na Tabela 4.4, sendo novamente necessárias somente duas iterações para corrigir os erros de topologia, o que indica a eficiência do estimador MVAP na identificação das restrições operacionais incorretas.

Foi simulada ainda uma terceira situação, em que por algum motivo, como perda de comunicação ou falha nas unidades terminais remotas, não haveria nenhuma informação disponível referente aos status dos disjuntores. O processo foi iniciado considerando-se então todos os status presumidos como abertos e foi feita também uma simulação considerando como condição ini-

Tabela 4.4: Resultados - Caso A2

Status	Ramos chaveáveis		
	D1	D7	D10
Correto	0	0	0
Presumido	1	1	1
Iteração 1	0	0	0
Iteração 2	0	0	0

Tabela 4.5: Resultados Caso A3 - Condição inicial *flat start*

(a) Todos os disjuntores abertos

Status	Ramos Chaveáveis			
	D3	D6	D8	D9
Cor.	1	1	1	1
Pres.	0	0	0	0
Iter. 1	1	1	1	1
Iter. 2	1	1	1	1

(b) Todos os disjuntores fechados

Status	Ramos Chaveáveis					
	D1	D2	D4	D5	D7	D10
Cor.	0	0	0	0	0	0
Pres.	1	1	1	1	1	1
Iter. 1	0	0	0	0	0	0
Iter. 2	0	0	0	0	0	0

cial todos os status presumidos como fechados. Os resultados são apresentados na Tabela 4.5, em que apenas os ramos chaveáveis que tiveram o status alterados são apresentados. Pode-se observar que a configuração correta foi obtida em duas iterações. Com efeito, para o sistema apresentado o método de coestimção é capaz de encontrar a topologia correta para qualquer combinação de status presumidos para os disjuntores.

4.2.2 Resultados - Caso B

Neste caso a região suspeita da rede é composta pelas subestações 14 e 16 da Figura 4.1, que são modeladas no nível de seção de barra conforme Figura 4.3. De acordo com a Tabela 4.2, são simulados os erros de *By-Pass* (Caso B1), em que o status incorreto dos disjuntores D_8 , D_9 e D_{10} causa um *by-pass* errôneo na subestação 16, e o erro de *Exclusão Múltiplo* (Caso B2), em que os status incorretos dos disjuntores D_1 e D_5 excluem do modelo a linha de transmissão entre as subestações 14 e 16, que na verdade está em operação.

Tabela 4.6: Resultados - Casos B1 e B2

Status	Ramos chaveáveis			Status	Ramos chaveáveis	
	D8	D9	D10		D1	D5
Correto	1	0	1	Correto	1	1
Presumido	0	1	0	Presumido	0	0
Iteração 1	1	0	1	Iteração 1	1	1
Iteração 2	1	0	1	Iteração 2	1	1

(a) Caso B1

(b) Caso B2

Tabela 4.7: Resultados Caso B3 - Condição inicial *flat start* “todos abertos”

Status	Ramos chaveáveis								
	D1	D3	D4	D5	D7	D8	D10	D11	D13
Correto	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Presumido	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Iteração 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Iteração 2	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Os resultados para os casos B1 e B2 são apresentados na Tabela 4.6. O resultado para a condição inicial “todos abertos” é apresentado na Tabela 4.7, em que apenas os ramos chaveáveis que tiveram os status alterados são apresentados. O método foi capaz de estimar a topologia já na segunda coestimização para todos os casos, determinando a topologia correta. É interessante observar que em nenhuma situação houve uma identificação incorreta dos status dos disjuntores e novamente o método é capaz de encontrar a topologia correta para qualquer configuração de status presumidos para os ramos chaveáveis.

4.2.3 Resultados numéricos

A Tabela 4.8 apresenta os valores numéricos da função objetivo e suas componentes MQP e MVAP para as coestimizações inicial e final para os Casos A e B apresentados anteriormente. Observa-se que em todos os casos o valores do termo MVAP diminui significativamente da coestimização inicial para a final. Na coestimização final os valores são bem pequenos para ambos os casos

e o valor do termo MQP é sempre bem inferior ao limiar K_{mqp} . Além disso, observa-se que o resultado da coestimação final é igual entre os casos A1, A2 e A3 e também entre os casos B1, B2 e B3, conforme o esperado.

Tabela 4.8: Componentes da função objetivo com e sem erros de topologia

(a) Coestimação inicial				(b) Coestimação final			
Caso	J	J_{mqp}	J_{mvap}	Casos	J	J_{mqp}	J_{mvap}
A1	117,834	6,541	111,293	A	6,752	6,531	0,221
A2	29,45	6,441	23,009	B	4,857	4,481	0,376
A3 a)	319,556	6,812	312,774				
A3 b)	29,152	6,299	22,853				
B1	162,495	4,475	158,02				
B2	227,87	4,467	223,401				
B3	564,467	5,277	559,369				

4.3 Sistema COPEL

O sistema COPEL de 55 barras apresentado na Figura 4.4 corresponde a uma parte da rede de 230 kV - 69 kV da região metropolitana da cidade de Curitiba, no Paraná. Neste caso a zona de anomalia é formada pela subestação Umbará, representada pelo número 55 na figura. Este sistema foi previamente utilizado em (LOURENÇO et al., 2010) para estudo de fluxo de potência em redes modeladas no nível de seção de barras. Os parâmetros do sistema são apresentados no Anexo 1. O plano de medição utilizado é composto de uma medida de injeção de potência em cada barra e uma medida de fluxo de potência em um dos extremos de cada linha de transmissão, que é uma configuração mais pobre do que a real.

O modelo do sistema com a subestação Umbará modelada no nível de seção de barra passa a ter 71 nós elétricos, conforme apresentado na Figura 4.5. A subestação possui duas barras principais, barras 55 e 56, e uma barra de transferência de número 57. A condição operativa normal da SE UMB é com as barras principais interligadas através do ramo chaveável B29. Os pares de ramos chaveáveis B7 e B4, B28 e B27, B12 e B13, B18 e B19, B25 e B24 são compostos por chaves seccionadoras e os dois componentes de um par nunca estarão fechadas ao mesmo tempo. Esta informação, apesar

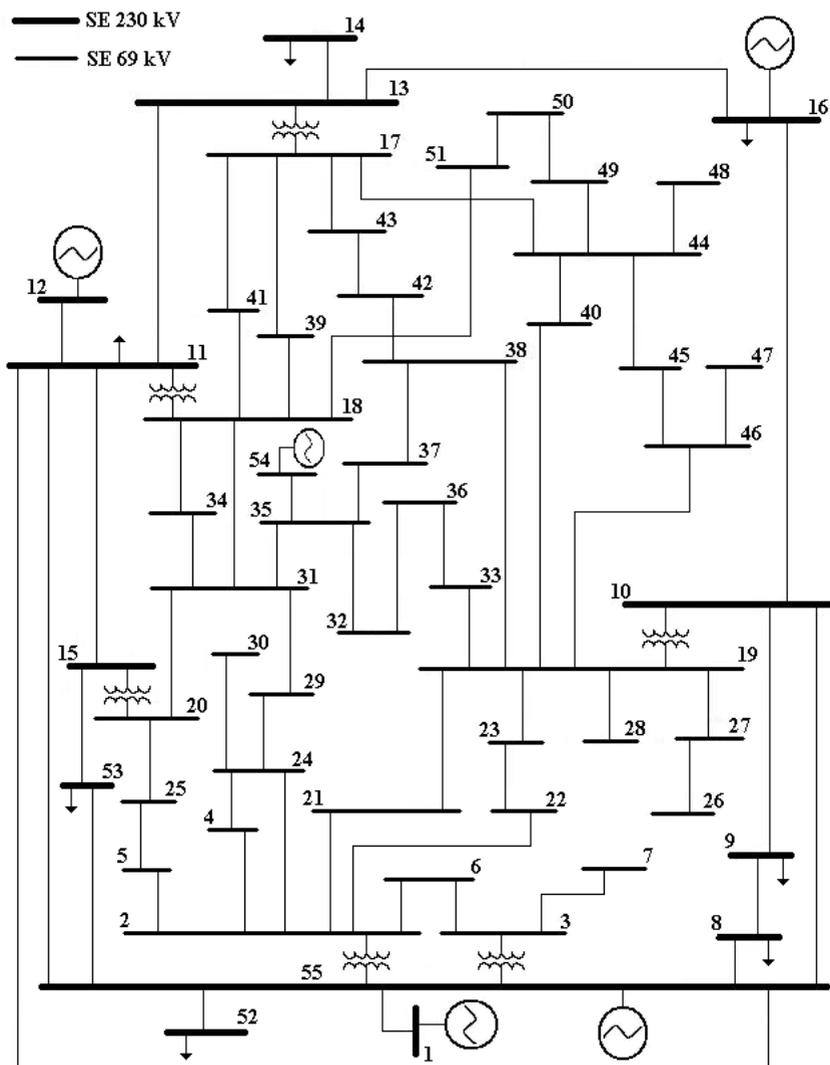


Figura 4.4: Sistema COPEL de 55 barras

de disponível, não é utilizada na resolução do problema. Para cada saída de linha, o ramo superior é o circuito de transferência. Na Figura 4.5 estão representadas todas as medidas de fluxo reais disponíveis, porém não estão representadas as medidas de injeção de potência, disponíveis nas barras 55, 56 e 60.

Observar que o plano de medição real mostrado na Figura 4.5 permite a existência de *loop flows* não monitorados entre as barras 55 e 56. Para contornar este problema, foram inseridas medidas nos ramos chaveáveis B4, B12, B19 e B25, tendo por base a informação de que apenas um dos ramos que compõem cada par pode estar fechado. Sem este procedimento, não há garantia de que os status serão estimados corretamente. Com efeito, foram realizados testes sem a eliminação dos *loop flows* não monitorados e verificou-se que o método não é capaz de encontrar a solução exata na presença de múltiplos erros nos status presumidos para os ramos chaveáveis, como a condição inicial “*flat start*” de topologia. Deve-se ressaltar entretanto que a incerteza em relação aos status estimados restringe-se àqueles que compõem o *loop flow* não monitorado.

Os resultados da aplicação do método de CET ao sistema COPEL com a topologia presumida igual à topologia correta são apresentados na Tabela 4.9 abaixo, sendo necessária apenas uma CET para validar a topologia presumida.

Tabela 4.9: Resultados da aplicação do método de CET ao sistema COPEL - sem erros de topologia

J	J_{mqp}	J_{mvap}	Iterações MPDPI	Tempo de execução (s)
27,947	26,062	1,885	11	1,375

Serão apresentados os resultados das simulações para as seguintes situações:

- Erro no status do disjuntor interligador de barra: o disjuntor B29 é considerado erroneamente aberto, eliminando a conexão entre as barras 55 e 56. Para este caso o método de CET foi capaz de estimar a topologia em duas iterações, conforme ilustrado na Tabela 4.10.
- Condição inicial *flat start*, em que todos os ramos chaveáveis são considerados abertos. Novamente o método de CET foi capaz de identificar a configuração correta em duas iterações, mostrando que a formulação proposta é robusta, sendo capaz de encontrar a solução para um

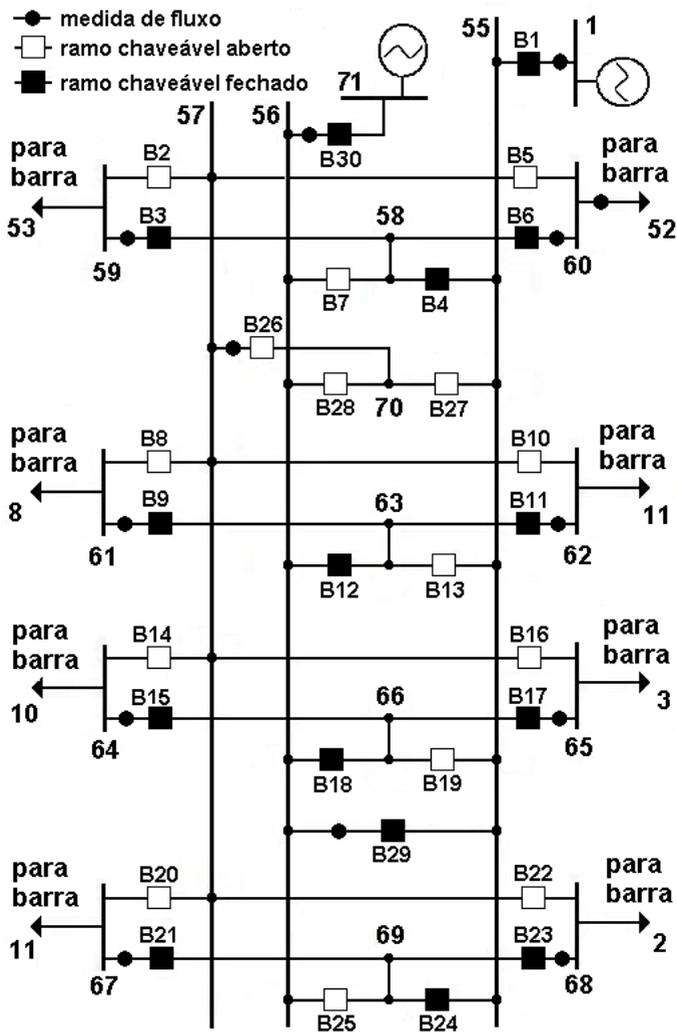


Figura 4.5: Subestação UMB 230 kV modelada no nível de seção de barra

problema com grande número de ramos chaveáveis com a topologia presumida bem diferente da configuração real. Deve-se ressaltar que o tempo de processamento é praticamente o mesmo que o encontrado no caso anterior, em que o status presumido de apenas um ramo chaveável é errôneo. Os resultados são apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.10: Sistema COPEL - Resultado da CET para erro no disjuntor interligador de barra

	Ramos chaveáveis
Status	B29
Correto	1
Presumido	0
Iteração 1	1
Iteração 2	1

Tabela 4.11: Sistema COPEL - Resultado da CET para a condição inicial *flat start* “todos abertos”

	Ramos chaveáveis - Bx														
Status	1	3	4	6	9	11	12	15	17	18	21	23	24	29	30
Cor.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Pres.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Iter. 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Iter. 2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Os valores numéricos encontrados estão compilados na Tabela 4.12, em que pode ser observado o decréscimo do termo J ao final do processo iterativo. No caso com a inicialização “todos abertos” houve um grande aumento no valor do termo J_{mvap} . Para este sistema, o valor estabelecido para o limiar K_{mqp} foi de 108,65, muito superior ao obtido para o termo J_{mqp} em ambos os casos, indicando que não há erros em medidas analógicas.

Tabela 4.12: Sistema COPEL - Componentes da função objetivo com e sem erros de topologia

(a) Coestimação inicial				(b) Coestimação final		
Caso	J	J_{mqp}	J_{mvap}	J	J_{mqp}	J_{mvap}
B29	56,597	26,143	30,454	27,947	26,062	1,885
FLAT	688,206	28,10	660,106			

4.4 Desempenho do Método de Coestimação

4.4.1 Comparação dos resultados

Considerando-se a eficácia na detecção e identificação de erros de topologia, foram obtidos os mesmos resultados encontrados em (LOURENÇO; SIMÕES COSTA; CLEMENTS, 2004). O método de coestimação apresenta, entretanto, algumas vantagens em relação aos métodos tradicionais, advindas do fato de ser baseado em um critério multi-objetivo. São elas:

- a) Conforme observado para os casos com a condição inicial *flat start*, o desempenho do método parece não ser afetado pelo número de erros de topologia. Esta característica é desejável em aplicações de tempo real.
- b) O método é robusto pois, garantidas as condições de observabilidade, é capaz de encontrar a topologia correta quaisquer que sejam as condições iniciais de topologia. Garantir a observabilidade topológica implica na eliminação de laços de impedância nula não monitorados, o que é realizado com a inserção de medidas de fluxo em pelo menos um dos ramos chaveáveis que compõem o laço.

4.4.2 Desempenho computacional

O algoritmo do método primal-dual de pontos interiores convergiu entre 9 e 12 iterações para todos os casos, com e sem erros de topologia, levando menos de 2,8 segundos na execução de todo o processo de CET para o caso do sistema COPEL com condição inicial “*flat start*” de topologia, que foi o caso que demandou maior tempo de execução. Para o sistema IEEE de 24 barras, o maior tempo de processamento foi de 0,438 segundos, também para a condição inicial “*flat start*” de topologia. O método foi implementado no software

MATLAB em um computador pessoal (processador Intel Core 2 Duo) com clock de 2.0 GHz.

O maior esforço computacional deve-se à solução do sistema linear da Equação (3.12). Porém, como é utilizado o modelo DC da rede e a região suspeita a ser modelada no nível de seção de barra é sempre de dimensão reduzida, envolvendo apenas algumas subestações, o tamanho do sistema não é considerado um problema para o desempenho do método. Este é mais um fator favorável à utilização do método em aplicações que necessitam da modelagem da rede em tempo real.

4.5 Conclusões

A aplicação do método de CET ao sistema da COPEL mostra a potencialidade da formulação proposta para aplicações em sistemas reais, tanto do ponto de vista do tempo de processamento como do ponto de vista da capacidade do método em estimar a topologia que melhor se adapta às medidas disponíveis, independentemente dos status presumidos para os ramos chaveáveis.

Observa-se que há situações reais sujeitas à ocorrência de *loop flows* e devem ser tomadas medidas adicionais para a inclusão de medidas/pseudomedidas que garantam a observabilidade do sistema do ponto de vista topológico. Satisfeita esta condição, os resultados obtidos indicam que o método é capaz de encontrar a topologia correta para qualquer situação que envolva apenas erros de topologia. Os tempos de processamento obtidos foram satisfatórios e podem ser melhorados com a aplicação de técnicas mais sofisticadas de manipulação de matrizes.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

A Estimação de Estados em Sistemas de Potência apresenta grande relevância nos dias atuais por fornecer, com alto grau de confiabilidade, informações necessárias à operação segura dos sistemas elétricos de potência. Praticamente todos os centros de operação da atualidade possuem um estimador de estados implementado.

Para o bom funcionamento do EESP, além de um plano de medição que garanta a observabilidade do sistema, é necessário que tanto os dados topológicos da rede quanto o banco de dados *offline* de parâmetros sejam confiáveis. Conforme descrito anteriormente neste trabalho, informações incorretas sobre a topologia do sistema comprometem a etapa de processamento de erros do estimador de estados convencional. Uma vez identificada esta condição, podem ser aplicadas técnicas de estimação de estados generalizada para a determinação da topologia correta.

O método de CET proposto nesta dissertação de mestrado insere-se neste contexto, apresentando porém um diferencial em relação aos métodos ditos tradicionais, uma vez que os status dos ramos chaveáveis são modelados como parte integrante da função custo do problema, sendo portanto estimados diretamente. A modelagem proposta consiste de uma função custo multi-objetivo, com a utilização do critério dos mínimos quadrados ponderados para a representação dos resíduos de estimação e do critério dos mínimos valores absolutos ponderados para a representação das restrições operacionais do problema, que representam os status dos ramos chaveáveis.

Partindo desta ideia inicial, foi elaborada e desenvolvida a formulação do problema, tendo sido cunhada a expressão “coestimação” para representar com mais exatidão a abordagem proposta. Nesta etapa foram equacionadas várias questões inerentes ao problema, tais como: 1) determinação de um critério para o cálculo dos pesos associados às restrições operacionais, 2) estudo e definição da necessidade da utilização de informações *a priori* para eliminar preocupações com a perda da observabilidade do problema nas mudanças da topologia presumida, além de melhorar a estabilidade numérica do problema, e 3) necessidade de garantir a não-negatividade das variáveis auxiliares η e ρ .

Após a formulação do problema, aplicou-se o método primal-dual de pontos interiores para a sua resolução, sendo feitas as adaptações necessárias para uma adequação às características deste problema de CET em particular.

Nesta etapa foram definidas as variáveis duais auxiliares σ_η e σ_ρ , utilizadas posteriormente - em conjunto com as variáveis primais η e ρ - para o cálculo dos passos de atualização do problema e também para o cálculo do decréscimo do parâmetro de barreira μ a cada iteração. A determinação da tolerância para se concluir se um ramo chaveável está aberto ou fechado foi realizada com a utilização do procedimento sugerido em (CLEMENTS; SIMÕES COSTA, 1998).

Para a determinação da topologia estimada foi elaborado um algoritmo para a operacionalização de sucessivas iterações do método proposto, garantindo assim o ajuste da topologia presumida com a estimada. Na prática verifica-se entretanto que, para os sistemas utilizados e com os parâmetros do problema bem ajustados, são necessárias apenas duas iterações para a determinação da topologia correta, para qualquer situação inicial de topologia, incluindo as aqui denominadas condições iniciais “*flat start*” de topologia - numa analogia com os problemas de fluxo de potência - em que os ramos chaveáveis são considerados inicialmente todos abertos.

Finalmente, os resultados obtidos para os sistemas-teste IEEE de 24 barras e da COPEL indicam que a formulação multi-objetivo MQP-MVAP denominada Coestimação de Estados e Topologia é capaz de fornecer a topologia que melhor se adapta às medidas analógicas disponíveis, sendo uma alternativa promissora para a validação de modelos em tempo real de sistemas de potência. Como principais atributos do método podem ser destacados a sua robustez, caracterizada pela aplicação da condição inicial “*flat start*” de topologia, e baixo tempo de processamento, pois a complexidade do problema não tende a crescer com o número de ramos chaveáveis modelados.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Tendo em vista que a formulação proposta é nova, procurou-se delimitar a abrangência do estudo e desenvolvimento do método de CET a situações que envolvessem apenas potência ativa e erros de topologia.

Com o desenvolvimento inicial do método de CET bem consolidado, abrem-se novas fronteiras de estudo, sendo que as principais são listadas abaixo:

- Desenvolvimento de um método de CET não linear, que teria aplicação na determinação da entrada e saída em operação de bancos de capacitores e compensadores síncronos;
- Aplicação do método de CET localmente, por subestação;

- Estudo do comportamento do método na ocorrência de erros conjuntos em medidas analógicas e de topologia;
- Investigações adicionais sobre o desempenho do método no caso de alterações em algumas variáveis do problema, como por exemplo: a) critério para determinação dos pesos associados ao termo J_{mvap} e b) utilização de valores obtidos em coestimções anteriores para os estados na determinação das informações *a priori*;
- Estudo da possível utilização das informações disponibilizadas pelo método PDPI;
- Extensão da formulação do problema para inclusão de medidas fasoriais sincronizadas no método de CET.

APÊNDICE A – DADOS DO SISTEMA COPEL DE 55 BARRAS

O sistema da COPEL utilizado neste trabalho é um equivalente reduzido das redes em anel de 230 kV e 69kV da região metropolitana da cidade de Curitiba. Os dados de linha do sistema, já com a subestação Umbará modelada no nível de seção de barra, são apresentados na Tabela A.1.

Tabela A.1: Dados de linha do sistema COPEL

Linha	Barras	R (%)	X (%)	B (%)
1	2 - 68	0,0	18,86	0,0
2	3 - 65	0,0	18,36	0,0
3	2 - 4	0,87	38,7	0,0717
4	2 - 5	2,87	8,37	1,34
5	2 - 6	0,262	0,535	0,081
6	3 - 6	0,24	0,531	0,83
7	3 - 7	32,1	93,6	0,154
8	8 - 61	0,38	1,88	3,629
9	10 - 64	0,7	3,38	6,525
10	8 - 9	3,5	1,68	3,23
11	9 - 10	0,23	1,1	2,12
12	11 - 62	0,2	1,0	2,0
13	11 - 12	0,27	1,61	3,18
14	11 - 13	0,34	1,64	3,16
15	13 - 14	0,41	2,05	3,729
16	13 - 16	1,27	6,38	11,17
17	10 - 16	1,48	7,56	13,268
18	11 - 15	0,26	1,26	2,43
19	13 - 17	0,0	9,0	0,0
20	11 - 18	0,0	20,0	0,0
21	10 - 19	0,0	9,0	0,0
22	15 - 20	0,0	8,92	0,0
23	2 - 21	2,4	6,99	0,11
24	19 - 21	3,83	11,13	0,19
25	2 - 22	1,8	5,41	0,1

Tabela A.1: Continuação

Linha	Barras	R (%)	X (%)	B (%)
26	22 - 23	3,75	11,1	1,944
27	19 - 23	1,95	5,69	0,1
28	2 - 24	1,8	7,94	0,155
29	24 - 29	2,11	4,04	0,07
30	24 - 30	1,36	2,6	0,461
31	4 - 24	0,95	4,16	0,848
32	5 - 25	0,41	1,19	0,019
33	20 - 25	0,27	0,83	0,013
34	26 - 27	14,43	42,42	0,8
35	19 - 27	1,17	5,5	0,891
36	19 - 28	1,78	5,36	0,861
37	29 - 31	4,08	8,21	0,151
38	31 - 34	1,46	4,23	0,0725
39	18 - 31	2,03	6,26	0,0953
40	31 - 35	0,335	1,945	0,031
41	20 - 31	0,915	2,82	0,0429
42	32 - 35	0,58	0,292	0,0662
43	32 - 36	0,63	2,77	0,655
44	19 - 33	0,66	3,02	0,848
45	33 - 36	0,31	1,4	0,39
46	18 - 34	0,58	1,64	0,0286
47	35 - 37	0,65	3,17	0,0781
48	37 - 38	0,57	2,74	0,0686
49	19 - 38	0,1045	0,349	0,065
50	17 - 39	0,201	0,67	0,1416
51	18 - 39	3,64	12,28	0,2357
52	19 - 40	1,9	5,51	0,0944
53	18 - 41	3,24	11,11	0,2127
54	17 - 41	1,79	6,41	0,143
55	38 - 42	0,44	2,13	0,0533
56	42 - 43	0,66	3,25	0,08

Tabela A.1: Continuação

Linha	Barras	R (%)	X (%)	B (%)
57	17 - 43	0,89	2,485	0,0569
58	17 - 44	1,42	4,385	0,067
59	40 - 44	2,84	8,77	0,134
60	44 - 45	2,84	8,77	0,134
61	45 - 46	0,2	0,59	0,01
62	46 - 47	1,07	2,8	0,08
63	19 - 46	1,07	4,92	0,08
64	44 - 48	4,11	1,19	2,317
65	44 - 49	2,29	4,61	0,08
66	49 - 50	0,568	11,45	0,1859
67	50 - 51	7,79	15,65	0,248
68	52 - 60	0,24	1,42	2,84
69	15 - 53	0,2	1,13	2,25
70	53 - 59	0,2	1,13	2,25
71	11 - 67	0,51	2,62	4,54
72	35 - 54	15,0	27,0	0,4
73	18 - 51	14,0	28,0	0,4

REFERÊNCIAS

- ABUR, A.; GÓMEZ EXPÓSITO, A. *Power System State Estimation Theory and Implementation*. New York, EUA: Marcel Dekker, Inc, 2004.
- ABUR, A.; KIM, H.; CELIK, M. Identifying the unknown circuit breaker statuses in power networks. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 10, n. 4, p. 2029–2037, nov 1995. ISSN 0885-8950.
- ADBY, P. R.; DEMPSTER, M. A. H. *Introduction to Optimization Methods*. 1a. ed. Londres: Chapman and Hall, 1974.
- ALSAC, O. et al. Generalized state estimation. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 13, n. 3, p. 1069–1075, ago. 1998. ISSN 0885-8950.
- BAGCHI, A. et al. A comparison of algorithms for least absolute value state estimation electric power networks. *Circuits and Systems, 1994. IS-CAS '94., 1994 IEEE International Symposium on*, v. 6, p. 53–56 vol.6, Maio-2 Junho 1994.
- BILLINTON, R.; VOHRA, P.; KUMAR, S. Effect of station originated outages in a composite system adequacy evaluation of the ieee reliability test system. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, PAS-104, n. 10, p. 2649–2656, 1985. ISSN 0018-9510.
- BOSE, A.; CLEMENTS, K. Real-time modeling of power networks. *Proceedings of the IEEE*, v. 75, n. 12, p. 1607–1622, Dec. 1987. ISSN 0018-9219.
- CARO, E.; CONEJO, A.; ABUR, A. Breaker status identification. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 25, n. 2, p. 694–702, may 2010. ISSN 0885-8950.
- CELIK, M.; ABUR, A. A robust wlav state estimator using transformations. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 7, n. 1, p. 106–113, fev. 1992. ISSN 0885-8950.
- CLEMENTS, K. Robust state estimation for the restructured electric power environment. *X SEPOPE, Florianópolis*, Maio 2006.
- CLEMENTS, K.; DAVIS, P. Detection and identification of topology errors in electric power systems. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 3, n. 4, p. 1748–1753, nov. 1988. ISSN 0885-8950.

- CLEMENTS, K.; SIMÕES COSTA, A. Topology error identification using normalized lagrange multipliers. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 13, n. 2, p. 347–353, May 1998. ISSN 0885-8950.
- COUTTO FILHO, M.; SILVA, A. da; FALCÃO, D. Bibliography on power system state estimation (1968-1989). *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 5, n. 3, p. 950–961, Aug 1990. ISSN 0885-8950.
- FALCÃO, D.; ASSIS, S. de. Linear programming state estimation: error analysis and gross error identification. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 3, n. 3, p. 809–815, Agosto 1988. ISSN 0885-8950.
- GJELSVIK, A.; AAM, S.; HOLTEN, L. Hachtel's augmented matrix method - a rapid method improving numerical stability in power system static state estimation. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, PAS-104, n. 11, p. 2987–2993, nov. 1985. ISSN 0018-9510.
- HANDSCHIN, E. et al. Bad data analysis for power system state estimation. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, v. 94, n. 2, p. 329–337, Mar 1975. ISSN 0018-9510.
- HASSAINE, Y. et al. Identification of the topology of power system networks based on past history and mixed integer inequalities. In: *Power Tech, 2005 IEEE Russia*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 1–6.
- HOLTEN, L. et al. Comparison of different methods for state estimation. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 3, n. 4, p. 1798–1806, Nov 1988. ISSN 0885-8950.
- IEEE RTS SUBCOMMITTEE. IEEE reliability test system. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, PAS-98, n. 6, p. 2047–2054, 1979. ISSN 0018-9510.
- IRVING, M.; OWEN, R.; STERLING, M. Power-system state estimation using linear programming. *Electrical Engineers, Proceedings of the Institution of*, v. 125, n. 9, p. 879–885, september 1978. ISSN 0020-3270.
- IRVING, M.; STERLING, M. Substation data validation. *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings C*, v. 129, n. 3, p. 119–122, may. 1982. ISSN 0143-7046.

- KOTIUGA, W.; VIDYASAGAR, M. Bad data rejection properties of weighted least absolute value techniques applied to static state estimation. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, PAS-101, n. 4, p. 844–853, abril 1982. ISSN 0018-9510.
- LOURENÇO, E. et al. Fluxo de carga desacoplado rápido em redes modeladas no nível de seção de barra. In: *SBSE, 2010 - III Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*. [S.l.: s.n.], 2010.
- LOURENÇO, E.; SIMÕES COSTA, A.; CLEMENTS, K. Bayesian-based hypothesis testing for topology error identification in generalized state estimation. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 19, n. 2, p. 1206–1215, May 2004. ISSN 0885-8950.
- LOURENÇO, E. et al. A topology error identification method directly based on collinearity tests. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 21, n. 4, p. 1920–1929, Nov. 2006. ISSN 0885-8950.
- LOURENÇO, E.; SIMÕES COSTA, A.; RIBEIRO, P. Steady-state solution for power networks modeled at bus section level. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 25, n. 1, p. 10–20, feb. 2010. ISSN 0885-8950.
- LOURENÇO, E. M. *Análise de Observabilidade e Identificação de Erros de Topologia na Estimacao de Estados Generalizada*. Dissertação (Tese de Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.
- LUGTU, R. et al. Power system state estimation: Detection of topological errors. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, PAS-99, n. 6, p. 2406–2412, nov. 1980. ISSN 0018-9510.
- MILI, L. Discussões do artigo (FALCÃO; ASSIS, 1988). *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 3, n. 3, p. 809–815, Agosto 1988. ISSN 0885-8950.
- MILI, L.; PHANIRAJ, V.; ROUSSEEUW, P. Least median of squares estimation in power systems. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 6, n. 2, p. 511–523, May 1991. ISSN 0885-8950.
- MILI, L. et al. A robust estimation method for topology error identification. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 14, n. 4, p. 1469–1476, nov 1999. ISSN 0885-8950.

- MONTICELLI, A. *Fluxo de carga em redes de energia elétrica*. São Paulo, Brasil: Edgard Blucher, 1983.
- MONTICELLI, A. The impact of modeling short circuit branches in state estimation. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 8, n. 1, p. 364–370, feb. 1993. ISSN 0885-8950.
- MONTICELLI, A. Modeling circuit breakers in weighted least squares state estimation. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 8, n. 3, p. 1143–1149, aug. 1993. ISSN 0885-8950.
- MONTICELLI, A. Electric power system state estimation. *Proceedings of the IEEE*, v. 88, n. 2, p. 262–282, Feb 2000. ISSN 0018-9219.
- MONTICELLI, A.; GARCIA, A. Modeling zero impedance branches in power system state estimation. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 6, n. 4, p. 1561–1570, nov 1991. ISSN 0885-8950.
- NOCEDAL, J.; WRIGHT, S. J. *Numerical Optimization*. 1a. ed. New York, USA: Springer, 1999.
- PIRES, R. C.; SIMÕES COSTA, A.; MILI, L. Iteratively reweighted least-squares state estimation through givens rotations. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 14, n. 4, p. 1499–1507, Nov 1999.
- ROSS, S. *A First Course in Probability*. 7a. ed. New Jersey, USA: Pearson Prentice Hall, 2006.
- SCHWEPPE, F.; HANDSCHIN, E. Static state estimation in electric power systems. *Proceedings of the IEEE*, v. 62, n. 7, p. 972–982, July 1974. ISSN 0018-9219.
- SCHWEPPE, F.; WILDES, J. Power system static-state estimation, Parts I, II and III. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, PAS-89, n. 1, p. 120–125, jan. 1970. ISSN 0018-9510.
- SIMÕES COSTA, A.; LEÃO, J. Identification of topology errors in power system state estimation. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 8, n. 4, p. 1531–1538, nov. 1993. ISSN 0885-8950.
- SIMÕES COSTA, A.; LOURENÇO, E.; CLEMENTS, K. Power system topological observability analysis including switching branches. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 17, n. 2, p. 250–256, May 2002. ISSN 0885-8950.

- SIMÕES COSTA, A.; LOURENÇO, E.; COLZANI, L. Reduced anomaly zone determination for topology error processing in generalized state estimation. *Power Tech, 2007 IEEE Lausanne*, p. 137–142, july 2007.
- SIMÕES COSTA, A.; QUINTANA, V. An orthogonal row processing algorithm for power system sequential state estimation. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, PAS-100, n. 8, p. 3791–3800, aug. 1981. ISSN 0018-9510.
- SIMÕES COSTA, A.; QUINTANA, V. A robust numerical technique for power system state estimation. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, PAS-100, n. 2, p. 691–698, 1981. ISSN 0018-9510.
- SINGH, H.; ALVARADO, F. Weighted least absolute value state estimation using interior point methods. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 9, n. 3, p. 1478–1484, Agosto 1994. ISSN 0885-8950.
- SINGH, H.; ALVARADO, F. Network topology determination using least absolute value state estimation. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 10, n. 3, p. 1159–1165, aug 1995. ISSN 0885-8950.
- VEMPATI, N. et al. Topology estimation. In: *Power Engineering Society General Meeting, 2005. IEEE*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 806–810 Vol. 1.
- VEMPATI, N.; SLUTSKER, I.; TINNEY, W. Orthogonal sparse vector methods [power system applications]. In: *Power Industry Computer Application Conference, 1991. Conference Proceedings*. [S.l.: s.n.], 1991. p. 430–436.
- VOSGERAU, F. et al. Coestimação de estados e topologia em sistemas de potência. In: *XVIII Congresso Brasileiro de Automática - CBA 2010*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 59–66.
- VOSGERAU, F. et al. Power system state and topology coestimation. In: *Bulk Power System Dynamics and Control (IREP) - VIII (IREP), 2010 IREP Symposium*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–6.
- WRIGHT, S. J. *Primal-Dual Interior-Point Methods*. USA: SIAM, 1996.
- WU, F.; LIU, W. Detection of topology errors by state estimation [power systems]. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 4, n. 1, p. 176–183, feb. 1989. ISSN 0885-8950.

ZIVANOVIC, R.; CAIRNS, C. Implementation of PMU technology in state estimation: an overview. In: *AFRICON, 1996., IEEE AFRICON 4th.* [S.l.: s.n.], 1996. v. 2, p. 1006 –1011 vol.2.