

ANGELA MARÍA AGUDELO ARBELÁEZ

**IDENTIFICAÇÃO DE TRANSAÇÕES NÃO-REVELADAS
EM AMBIENTE DESREGULAMENTADO**

Florianópolis

2000

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

IDENTIFICAÇÃO DE TRANSAÇÕES NÃO-REVELADAS
EM AMBIENTE DESREGULAMENTADO

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

ANGELA MARÍA AGUDELO ARBELÁEZ.

Florianópolis, fevereiro de 2000.

IDENTIFICAÇÃO DE TRANSAÇÕES NÃO-REVELADAS EM AMBIENTE DESREGULAMENTADO

ANGELA MARÍA AGUDELO ARBELÁEZ.

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



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

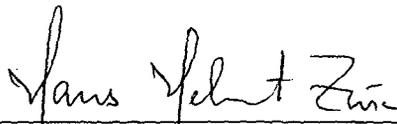


Prof. Ildemar Cassana Decker, D.Sc.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

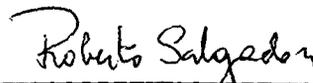
Banca Examinadora:



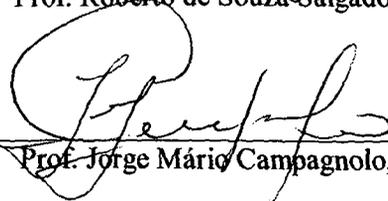
Prof. Antonio José Alves Simões Costa, Ph.D.
Orientador



Prof. Hans Helmut Zürn, Ph.D.



Prof. Roberto de Souza Salgado, Ph.D.



Prof. Jorge Mário Campagnolo, D.Sc.

Aos meus pais Betty e Nestor pelo
amor e dedicação que sempre
demonstraram por mim.

A Sergio pelo apoio, compreensão e
dedicação durante estes dois anos.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Antonio José Alves Simões Costa pela excelente orientação, amizade e confiança depositadas em mim durante a realização deste trabalho.

Ao Prof. Kevin Clements pelas sugestões dadas durante a realização deste trabalho, que muito contribuíram para o sucesso do mesmo.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFSC por compartilhar seus valiosos conhecimentos, especialmente ao Prof. Hans, Salgado, Campagnolo, Ildemar, e Katia.

Ao Laboratório de Sistemas de Potência (LABSPOT) pelo apoio técnico e infraestrutura.

A minha grande amiga e colega Elizete que com seu apoio sempre facilitou meu rendimento em todos os aspectos.

A Lurdes pela sua colaboração, amor e amizade, que me deram força nos momentos mais difíceis.

A Aleja pela sua amizade incondicional e colaboração na escrita desta dissertação.

A todos os amigos e colegas do LABSPOT pelos belos momentos “compartidos”.

Ao Centro de Excelência em Regulação de Mercados de energia Elétrica, CERME e à ANEEL pelo apoio financeiro.

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

IDENTIFICAÇÃO DE TRANSAÇÕES NÃO REVELADAS EM AMBIENTE DESREGULAMENTADO

ANGELA MARÍA AGUDELO ARBELÁEZ

Fevereiro/2000

Orientador: Antonio José Alves Simões Costa

Área de concentração: Sistemas de Potência

Palavras-chave: Testes de Hipóteses, Transações Bilaterais, Monitoração de Sistemas de Potência em Tempo Real.

Número de Páginas: 93

Este trabalho aborda a identificação de transações bilaterais não-reveladas que podem afetar a área de controle de um Operador Independente do Sistema (OIS), cuja função é monitorar a rede elétrica para assegurar uma operação segura do sistema de potência. Para realizar isto, o OIS deve estar informado de todas as transações que podem acontecer dentro da sua área de controle. No entanto, isto nem sempre acontece, e as áreas de controle afetadas podem não ser notificadas da existência de certas transações. Tais situações podem resultar em grandes fluxos de potência, incrementos das perdas da rede e outras consequências negativas à operação do sistema de potência. Adicionalmente, a identificação de transações bilaterais não-reveladas (TBNRs) proporciona base técnica para ajustes na cobrança sobre o uso da rede elétrica e mesmo para a aplicação de penalidades contratuais.

O método proposto baseia-se no uso da estimação de estados, que é a ferramenta básica para monitoração de sistemas de potência em tempo real, a qual é modificada para incluir as TBNRs como variáveis de estado. A extensão para identificação de TBNRs é baseada na ferramenta estatística de testes de hipóteses, centrada no uso do teorema de Bayes. Além do método proposto para identificação de TBNRs, são desenvolvidas técnicas computacionais para o teste de hipóteses com o intuito de evitar o aumento de esforço computacional que resultaria da necessidade de sucessivas re-estimações de estados.

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

IDENTIFICATION OF UNDISCLOSED TRANSACTIONS UNDER DEREGULATED ENVIRONMENT

ANGELA MARÍA AGUDELO ARBELÁEZ

February/2000

Advisor: Antonio José Alves Simões Costa

Area of concentration: Power Systems

Keywords: Hypothesis Testing, Bilateral Transactions, Power Systems Real-Time Monitoring.

Number of Pages: 93

This work deals with the issue of real-time identification of undisclosed bilateral transactions affecting an Independent System Operator (ISO) control area. The ISO has the task of monitoring the electric network in order to ensure secure operation of the power system. To accomplish that, the ISO must be aware of all bilateral transactions within his control area. In practice, however, this may not always occur, and the affected control areas may not be aware of existing transactions. Such situations may result in large unexplained power flows, increase of network losses and other negative consequences to the economic operation of the power system. Additionally, the identification of undisclosed bilateral transactions (UBTs) provides technical basis for future reconciliation and contract settlements.

To perform UBT identification the ISO's basic monitoring tool, namely, power system state estimation, has been extended to include UBTs as state variables. The approach to the identification of UBTs is through statistical hypothesis testing based on Bayesian estimation. In addition to the proposed UBT identification procedure, computational techniques have been developed for hypothesis testing which avoid expensive re-estimation calculations.

Resumen de la Disertación presentada a la UFSC como parte de los requisitos necesarios para la obtención del grado de Maestro en Ingeniería Eléctrica.

IDENTIFICACIÓN DE TRANSACCIONES NO-REVELADAS EN AMBIENTE DESREGULADO

ANGELA MARÍA AGUDELO ARBELÁEZ

Fevereiro/2000

Orientador: Antonio José Alves Simões Costa

Área de concentración: Sistemas de Potencia

Palabras-clave: Testes de Hipótesis, Transacciones Bilaterales, Monitoramento de Sistemas de Potencia en Tiempo Real.

Número de Páginas: 93

Este trabajo aborda la identificación de transacciones bilaterales no-reveladas que pueden afectar el área de control del Operador Independiente del Sistema (OIS), cuya función es el monitoramento de la red eléctrica para asegurar una operación confiable del sistema de potencia. Para realizar esto, el OIS debe estar informado de todas las transacciones que puedan presentarse dentro de su área de control. Sin embargo, esto no siempre ocurre y las áreas de control afectadas pueden no ser notificadas de la existencia de ciertas transacciones. Tales situaciones pueden resultar en grandes flujos de potencia, incrementos de las pérdidas de la red y otras consecuencias negativas para la operación del sistema de potencia. Adicionalmente, la identificación de transacciones bilaterales no-reveladas (TBNRs) proporciona una base técnica para ajustes en el cobro sobre el uso de la red eléctrica y para la aplicación de penalizaciones contractuales.

El método propuesto se basa en el uso de estimación de estados, que es la herramienta básica para el monitoramento de sistemas de potencia en tiempo real, la cual es modificada para incluir las TBNRs como variables de estado. La extensión para identificación de TBNRs es basada en la herramienta estadística de teste de hipótesis, centrada en el uso del teorema de Bayes. Además del método propuesto para la identificación de TBNRs, son desarrolladas técnicas computacionales para el teste de hipótesis con la finalidad de evitar el aumento de esfuerzo computacional que resultaría de la necesidad de sucesivas re-estimaciones de estados.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABELAS	xiii
1 Introdução	1
1.1 Introdução	1
1.2 Revisão Bibliográfica	3
1.3 Estrutura da dissertação	5
2 Alguns Conceitos sobre Operação em Ambiente Desregulamentado	7
2.1 Introdução	7
2.2 Definições	8
2.3 Estrutura dos modelos “Pool” e Bilateral	11
2.3.1 Modelo Pool	12
2.3.2 Modelo bilateral	13
2.4 Congestionamentos na Rede de Transmissão	14
2.5 Modelo de Operação em Ambiente Competitivo Considerado neste trabalho	15
2.6 Conclusão	15
3 Aplicação da Estimacão de Estados à Identificacão de Transacões Nã-Reveladas	16
3.1 Introducão	16
3.2 Estimacão Estática de Estados em Sistemas de Potência	17
3.2.1 Modelo de Medição	18
3.2.2 Soluçã pelo Método dos Mínimos Quadrados Ponderados	19
3.2.3 Método da Matriz Aumentada de Hachtel	21
3.2.4 Modelo Linearizado	24
3.3 Extensã da Estimacão de Estados para Identificacão de Transacões Nã-Reveladas	28
3.3.1 Simulacão de Transacões Bilaterais	28
3.3.2 Inclusã das transacões no problema de estimacão de estados	30
3.3.3 Inclusã da Informacão a Priori no Problema de Estimacão de Estados	31

3.4	Conclusão	33
4	Teste de Hipóteses	34
4.1	Introdução	34
4.2	Teorema de Bayes	35
4.3	Aplicação à Identificação de Transações Não-Reveladas	38
4.3.1	Implementação do Teste de Hipóteses	40
4.4	Técnicas Computacionais Implementadas	43
4.4.1	Cálculo do determinante de W_i	43
4.4.2	Cálculo do expoente de $f(z \mathcal{H}_i)$	47
4.5	Limites na identificação de transações bilaterais	50
4.6	Conclusões	52
5	Simulações e Resultados Numéricos	54
5.1	Introdução	54
5.2	Descrição do software implementado	55
5.3	Sistema teste de 5 barras (ST-5)	57
5.3.1	Caso <i>A</i>	59
5.3.2	Caso <i>B</i>	60
5.3.3	Caso <i>C</i>	60
5.3.4	Caso <i>D</i>	61
5.3.5	Discussão dos Resultados para Sistema Teste ST-5	62
5.4	Sistema teste IEEE-14 barras (ST-14)	63
5.4.1	Caso <i>A</i>	64
5.4.2	Caso <i>B</i>	65
5.4.3	Caso <i>C</i>	65
5.4.4	Caso <i>D</i>	65
5.4.5	Discussão de Resultados para Sistema Teste ST-14	66
5.5	Sistema teste IEEE-118 barras (ST-118)	67
5.5.1	Caso <i>A</i>	68
5.5.2	Caso <i>B</i>	68
5.5.3	Caso <i>C</i>	68
5.5.4	Caso <i>D</i>	69
5.5.5	Discussão de Resultados para Sistema Teste ST-118	70
5.6	Conclusões	70
6	Conclusões	71
6.1	Sugestões para Futuros Trabalhos	73
	BIBLIOGRAFIA	75
A	Dados dos Sistemas Teste	79
A.1	Sistema 5 Barras	79
A.2	Sistema IEEE - 14 Barras	80

LISTA DE FIGURAS

2.1	Representação de transações bilaterais intra-área	9
2.2	Representação de transações bilaterais inter-área	9
2.3	Representação de transações bilaterais extra-área	10
5.1	Sistema-teste 5 barras	57
5.2	Sistema IEEE-14 barras	64
5.3	Sistema IEEE-118 barras	67

LISTA DE TABELAS

5.1	Dados gerais para o sistema teste de 5 barras (ST-5), IEEE 14 barras e IEEE 118 barras	55
5.2	Informação de transações para o sistema teste de 5 barras	59
5.3	Multiplicadores de Lagrange e Probabilidades a Posteriori - Caso A	60
5.4	Multiplicadores de Lagrange e Probabilidades a Posteriori - Caso B	60
5.5	Multiplicadores de Lagrange e Probabilidades a Posteriori - Caso C	61
5.6	Multiplicadores de Lagrange e Probabilidades a Posteriori - Caso D	62
5.7	Valores estimados das transações para os casos A, B, C e D (ST-5)	62
5.8	Informação de transações para o sistema IEEE-14 barras, caso A	64
5.9	Informação de transações para o sistema IEEE-14 barras, casos B-D	65
5.10	Multiplicadores de Lagrange e Probabilidades a Posteriori - Sistema IEEE-14 barras	66
5.11	Valores estimados das transações para o sistema IEEE-14 barras	66
5.12	Informação de transações para o sistema IEEE-118 barras	68
5.13	Multiplicadores de Lagrange e Probabilidades a Priori - Sistema IEEE-118 barras	69
5.14	Valores estimados das transações para o sistema IEEE-118 barras	69
A.1	Dados das linhas de transmissão do sistema teste de 5 barras.	79
A.2	Dados das linhas de transmissão do sistema IEEE de 14 barras.	80

CAPÍTULO 1

Introdução

1.1 Introdução

Na operação de sistemas elétricos de potência em ambiente desregulamentado, o Operador Independente do Sistema tem como uma de suas funções principais a monitoração da rede de transmissão, a fim de garantir a segurança da operação do sistema. O aplicativo computacional básico para esta monitoração é a estimação de estados. A estimação de estados fornece estimativas, em tempo real, de todas as variáveis elétricas envolvidas na operação do sistema de energia elétrica, tais como módulos e ângulos das tensões nas barras, fluxos de potência ativa e reativa nos ramos e injeções de potência ativa e reativa nas barras [1].

A adoção de um modelo competitivo no setor elétrico possibilitará a realização de transações bilaterais entre um produtor e um consumidor envolvendo grandes blocos de energia. Para o operador independente do sistema (OIS) será importante monitorar estas transações, além das variáveis elétricas, já que estas podem afetar significativamente

as condições de operação do sistema. Considerando que “ N_t ” transações possam ocorrer dentro de um sistema de potência, alguma dentre elas, ou combinações de várias delas, podem ser não-reveladas, ou seja, podem não ter sido informadas adequadamente ao OIS [2], [3], [4].

Adicionalmente, o acompanhamento efetivo de transações possibilitará detectar desvios em relação aos valores previamente acordados entre os diversos agentes envolvidos, fornecendo assim argumentos técnicos para possíveis ajustes posteriores ou penalizações para as partes que infringirem cláusulas contratuais.

Por outro lado, transações bilaterais não-reveladas podem ocasionar congestionamentos inesperados dentro da área de controle do OIS, afetando de forma considerável os custos de operação. Neste sentido, a identificação das transações não-reveladas constitui atualmente um problema importante na operação de sistemas em ambiente desregulado.

Incentivada pela problemática exposta, este trabalho apresenta uma abordagem para identificação de transações bilaterais não-reveladas, baseada nas propostas realizadas por Clements [2], [3] e Simões Costa [4], fazendo uso da teoria de estimação de estados e da teoria dos testes de hipóteses. Esta última fornece as probabilidades para todas as possíveis combinações de transações no plano de medição dado, entregando como resultado a combinação de transações que apresentam a probabilidade mais alta de serem não-reveladas. Com esta abordagem probabilística, consegue-se evitar o grande esforço computacional que implicaria o processamento de erros de todas as possíveis combinações de transações. Desta forma, o estimador de estados é executado uma única vez e a ferramenta do teste de hipóteses

propicia a identificação das transações não-reveladas.

1.2 Revisão Bibliográfica

Diversas pesquisas foram realizadas na última década como uma consequência do processo de desregulamentação dos mercados de energia elétrica. Para o caso da América Latina, um resumo completo do processo de desregulamentação do mercado de energia elétrica é apresentado em [5], onde são descritas as estruturas de cada país assim como os resultados do processo de privatização. Para o caso do Brasil é apresentado em [5] o marco regulatório e a descrição do mercado de energia.

Uma descrição detalhada das mudanças estruturais do setor elétrico brasileiro é apresentada em [6] baseada na proposta realizada pela Coopers & Lybrand, consórcio de consultores que deu suporte ao projeto de reestruturação do setor elétrico.

Com a desregulamentação do mercado, várias teorias tem sido propostas com a finalidade de evitar congestionamentos na rede de transmissão e de estimar a contribuição das transações às perdas do sistema:

- Em 1992, Hogan [7] propôs a extensão do conceito da trajetória contratada para o conceito dos direitos de transmissão com a finalidade de enfrentar o problema de fluxo circulante e de congestionamento no sistema elétrico, de forma a garantir eficiência econômica no curto prazo e o uso da rede no longo prazo.
- Em [8] é apresentada uma discussão da reestruturação do setor elétrico face aos recentes desenvolvimentos em ambiente desregulamentado, realizando uma descrição dos modelos clássicos: modelo *Poolco* e modelo Bilateral. É apresentado como proposta um

modelo compatível com a nova estrutura do mercado, de forma a garantir a mesma eficiência econômica que o modelo *Poolco* com a diferença que o operador independente do sistema não tem influência nas determinações econômicas. A proposta é baseada na realização de contratos multilaterais coordenados entre geradores e consumidores, mecanismo através do qual são obtidos o benefício econômico e a segurança do sistema separadamente.

- Um enfoque geral para o tratamento das transações de potência em ambiente desregulamentado é apresentado em [9] e [10] baseando-se na noção de rede virtual de transações, que modela a topologia de qualquer intercâmbio de potência entre produtores, consumidores e companhias intermediárias e define as transações como variáveis de entrada juntamente com a geração e a carga. Os autores propõem a formulação do problema como um problema de otimização de forma a minimizar o desvio existente entre uma matriz de transações inicialmente proposta e a matriz resultante do processo de otimização, com o objetivo de garantir a segurança do sistema.
- No sistema regulamentado as perdas do sistema eram tratadas como uma carga adicional do sistema. Com a desregulamentação do setor elétrico, porém, a alocação de perdas se torna crítica. Um mecanismo de alocação de perdas que formula o fluxo de potência como uma função explícita das transações realizadas entre as barras dos geradores e as barras dos consumidores é apresentada em [11].

Em [12], [13], [14] e [15] são apresentados os resultados de pesquisas relacionadas com o tratamento dos custos associados às restrições de transmissão num mercado de energia competitivo. Várias metodologias são propostas com a finalidade de proporcionar um

mecanismo que facilite a cobrança dos encargos de congestionamento da rede como uma consequência da presença de uma ou várias transações.

Tendo por base o método da matriz aumentada de Hachtel para a solução do problema de estimação de estados linearizado descrito em [16] e introduzindo modificações na formulação para incluir as transações como novas variáveis de estado, é proposto em [2], [3] e [4] um mecanismo para identificação de transações bilaterais não-reveladas em ambiente desregulamentado, que também utiliza a ferramenta estatística de testes de hipóteses.

1.3 Estrutura da dissertação

O Capítulo 2 apresenta os fundamentos teóricos básicos em relação ao funcionamento de sistemas elétricos em ambiente desregulamentado, descrevendo as características dos modelos existentes assim como a sua aplicação no setor elétrico brasileiro.

O Capítulo 3 apresenta a formulação do problema de estimação de estados pelo método de mínimos quadrados ponderados e o método da matriz aumentada de Hachtel para o modelo linearizado da rede. Posteriormente, é realizada uma extensão da formulação do problema de estimação de estados, incluindo as transações como novas variáveis de estado, com a finalidade de permitir a identificação de transações não-reveladas.

O Capítulo 4 apresenta a formulação matemática da ferramenta probabilística dos testes de hipóteses, assim como a sua aplicação à identificação de transações não-reveladas. Adicionalmente, é feita uma descrição completa das técnicas computacionais utilizadas na implementação do problema.

Os resultados obtidos como consequência da metodologia proposta neste trabalho

são apresentados no Capítulo 5. O método foi testado utilizando-se um sistema de 5 barras, o sistema IEEE de 14 barras e o sistema IEEE de 118 barras.

Finalmente, o Capítulo 6 apresenta as conclusões e sugestões para futuros trabalhos.

CAPÍTULO 2

Alguns Conceitos sobre Operação em Ambiente Desregulamentado

2.1 Introdução

Como consequência de transições político econômicas mais amplas, estão sendo realizadas reformas significativas no mercado Latino-Americano de energia elétrica. A indústria de energia elétrica tem sofrido transformações visando inseri-la no contexto de economias abertas. Tais transformações consistem no estabelecimento de livre competição entre companhias geradoras, além de motivar investimentos por parte de capital privado[5]. As transformações são caracterizadas, em primeiro lugar, pela separação entre o produto “energia” e o serviço “transmissão e distribuição”, realizando-se a comercialização de blocos de energia entre duas regiões diferentes. Em segundo lugar, busca-se o desenvolvimento dos mercados a curto prazo, nos quais as empresas podem comprar energia elétrica a custos

mais baixos.

Neste capítulo, descrevem-se os fundamentos teóricos do funcionamento dos sistemas desregulamentados, assim como as características dos modelos existentes atualmente e sua aplicação na reestruturação do setor elétrico.

2.2 Definições

Operador independente do sistema, OIS: É o organismo encarregado de monitorar o sistema, de forma a garantir a sua correta operação evitando o uso discriminatório da rede elétrica.

Agente comercializador de energia, ACE: Organismo encarregado de estabelecer um mercado no qual geradores e consumidores ofertam lances para compra e venda de energia [13]. Em alguns sistemas o OIS cumpre as funções de monitoramento do sistema e de comercialização de energia sem a necessidade de existir um agente comercializador de energia.

Transações bilaterais: Segundo a abordagem deste trabalho, é definida como um intercâmbio bilateral de potência entre duas entidades. A compra e venda de blocos de energia são realizadas dentro e fora da área de controle do OIS, sendo que as empresas geradoras oferecem os blocos de energia ao ACE, que é a entidade responsável das comercializações. As transações bilaterais incluem as negociações entre empresas geradoras e alguns grandes consumidores do sistema.

Dependendo do tipo de intercâmbio que está sendo realizado, as transações bilaterais podem ser classificadas em:

1. Transações Intra-Área: São transações bilaterais que acontecem dentro da área de controle do OIS. (ver Figura 2.1)

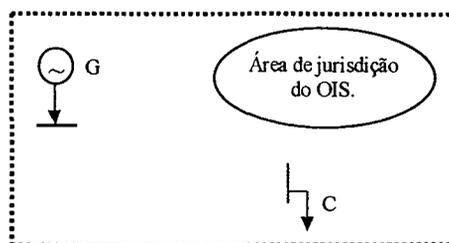


FIGURA 2.1: Representação de transações bilaterais intra-área

2. Transações Inter-Área: São transações bilaterais que envolvem nós geradores e nós consumidores localizados em áreas de controle diferentes, uma das quais é a área de controle do OIS. (ver Figura 2.2)

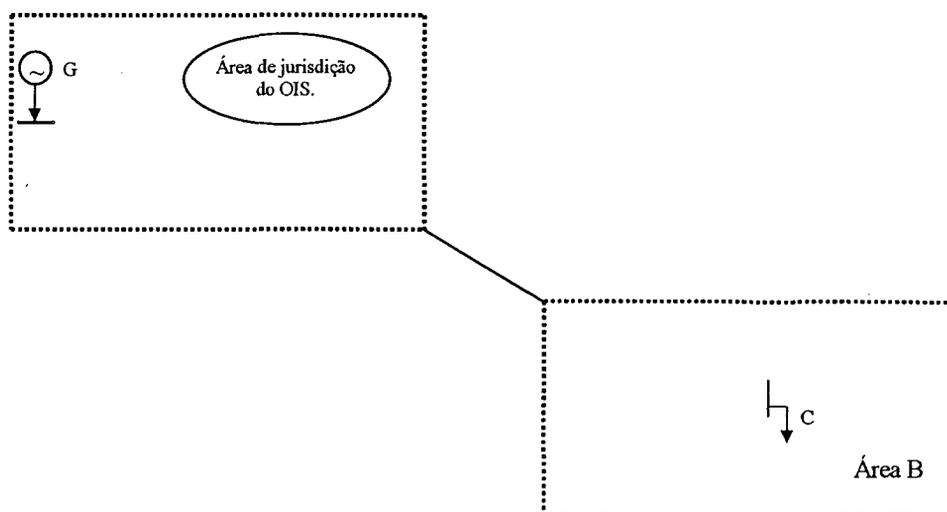


FIGURA 2.2: Representação de transações bilaterais inter-área

Transações Extra-Área: São transações bilaterais que envolvem nós geradores e nós consumidores correspondentes a áreas externas à área de controle do OIS, porém existe um sistema de transmissão externo à área de controle do OIS que fornece uma trajetória para a realização de transações. (ver Figura 2.3)

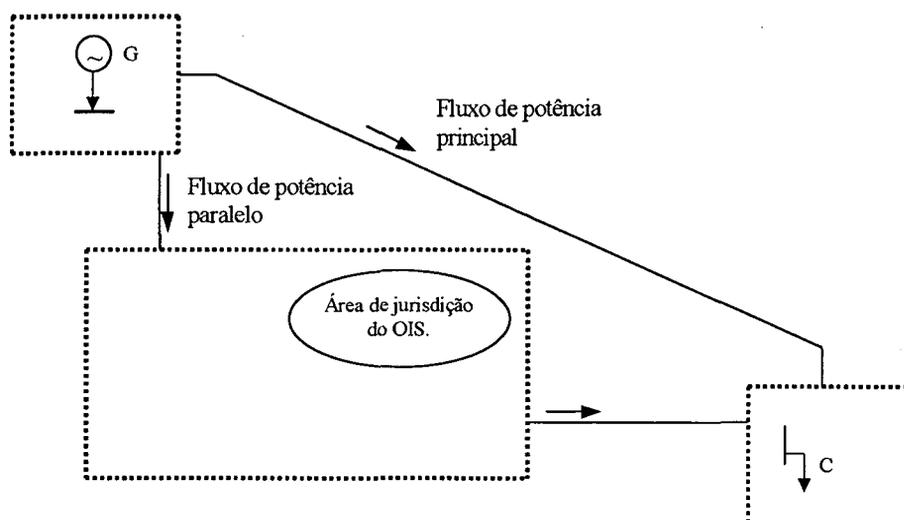


FIGURA 2.3: Representação de transações bilaterais extra-área

O principal objetivo deste trabalho é realizar a identificação de transações bilaterais para o tipo de representação correspondente as transações bilaterais extra-área, uma vez que neste tipo de representação as transações bilaterais não reveladas podem incrementar as perdas e ainda causar congestionamentos dentro do sistema de transmissão da área de controle do OIS. No entanto, o trabalho desenvolvido pode também ser aplicado aos demais tipos de representação.

Transações bilaterais não-reveladas, TBNR: São transações bilaterais que por algum motivo não foram informadas ao OIS. Dentre " N_t " possíveis transações bilaterais

em um sistema de potência, alguma ou combinações de várias delas podem ser não-reveladas [2], [3], [4], originando riscos de congestionamentos inesperados dentro da área de controle do OIS, afetando de forma considerável os custos de operação.

Barras de fronteira: São barras de interconexão entre a área de controle do OIS e áreas vizinhas. É através das barras de fronteira que ocorrem as transações bilaterais, já que a área de controle do OIS faz fronteira tanto com o agente vendedor quanto com o agente comprador de energia.

Mercado SPOT: Sua teoria foi desenvolvida sob as bases do despacho econômico, o qual realiza a maximização dos benefícios extraíndo os custos de operação de um sistema sujeito à disponibilidade das plantas e às restrições da rede de transmissão [17]. Em condições de concorrência perfeita, os preços *spot* tenderiam aos custos marginais de curto prazo (custos marginais de operação), identificando-se desta forma o preço competitivo de cada barra do sistema [7].

Preço de equilíbrio do mercado, *Market Clearing Price*: É o preço de equilíbrio entre a oferta e a demanda em um mercado *spot* [6].

2.3 Estrutura dos modelos “Pool” e Bilateral

O Modelo Convencional apresenta monopólios regulados, os quais não podem ser ajustados ao novo ambiente competitivo, já que este modelo não foi planejado para ambiente competitivo. Assim, os dois modelos básicos na implementação da desregulamentação do mercado de energia são: o modelo Pool e o modelo Bilateral. No momento de considerar o congestionamento da rede ambos modelos estão dirigidos à operação centralizada do sistema.

2.3.1 Modelo Pool

Motivados pela necessidade de ajustar-se às características da rede em um ambiente de mercado de energia, geradores e consumidores ofertam ao ACE a quantidade e preço dos blocos de energia a serem comercializados. Este modelo depende das decisões do ACE e do OIS para receber os preços e quantificar as ofertas dos geradores, selecionar as fontes geradoras mais eficientes de forma a satisfazer as restrições existentes e realizar as transações que envolvam os pagamentos dos consumidores e a remuneração dos produtores de energia.

Uma vez que o preço de equilíbrio do mercado seja alcançado, os benefícios do despacho são implicitamente alocados entre os consumidores e produtores. Neste caso, o OIS não tem maior participação na divisão ou alocação de benefícios entre as empresas participantes, nem tem participação em contratos de energia a longo prazo. Os preços estão baseados nas ofertas feitas pelos geradores despachados, sendo feitos ajustes pelo OIS para representar a contribuição dos consumidores às perdas do sistema e aos possíveis congestionamentos na rede. Estes preços são maiores nos nós dos consumidores do que nos nós dos geradores, resultando em um ganho para o operador da rede, neste caso.

A tarifa *spot* pode ser usada, dependendo da implementação do modelo, para:

1. Pagar aos portadores de direitos de capacidade de transmissão os contratos de congestionamento de transmissão.
2. Reduzir os encargos de acesso à rede, recuperando os custos fixos da rede de transmissão.

No modelo Pool, todas as transações são operacionalizadas diretamente pelo OIS,

quem tem a responsabilidade de assegurar o balanço de potência instantânea nas barras do sistema e manter a confiabilidade e segurança na rede. O OIS tem ainda o poder de restringir ou cercear transações, se as mesmas põem em risco a segurança de operação do sistema [8].

2.3.2 Modelo bilateral

Motivados pelo conceito de que um mercado aberto é a via mais eficiente para alcançar a competição no mercado de energia, geradores e consumidores fazem acordos independentes para a realização de transações bilaterais, sendo a magnitude destas transações e os correspondentes acordos financeiros decididos sem a intervenção do OIS. Incentivos econômicos levam os produtores ao encontro de consumidores que pagam melhores preços; por outro lado, os consumidores buscam os produtores que ofertam a energia a preços mais baixos [8]. Assim, a eficiência do sistema é aumentada pelas exigências dos consumidores que escolhem as unidades geradoras mais baratas.

O problema neste modelo é a existência de restrições na transmissão, o que leva à necessidade de coordenação da segurança do sistema a fim de que as mesmas sejam respeitadas. Em consequência, o modelo bilateral se submete ao modelo tradicional, onde o OIS tem autoridade para determinar um nível seguro de geração. Se fosse possível considerar que não existem limitações no sistema de transmissão, a eficiência econômica seria alcançada no curto prazo, já que os geradores devem ofertar preços atrativos aos consumidores. Para o longo prazo, a opinião de alguns autores [8] é de que os agentes geradores devem garantir a expansão do sistema de transmissão, de forma a satisfazer o aumento da demanda do sistema.

2.4 Congestionamentos na Rede de Transmissão

O congestionamento da rede é uma consequência das suas restrições de transmissão e pode ocasionar incrementos maiores nos custos de transmissão de potência do que no caso de perdas [12]. Em sistemas reais, a existência de congestionamentos sempre deve ser prevista, dadas as limitações de transmissão dos componentes da rede.

A presença de “TBNR” dentro de um sistema de transmissão, pode levar, sob certas circunstâncias, ao congestionamento das linhas de transmissão, sendo primordial a sua correta identificação. Uma vez que o congestionamento é detectado, o “OIS” deve manter em balanço a geração e a carga em cada área de controle, com a finalidade de evitar congestionamentos no sistema [13]. Desta forma todas as empresas geradoras, cujos fluxos contribuam para congestionamentos deverão arcar com os custos adicionais deles advindos. Duas metodologias foram propostas na literatura para quantificar os custos adicionais relativos a congestionamentos:

1. Estratégia baseada nos preços nodais, que é consistente com as políticas do modelo Pool [12].
2. Estratégia baseada na alocação de custos, mais apropriada às políticas do modelo Bilateral [12].

2.5 Modelo de Operação em Ambiente Competitivo Considerado neste trabalho

Neste trabalho será considerado um modelo de operação misto [18], com a estrutura do modelo Pool considerando a existência do OIS e do ACE como descrito na seção 2.3.1, e assumindo que transações bilaterais podem ser realizadas na área de controle do OIS através das barras de fronteira do sistema, como considerado pelo modelo bilateral na seção 2.3.2.

2.6 Conclusão

Neste capítulo apresentaram-se as definições básicas necessárias para introduzir o funcionamento de sistemas de potência em ambiente desregulamentado. Uma revisão da literatura dos modelos básicos existentes assim como a sua aplicação no sistema brasileiro foi apresentada.

Um análise para o problema de congestionamento na rede de transmissão, que pode ser ocasionado pela presença de transações bilaterais não-reveladas ao “OIS”, foi apresentado para os modelos básicos citados, assim como as respectivas alocações de custos.

No seguinte capítulo é realizada uma revisão da teoria da estimação de estados, sendo implementada uma extensão para realizar a correta identificação de transações não-reveladas.

CAPÍTULO 3

Aplicação da Estimação de Estados à Identificação de Transações Não-Reveladas

3.1 Introdução

A possibilidade de existência de Transações Bilaterais Não-Reveladas (TBNR) constitui atualmente uma fonte de preocupação no contexto da operação em ambiente desregulamentado. Neste sentido, a aplicação da estimação de estados junto com outros métodos probabilísticos é proposta neste trabalho como uma ferramenta para identificar possíveis TBNRs.

Este capítulo tem como objetivo apresentar a formulação da ferramenta de estimação de estados para o caso linearizado, proporcionando um modelo que se ajusta ao

comportamento em tempo real dos sistemas de potência sob ambiente desregulamentado e visando identificar a presença de transações inadvertidas dentro deste, garantindo a segurança do sistema. Inicialmente é apresentada a formulação básica da teoria de estimação de estados, sendo utilizados o Método dos Mínimos Quadrados Ponderados e o Método da Matriz Aumentada de Hachtel. Posteriormente são introduzidas as transações como novas variáveis de estado dentro da formulação do problema. Finalmente, a partir da formulação básica do Método da Matriz Aumentada de Hachtel e incluindo como novas variáveis de estados as possíveis transações presentes no sistema, é formulado o problema de identificação de transações não-reveladas.

3.2 Estimação Estática de Estados em Sistemas de Potência

O Estimador de Estados é uma ferramenta básica cuja função é fornecer uma base de dados em tempo real, a partir do cálculo das variáveis de estado da rede, tendo como informação as telemidas presentes no sistema, as quais devem apresentar um grau de redundância que permita a correta identificação de erros grosseiros assim como a sua eliminação [16].

O Estimador de Estados basicamente processa as medidas disponíveis (geralmente magnitudes de tensão nas barras, injeções de potência ativa e reativa, fluxos de potência ativa e reativa, correntes, etc.) com o fim de estimar os valores para a tensão complexa de todas as barras do sistema, em função dos quais podem ser descritas as demais características do sistema.

3.2.1 Modelo de Medição

Considera-se um sistema de potência com N_b barras, no qual m quantidades são medidas e a topologia e os parâmetros da rede são conhecidos. Sob estas condições é possível determinar os valores correspondente aos fluxos de potência em qualquer linha de transmissão e/ou injeção de potência em qualquer barra, a partir dos valores das tensões complexas nas barras do sistema. Por esta razão as tensões complexas nas barras N_b barras do sistema são chamadas variáveis de estado. Assim, o vetor de estados, \hat{x} , é um vetor formado por valores correspondentes aos ângulos das tensões (o ângulo da barra de referência é conhecido) e valores correspondentes às magnitudes das tensões em cada barra. Portanto a dimensão do vetor de estados \hat{x} é $n = 2N_b - 1$.

O conjunto de medidas da rede, as variáveis de estado do sistema e os erros de medição podem ser relacionados através do seguinte modelo de medição [16].

$$z = z_0 + \eta \quad (3.1)$$

onde:

z : vetor das quantidades medidas ($m \times 1$);

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

η : vetor aleatório que simula os erros de medição (imprecisão de medidores, erros nos transformadores dos instrumentos de medição, efeitos de conversão analógica digital, etc.) ($m \times 1$).

Supondo que o vetor η tem média zero e que os erros de medição são não correlacionados, a matriz de covariância dos erros de medição R é suposta diagonal e seus elementos são as variâncias dos erros de medição, calculadas com base na precisão dos medidores.

Assim:

$$E(\eta) = 0; \quad E(\eta \cdot \eta^T) = R \quad (3.2)$$

onde:

$E(\cdot)$: valor esperado;

R : matriz de covariância dos erros de medição, ($m \times m$).

O vetor das medidas pode ser expresso como uma função não-linear dos estados, tendo por base as leis de Kirchhoff e a lei de Ohm, isto é:

$$z_0 = h(x) \quad (3.3)$$

Assim, a equação (3.1) poder ser escrita como:

$$z = h(x) + \eta \quad (3.4)$$

3.2.2 Solução pelo Método dos Mínimos Quadrados Ponderados

Neste método, considerado o método clássico da estimação de estados, o vetor de estados \hat{x} é calculado de forma a minimizar a soma dos quadrados dos resíduos ponderados.

Os resíduos de estimação são definidos como:

$$r = z - h(\hat{x}) \quad (3.5)$$

A função objetivo a ser minimizada é dada por:

$$J(\hat{x}) = [z - h(\hat{x})]^T R^{-1} [z - h(\hat{x})] \quad (3.6)$$

onde x é o vetor dos estados, ($n \times 1$).

Devido à não-linearidade da função vetorial $h(\hat{x})$, a solução do problema se torna difícil. Entretanto, pelas características apresentadas (função objetivo de natureza quadrática e ausência de restrições), o problema pode ser solucionado pelo método de Newton. Para tanto; a equação (3.4) deve ser linearizada em torno de um valor conhecido do vetor de estados \hat{x}_k [19], [16]. A solução do problema linearizado fornece o vetor de correções Δx que permite atualizar o vetor de estados corrente como:

$$x_{k+1} = x_k + \Delta x \quad (3.7)$$

A função custo a ser minimizada para o problema linearizado toma a forma:

$$J(\Delta x) = [\Delta z - H(x_k) \Delta x_k]^T R^{-1} [\Delta z - H(x_k) \Delta x_k] \quad (3.8)$$

onde:

$\Delta z = z - h(x_k)$: vetor incremental de medidas ($m \times 1$);

$H(x_k) = \frac{\partial h(x)}{\partial x} \Big|_{x=x_k}$: matriz Jacobiana do sistema que relaciona as medidas às variáveis de estados ($m \times n$).

A condição necessária de otimalidade é dada por:

$$\frac{\partial J(x)}{\partial x} = 0 \quad (3.9)$$

Que fornece a Equação Normal de Gauss:

$$H^T(x_k)R^{-1}H(x_k)\Delta x_k = H^T(x_k)R^{-1}\Delta z \quad (3.10)$$

A solução final do problema de estimação de estados pelo método dos mínimos quadrados ponderados é obtida através de um procedimento iterativo em que Δx é calculado em cada iteração resolvendo-se a equação (3.10), até que o critério de parada dado pela equação (3.11) seja satisfeito:

$$|\Delta x_k| < \varepsilon \quad (3.11)$$

onde ε é um valor de tolerância pre-especificado.

A matriz $G_A \triangleq [H^T R^{-1} H]$, denominada Matriz Ganho, é simétrica em estrutura, e será positiva definida se e somente se o número e a distribuição das medidas do plano de medição seja tal que assegurem a observabilidade da rede elétrica [20]. Se estas condições forem satisfeitas, a equação (3.10) apresentará uma solução única [20].

3.2.3 Método da Matriz Aumentada de Hachtel

Devido ao fato de que a abordagem do problema de estimação de estados através da equação normal de Gauss apresenta limitações quanto a problemas de condicionamento numérico [16], técnicas ortogonais tem sido propostas para melhorar a robustez numérica do processo de solução [21]. Além das técnicas baseadas em transformações ortogonais, técnicas não-ortogonais também tem sido propostas que, em termos numéricos, possuem um grau de estabilidade intermédio entre o método da equação normal e os métodos ortogonais [16],

[21].

Entre estas técnicas não-ortogonais encontra-se o método da Matriz Aumentada, o qual apresenta vantagens com respeito ao método da equação normal, não só em termos de estabilidade numérica mais em desempenho computacional [16], [21]. Devido ao desempenho computacional e à simplicidade da sua concepção e formulação, o método da matriz aumentada (ou método do Tableau Esparsos) será empregado neste trabalho para obter a solução do problema de estimação de estados.

Partindo da equação (3.6), o problema de estimação de estados pode ser formulado como um problema de minimização, onde as injeções nulas das barras do sistema (potência ativa) são incluídas como restrições de igualdade.

$$\begin{aligned}
 \text{Min} \quad J(x) &= \frac{1}{2} r^T R^{-1} r \\
 \text{s.a.} \quad z - h(\hat{x}) - r &= 0 \\
 -g(x) &= 0
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

onde:

$r = z - h(\hat{x})$: vetor dos resíduos de estimação ($m \times 1$);

$g(x)$: conjunto de restrições de igualdade correspondente às injeções nulas em respectivas barras do sistema.

O problema de minimização citado pode ser resolvido pelo método da Matriz Aumentada. Para tanto é necessário montar o Lagrangeano do problema atribuindo-se multiplicadores de Lagrange às restrições de igualdade:

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} [r]^T R^{-1} [r] + \frac{1}{2} \pi^T (z - h(\hat{x}) - r) + \frac{1}{2} \lambda^T (-g(x)) \tag{3.13}$$

onde:

π : multiplicadores de lagrange associados às medidas;

λ : multiplicadores de lagrange associados às restrições das barras de injeção nula.

As condições necessárias ou condições de Karush Kuhn Tucker (KKT) [22], são dadas por:

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial r} = R^{-1}r - \pi = 0 \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x} = -H^T \pi - G^T \lambda = 0 \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \pi} = z - h(\hat{x}) - r = 0 \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \lambda} = -g(\hat{x}) = 0 \quad (3.17)$$

onde H e G são as matrizes Jacobianas correspondentes às funções $h(\hat{x})$ e $g(\hat{x})$ respectivamente.

A equação (3.14) pode ser re-escrita como:

$$r = R\pi \quad (3.18)$$

Substituindo a equação (3.18) na equação (3.16) obtém-se:

$$z - h(\hat{x}) - R\pi = 0 \quad (3.19)$$

As equações (3.15), (3.17) e (3.19) podem ser linearizadas obtendo-se o seguinte sistema de equações lineares.

$$\begin{bmatrix} 0 & H^T & G^T \\ H & R_1 & 0 \\ G & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \hat{x} \\ \pi \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ z - h(\hat{x}_k) \\ -g(\hat{x}_k) \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

onde:

N_E : número de barras que apresentam injeção nula no sistema;

H : matriz de observação do modelo de medição, ($m \times N_b$);

G : matriz de observação correspondente às barras de injeção nula, ($N_E \times N_b$).

A equação (3.20) corresponde à forma padrão do método da matriz aumentada de Hachtel [16], e cuja solução fornece estimativas para o vetor de estados \hat{x} e para os multiplicadores de Lagrange associados às medidas e às restrições.

3.2.4 Modelo Linearizado

No caso linearizado, o Estimador de Estados processa basicamente as medidas de potência ativa (injeções de potência ativa nas barras e fluxos de potência ativa nas linhas de transmissão) buscando estimar os valores para os ângulos de todas as barras, em função dos quais podem ser calculadas todas as variáveis de interesse no sistema.

O Estimador de Estados Linearizado baseia-se nas mesmas hipóteses simplificadas utilizadas para o fluxo de potência linearizado, ou seja [23]:

1. As magnitudes de tensão nas barras do sistema de potência são todas consideradas iguais à 1,0 p.u. ;

2. As resistências e admitâncias das linhas de transmissão são supostas desprezíveis;
3. As aberturas angulares das linhas são supostas pequenas o suficiente para justificar a aproximação:

$$\text{sen}(\theta_i - \theta_j) \approx (\theta_i - \theta_j) \text{ rads} \quad (3.21)$$

Considerando-se as hipóteses acima, a relação entre os fluxos e injeções de potência ativa com os ângulos das tensões nas barras é dada por:

$$t_{ij} = \gamma_{ij}(\theta_i - \theta_j) \quad (3.22)$$

e

$$p_i = \sum_{k \in \Psi_i} t_{ik} \quad (3.23)$$

onde:

$$\gamma_{ij} = \frac{1}{x_{ij}} \quad (3.24)$$

e:

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

p_i : injeção de potência ativa na barra i ;

γ_{ij} : capacidade de transmissão da linha $i - j$;

Ψ_i : conjunto das barras adjacentes à barra i .

Como as magnitudes das tensões nas barras são supostas constantes, as únicas variáveis a serem estimadas são os ângulos das tensões; isto é, o vetor de estados \hat{x} fica reduzido ao vetor θ , formado por valores correspondentes aos ângulos das tensões (o ângulo da barra de referência é conhecido), e cuja dimensão é $n = N_b - 1$. Da mesma forma, o vetor

de medidas z envolve apenas medidas de fluxo e injeção de potência ativa. Assim, tomando a barra 1 como barra de referência do sistema:

$$\theta = [\theta_2, \theta_3, \dots, \theta_{N_b}]^T \quad (3.25)$$

$$z = \begin{bmatrix} z_t^T : z_p^T \end{bmatrix}^T \quad (3.26)$$

onde:

N_b : número de barras do sistema;

z_t : vetor de medidas de fluxo de potência ativa;

z_p : vetor de medidas de injeção de potência ativa.

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

$$z = H\theta + \eta \quad (3.27)$$

$$E(\eta) = 0; \quad E(\eta, \eta^T) = R = \text{diag}\{\sigma_1^2, \dots, \sigma_m^2\} \quad (3.28)$$

onde:

σ_m^2 : variâncias das medidas;

H : matriz de observação do modelo de medição, a qual depende dos parâmetros das linhas ($m \times n$);

η : vetor aleatório que simula os erros de medição (imprecisão de medidores, erros nos transformadores dos instrumentos de medição, efeitos de conversão analógica digital, etc.) ($m \times 1$);

R : matriz de covariância dos erros de medição ($m \times m$).

De acordo com as equações (3.22) e (3.23), pode observar-se que a relação existente entre as quantidades medidas e os estados são lineares. Em consequência, a matriz de observação H do modelo de medição é constante e seus elementos são combinações lineares das capacidades das linhas.

As características do modelo linearizado permitem realizar o cálculo do vetor de estados " θ " de uma forma não-iterativa. Usando o método da equação normal, resolve-se o seguinte sistema linear:

$$(H^T R^{-1} H) \hat{\theta} = H^T R^{-1} z \quad (3.29)$$

Por outro lado, se o método da matriz aumentada for o empregado, então o sistema de equações (3.20) torna-se:

$$\begin{bmatrix} 0 & H^T & G^T \\ H & R_1 & 0 \\ G & 0 & R_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \pi \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ z_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

onde:

N_E : número de barras que apresentam injeção de potência nula;

H : matriz de observação do modelo de medição ($m \times N_b$);

G : matriz de observação correspondente às barras de injeção nula ($N_E \times N_b$);

z_1 : vetor de medidas ($m \times 1$);

R_1 : matriz de covariância dos erros de medição ($m \times m$);

R_2 : matriz de covariância das restrições correspondente às barras de injeção nula ($N_E \times N_E$).

3.3 Extensão da Estimação de Estados para Identificação de Transações Não-Reveladas

3.3.1 Simulação de Transações Bilaterais

Como a realização de transações bilaterais é geralmente efetuada entre um produtor e um consumidor, envolvendo grandes blocos de energia, as transações são tratadas como novas variáveis de estado, sendo simuladas como injeções de potência e definidas de forma a especificar, através de fatores de participação, tanto a quantidade de energia entregue ao sistema por parte do produtor quanto a quantidade de energia recebida pelo consumidor. Os fatores de participação, definidos sobre um conjunto de barras indicam, para cada transação, a fração do total da potência transacionada com que cada nó participa daquela transação [8]. Sendo que, o conjunto de barras onde são realizadas as transações, as quais são comuns ao sistema do domínio do OIS e ao sistema externo, é denominado por barras de fronteira.

Uma transação bilateral k pode portanto ser completamente definida por:

$$T_{rk} = \{s^k, b^k, t^k\} \quad (3.31)$$

onde:

N_t : número das possíveis transações presentes no sistema;

N_E : número de barras externas (de fronteira) do sistema;

$s^k = [\sigma_1^k, \sigma_2^k, \dots, \sigma_{N_E}^k]^T$: conjunto dos fatores de participação dos nós produtores para a transação k , os quais definem a proporção da potência transacionada injetada em cada barra de fronteira ($N_E \times 1$);

$b^k = [\beta_1^k, \beta_2^k, \dots, \beta_{N_E}^k]^T$: conjunto dos fatores de participação dos nós consumidores para a transação k , os quais definem a proporção da potência transacionada extraída de cada barra de fronteira;

t^k : potência transacionada na transação k , em p.u..

A inclusão das transações como novas variáveis de estado implica em modificações das equações do fluxo de potência, as quais contêm informações provenientes das transações conhecidas pelo OIS.

A injeção de potência na barra k devida a uma transação não-revelada é dada por:

$$p_k = (\sigma^k - \beta^k) t_k \triangleq m_k t_k \quad (3.32)$$

A injeção de potência total no sistema externo devido às transações não-reveladas é:

$$P_E = \sum_{k=1}^n m_k t_k = M t \quad (3.33)$$

onde:

M : matriz relativa às injeções externas e às possíveis transações, cujos elementos são os fatores de participação das barras que as envolvem ($N_E \times N_t$).

Incluindo as transações não-reveladas na formulação do fluxo de potência linearizado, a equação do balanço de potência pode ser escrita como:

$$B_E(\gamma)\theta - P_E - Mt = 0 \quad (3.34)$$

onde:

P_E : vetor das injeções nodais conhecidas ($N_E \times 1$);

$B_E(\gamma)$: partição da matriz B de susceptância do sistema correspondente às barras de fronteira;

t : vetor das possíveis transações do sistema ($N_t \times 1$).

Fazendo uso da ferramenta de estimação de estados, com base no modelo de medição apresentado, é possível obter estimativas para os valores reais das transações presentes no sistema, como será visto a seguir.

3.3.2 Inclusão das transações no problema de estimação de estados

Usando o modelo de medição linearizado e incluindo as transações como novas variáveis de estado, além da restrição de igualdade correspondente à definição da barra de referência, a formulação apresentada na equação (3.12) é modificada para:

$$\begin{aligned} \text{Min } J(x) &= \frac{1}{2}r^T R^{-1}r \\ \text{s.a. } z - H\hat{x} - \eta &= 0 \\ \theta_r &= 0 \\ G\hat{x} &= 0 \end{aligned} \quad (3.35)$$

onde:

$$R = \begin{bmatrix} R_1 \\ \\ R_2 \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

com:

- $\hat{x}^T \triangleq [\theta^T, t^T]$: novo vetor de estados, incluindo os ângulos e as possíveis transações ($1 \times (N_b + N_t)$);
- H : matriz de observação do modelo de medição, a qual depende dos parâmetros das linhas ($m \times (N_b + N_t)$);
- $G \triangleq [B_E : -Mt]$: matriz de observação correspondente às barras de injeção nula e às transações ($N_E \times (N_b + N_t)$);
- θ_r : ângulo da tensão na barra de referência;
- R_1 : matriz de covariância dos erros de medição ($m \times m$);
- R_2 : matriz de covariância das restrições correspondente às barras de injeção nula e às transações, $((N_E + N_t) \times (N_E + N_t))$.

3.3.3 Inclusão da Informação a Priori no Problema de Estimação de Estados

Devido à falta de medidas no plano de medição do sistema fora da área de controle do OIS (sistema externo), podem vir a ocorrer problemas de observabilidade. Para contornar esta dificuldade, informações a priori sobre os estados do sistema podem ser inseridas na formulação do problema de estimação.

Incluindo a informação a priori dos estados do sistema, o problema de minimização apresentado pela equação (3.35), transforma-se em:

$$\begin{aligned}
\text{Min } J(x) &= \frac{1}{2} [r]^T R^{-1} [r] + \frac{1}{2} (\hat{x} - \bar{x})^T P^{-1} (\hat{x} - \bar{x}) \\
\text{s.a.} \quad z - H\hat{x} - \eta &= 0 \\
G\hat{x} &= 0
\end{aligned} \tag{3.37}$$

onde:

$$P = E\{(\hat{x} - \bar{x})(\hat{x} - \bar{x})^T\} \tag{3.38}$$

e,

- $r = z - h(\hat{x})$: vetor dos resíduos de estimação ($m \times 1$);
- \bar{x} : vetor de estimativas a priori ($1 \times (N_b + N_t)$);
- \hat{x}^T : novo vetor de estados, incluindo os ângulos e as possíveis transações ($1 \times (N_b + N_t)$);
- P : matriz de covariância das estimativas a priori \bar{x} ($(N_b + N_t) \times (N_b + N_t)$);
- $r_e = N_E + N_t + 1$: número de restrições estruturais do sistema, correspondente às restrições das barras de injeção nula, às possíveis transações presentes no sistema e à restrição da barra de referência;
- G : matriz de observação correspondente às restrições ($r_e \times (N_b + N_t)$).

Obtendo-se a função Lagrangeana de forma similar à apresentada na equação (3.13)

e, a partir dela, derivando o conjunto de equações resultantes da aplicação das condições necessárias de Karush-Kuhn-Tucker, obtém-se o seguinte sistema de equações:

$$\begin{bmatrix} -P^{-1} & H^T & G^T \\ H & R_1 & 0 \\ G & 0 & R_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \pi \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -P^{-1}\bar{x} \\ z_1 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3.39}$$

Finalmente, a estimação de estados é realizada solucionando-se o sistema de equações

lineares apresentado pela equação (3.39), obtendo-se estimativas para os ângulos de todas as barras e para todas as possíveis transações que podem estar presentes no sistema.

3.4 Conclusão

Neste capítulo, foram apresentados os métodos dos mínimos quadrados ponderados e o método da Matriz Aumentada de Hachtel para a solução do problema de estimação de estados. A implementação aqui realizada está baseada no método da Matriz Aumentada de Hachtel, devido ao seu desempenho numérico e à simplicidade de sua concepção e formulação.

Como a proposta desta dissertação é a identificação de transações bilaterais, estas transações são introduzidas na formulação da estimação de estados como novas variáveis de estado. As barras do sistema onde podem acontecer tais transações são simuladas como barras de injeção nula, e suas injeções de potência são modeladas sendo introduzidas na formulação como restrições de igualdade.

No próximo capítulo são introduzidos os testes de hipóteses, que permitem determinar que combinação de transações é melhor suportada pelas medidas presentes no sistema.

CAPÍTULO 4

Teste de Hipóteses

4.1 Introdução

Neste capítulo será introduzido o uso da ferramenta probabilística de testes de hipóteses, cujo objetivo é estabelecer se os valores das medidas z suportam a hipótese básica (segundo a qual as transações presentes no sistema são nulas, $t_{ij} = 0$) ou respaldam alguma outra hipótese [2]. Sob a hipótese básica, todas as restrições de igualdade estão ativas, isto é, considera-se que todas as possíveis TBNR são nulas. Sob as demais hipóteses, uma ou mais restrições de igualdade serão removidas, implicando na ativação das transações não-reveladas correspondentes. A aplicação dos testes de hipóteses parte dos resultados obtidos do estimador para a hipótese básica e posteriormente faz uso do cálculo da função densidade de probabilidade condicional, para determinar a probabilidade de as medidas em z estarem certas dado que a Hipótese " \mathcal{H}_i " é verdadeira. Através do cálculo das probabilidades condicionais de todas as hipóteses possíveis, será realizada a correta identificação do conjunto de transações efetivamente ativas no sistema, correspondentes às

transações ativas da hipótese que apresente a maior probabilidade. Uma vez identificadas as transações que realmente se encontram presentes no sistema, é possível realizar novamente a estimação de estados, removendo as restrições de igualdade correspondentes, obtendo-se os valores verdadeiros dos estados do sistema.

4.2 Teorema de Bayes

Dado que N_t transações podem estar acontecendo no sistema, o número total de possíveis combinações de transações que podem estar presentes no sistema é 2^{N_t} (incluindo a hipótese básica, \mathcal{H}_0), das quais só uma delas representa a condição de operação que efetivamente está ocorrendo.

O teorema de Bayes é usado com a finalidade de evitar o grande esforço computacional que implicaria a estimação de estados para cada uma das possíveis hipóteses até achar aquela que for coerente com as medidas do plano de medição. Assim, cada uma das 2^{N_t} possíveis combinações de transações são testadas pelo teorema de Bayes, dando como resultado a combinação que apresenta o maior valor da probabilidade de ocorrência, dado que o vetor de medidas z é conhecido.

As probabilidades condicionais (*a posteriori*) para cada hipótese são obtidas através da seguinte forma do teorema de Bayes [24]:

$$P(\mathcal{H}_i | z) = P(\mathcal{H}_i, \mathbf{x} = x) = \frac{f(z | \mathcal{H}_i)P(\mathcal{H}_i)}{\sum_{j=1}^{2^{N_t}} f(z | \mathcal{H}_j)P(\mathcal{H}_j)} \quad (4.1)$$

onde:

$f(z | \mathcal{H}_i)$: função densidade de probabilidade condicional de z dado que \mathcal{H}_i é verdadeira;

$P(\mathcal{H}_i)$: probabilidade a priori para a hipótese \mathcal{H}_i .

O cálculo de $f(z | \mathcal{H}_i)$ é necessário para determinar as probabilidades condicionais para cada hipótese. Isto pode ser facilmente implementado se for suposto que o vetor de estados x e o vetor aleatório que simula os erros de medição, η , são variáveis aleatórias Gaussianas. Conseqüentemente, o vetor de medidas z também o será.

Para o caso monovariável, a função distribuição Gaussiana com média \bar{x} e a variância σ^2 têm a seguinte função densidade de probabilidade [24]:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\bar{x}}{\sigma}\right)^2} \quad -\infty < x < \infty \quad (4.2)$$

O expoente da função anterior mede a distância quadrática de x com relação a μ em unidades de desvio padrão, podendo ser reescrita por:

$$\left(\frac{x-\bar{x}}{\sigma}\right)^2 = (x-\bar{x}) (\sigma^2)^{-1} (x-\bar{x}) \quad (4.3)$$

Esta notação pode ser estendida ao caso multivariável como [25]:

$$(x-\bar{x})^T (P)^{-1} (x-\bar{x}) \quad (4.4)$$

onde:

x : vetor de estados ($1 \times (N_b + N_t)$);

P : matriz de covariância dos erros de estimação a priori ($(N_b + N_t) \times (N_b + N_t)$).

A constante $\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}}$ do caso monovariável transforma-se em $(2\pi)^{-\frac{k}{2}} |\Omega|^{-\frac{1}{2}}$ para o caso multivariável, onde $k = N_b + N_{ti}$, $|\cdot|$ indica determinante e $\Omega = P^{-1}$.

Em resumo, para o caso multivariável, a função densidade de probabilidade para o vetor de variáveis de estado, x , sendo consideradas como variáveis aleatórias é dada por [24]:

$$f(x) = (2\pi)^{-\frac{k}{2}} \sqrt{|P^{-1}|} e^{-\frac{1}{2}(x-\bar{x})^T(P)^{-1}(x-\bar{x})} \quad (4.5)$$

Uma vez que os vetor de estados, x , e o vetor dos erros de medição, η , são considerados como variáveis aleatórias, é possível considerar o vetor de medidas z como um vetor de variáveis aleatórias Gaussianas, a função densidade de probabilidade condicional de z dado que \mathcal{H}_i é verdadeira $f(z | \mathcal{H}_i)$ é dada por:

$$f(z | \mathcal{H}_i) = (2\pi)^{-\frac{k}{2}} \sqrt{|\Omega_i^{-1}|} e^{-\frac{1}{2}(z_m)^T(\Omega_i)^{-1}(z_m)} \quad (4.6)$$

onde:

$$k = N_b + N_{ti};$$

$$z_m = z - H\bar{x} : \text{vetor de medidas modificado } (1 \times (m + r_e));$$

$$N_{ti} : \text{número de transações ativas para a hipótese } \mathcal{H}_i;$$

$$|\Omega_i^{-1}| : \text{determinante da inversa da matriz de covariância de } z \text{ dado que } \mathcal{H}_i \text{ é verdadeiro } ((m + r_e) \times (m + r_e));$$

$$r_e = N_E + N_t + 1 : \text{número de restrições estruturais do sistema correspondente às restrições das barras de injeção nula, às transações presentes no sistema e à restrição da barra de referência.}$$

4.3 Aplicação à Identificação de Transações Não-Reveladas

Uma vez que os estados são estimados para a hipótese básica, é realizado o cálculo da função densidade de probabilidade condicional de z dado que \mathcal{H}_i é verdadeira $f(z | \mathcal{H}_i)$ apresentado na equação (4.6), para finalmente obter os valores das probabilidades condicionais (*a posteriori*) da equação (4.1) para cada uma das 2^{N_t} possíveis combinações de transações. Torna-se portanto imprescindível o cálculo do determinante da matriz Ω_i^{-1} e dos multiplicadores de Lagrange referentes à hipótese \mathcal{H}_i .

Assim, partindo do sistema apresentado pela equação (3.39), tem-se:

$$\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \pi \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -P^{-1} & H^T & G^T \\ H & R_1 & 0 \\ G & 0 & R_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -P^{-1}\bar{x} \\ z_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Redefinindo:

$$H \triangleq \begin{bmatrix} H \\ G \end{bmatrix}, R \triangleq \begin{bmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & R_2 \end{bmatrix}, \lambda_m \triangleq \begin{bmatrix} \pi \\ \lambda \end{bmatrix} \text{ e } z = \begin{bmatrix} z_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

o sistema (4.7) fica:

$$\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \lambda_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -P^{-1} & H^T \\ H & R \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -P^{-1}\bar{x} \\ z \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

da mesma forma:

$$\begin{bmatrix} -P^{-1} & H^T \\ H & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \lambda_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -P^{-1}\bar{x} \\ z \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Seja a inversa da matriz no lado direito de (4.9) dada por:

$$\begin{bmatrix} -P^{-1} & H^T \\ H & R \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} -\Sigma & B^T \\ B & W \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Então,

$$\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \lambda_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\Sigma & B^T \\ B & W \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -P^{-1}\bar{x} \\ z \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Da equação (4.12) pode-se ver que:

$$\lambda_m = Wz - BP^{-1}\bar{x} \quad (4.13)$$

Por outro lado, da equação (4.11) tem-se:

$$\begin{bmatrix} -\Sigma & B^T \\ B & W \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -P^{-1} & H^T \\ H & R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

e portanto $BP^{-1} = WH$. Substituindo na equação (4.13), obtém-se:

$$\lambda_m = W(z - H\bar{x}) = Wz_m \quad (4.15)$$

onde $z_m \triangleq z - H\bar{x}$ é o vetor de medidas modificado, $(1 \times m + r_e)$.

Eliminando a variável \hat{x} da equação (4.10) tem-se a seguinte equação:

$$(HPH^T + R)\lambda_m = z - H\bar{x} \quad (4.16)$$

Comparando as equações (4.15) e (4.16) verifica-se que a matriz de covariância do vetor z é igual à inversa da matriz W , a qual é obtida no processo de solução da estimação de estados:

$$W^{-1} = HPH^T + R = \Omega \quad (4.17)$$

onde Ω_i é a Matriz de covariância do vetor de medidas z dado que a hipótese \mathcal{H}_i é verdadeira.

4.3.1 Implementação do Teste de Hipóteses

A modelagem da hipótese \mathcal{H}_i é realizada a partir dos resultados obtidos na modelagem da hipótese básica. Isto é possível já que os elementos da submatriz da matriz diagonal R , correspondentes às transações, podem ser interpretados como os *inversos* dos pesos associados às informações contidas no bloco correspondente da matriz \mathcal{H}_i , ou seja, às informações do tipo $t_{ij} = 0$. Um valor alto na matriz R implica em atribuir um peso baixo para a informação correspondente na matriz H , o que equivale a inibir a restrição. Através deste artifício, é possível simular o número de transações realmente ativas em cada hipótese. Assim, se $R_T = R_{T,0}$ denota a submatriz de R com respeito às transações para o caso base, a variante correspondente à hipótese \mathcal{H}_i é dada por :

$$R_{T,i} = R_T + \Delta R_{T,i} \quad (4.18)$$

com $\Delta R_{T,i}$ da forma:

$$\Delta R_{T,i} = \text{diag}(0, 0, \dots, \zeta, 0, \zeta, 0, \dots, \zeta, 0, 0) \quad (4.19)$$

sendo que as posições não nulas na diagonal de $\Delta R_{T,i}$ correspondem às transações supostas ativas na hipótese \mathcal{H}_i , onde ζ é um número real positivo de valor alto. $\Delta R_{T,i}$ pode ser

escrita da seguinte forma:

$$\Delta R_{T,i} = \zeta E_i E_i^T \quad (4.20)$$

onde E_i é uma matriz $N_t \times N_{ti}$ cujas colunas são colunas da matriz identidade.

O sistema modificado para a hipótese \mathcal{H}_i é caracterizado pelo seguinte sistema de equações:

$$\begin{bmatrix} -P^{-1} & H^T \\ H & R + \zeta E_i E_i^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_i \\ \lambda_{mi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -P^{-1} \bar{x} \\ z \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

a matriz de coeficientes na equação (4.21) pode ser descomposta como:

$$\begin{bmatrix} -P^{-1} & H^T \\ H & R + \zeta E_i E_i^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -P^{-1} & H^T \\ H & R \end{bmatrix} + \zeta \begin{bmatrix} 0 \\ E_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & E_i^T \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

Aplicando a fórmula de Sherman-Morrison-Woodbury [26], temos que :

$$\begin{bmatrix} -P^{-1} & H^T \\ H & R + \zeta E_i E_i^T \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} -\Sigma & B^T \\ B & W \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -\Sigma & B^T \\ B & W \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ E_i \end{bmatrix} \times \\ M_i \begin{bmatrix} 0 & E_i^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\Sigma & B^T \\ B & W \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

onde:

$$M_i = \left(\zeta^{-1} I + \begin{bmatrix} 0 & E_i^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\Sigma & B^T \\ B & W \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ E_i \end{bmatrix} \right)^{-1} \quad (4.24)$$

$$= \left(\zeta^{-1} I + E_i^T W E_i \right)^{-1} \quad (4.25)$$

Assim, a solução do sistema modificado é dada por:

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_i \\ \lambda_{mi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \lambda_m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -\Sigma & B^T \\ B & W \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ E_i \end{bmatrix} M_i E_i^T \lambda_m \quad (4.26)$$

Definindo-se:

$$\begin{bmatrix} -\Sigma_i & B_i^T \\ B_i & W_i \end{bmatrix} \triangleq \begin{bmatrix} -P^{-1} & H^T \\ H & R + \zeta E_i E_i^T \end{bmatrix}^{-1} \quad (4.27)$$

uma expressão para o cálculo da matriz $W_i = \Omega_i^{-1}$ pode ser obtida através da equação (4.23):

$$\begin{bmatrix} -\Sigma_i & B_i^T \\ B_i & W_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\Sigma & B^T \\ B & W \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -\Sigma & B^T \\ B & W \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ E_i \end{bmatrix} M_i \begin{bmatrix} 0 & E_i^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\Sigma & B^T \\ B & W \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

Desta forma, $W_i = \Omega_i^{-1}$ é dado por:

$$W_i = \Omega_i^{-1} = W - W E_i M_i E_i^T W \quad (4.29)$$

A equação (4.29) conclui a determinação dos fatores necessários para os cálculos da função densidade de probabilidade condicional $f(z | \mathcal{H}_i)$, apresentada na equação (4.6), e das probabilidades condicionais (*a posteriori*) da equação (4.1), para cada uma das 2^{N_t} possíveis combinações de transações.

4.4 Técnicas Computacionais Implementadas

Conforme descrito na seção 4.3, o cálculo do determinante da matriz $\Omega_i^{-1} = W_i$ e dos multiplicadores de Lagrange referentes à hipótese \mathcal{H}_i são imprescindíveis para o cálculo das probabilidades condicionais apresentadas pela equação (4.1), razão pela qual as técnicas usadas na implementação serão descritas a seguir [3].

4.4.1 Cálculo do determinante de W_i

É possível se verificar que o determinante do bloco da matriz W_{11}^i correspondente às medidas do sistema fornece a mesma informação que o determinante da matriz W [3]. Sendo assim, é preferível se efetuar o cálculo do determinante da matriz W_{11}^i , com a finalidade de reduzir o esforço computacional.

Reformulando a equação (4.17) e particionando-a na forma matricial com o fim de separar a parte da matriz correspondente às medidas, temos:

$$\begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} \\ W_{21} & W_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_1 P H_1^T + R_1 & H_1 P H_2^T \\ H_2 P H_1^T & H_2 P H_2^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

onde:

W_{11}^i : parte da matriz W_i correspondente às medidas do sistema ($m \times m$);

W_{22}^i : parte da matriz W_i correspondente restrições estruturais do sistema ($r_e \times r_e$);

H_1 : parte da matriz Jacobiana do sistema que relaciona as medidas às variáveis de estados, ($m \times (N_b + N_t)$);

H_2 : parte da matriz Jacobiana do sistema que relaciona as restrições estruturais do sistema às variáveis de estados ($r_e \times (N_b + N_t)$);

$r_e = N_E + N_t + 1$: número de restrições estruturais do sistema, correspondente às restrições das barras de injeção nula, à simulação das possíveis transações presentes no sistema e à restrição da barra de referência;

I : matriz identidade.

Da equação (4.30) tem-se que:

$$W_{11}H_1PH_2^T + W_{12}H_2PH_2^T = 0 \quad (4.31)$$

de onde:

$$W_{12} = -W_{11}H_1PH_2^T(H_2PH_2^T)^{-1} \quad (4.32)$$

Assim,

$$H_1PH_2^T(H_2PH_2^T)^{-1} = -W_{11}^{-1}W_{12} \quad (4.33)$$

De

$$W_{21}H_1PH_2^T + W_{22}H_2PH_2^T = I \quad (4.34)$$

temos que:

$$W_{22} = (H_2PH_2^T)^{-1} - W_{21}H_1PH_2^T(H_2PH_2^T)^{-1} \quad (4.35)$$

Combinando as equações (4.33) e (4.35) obtemos:

$$W_{22} = (H_2PH_2^T)^{-1} + W_{21}W_{11}^{-1}W_{12} \quad (4.36)$$

Escrevendo a equação (4.29) na forma matricial de forma similar à aplicada à equação (4.17), temos que:

$$\begin{bmatrix} W_{11}^i & W_{12}^i \\ W_{21}^i & W_{22}^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} \\ W_{21} & W_{22} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} \\ W_{21} & W_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{1i} \\ E_{2i} \end{bmatrix} M_i \begin{bmatrix} E_{1i}^T & E_{2i}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} \\ W_{21} & W_{22} \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

onde:

E_{1i}^T : matriz nula correspondente às medidas do sistema ($m \times N_{ti}$);

E_{2i}^T : matriz cujas colunas são colunas da matriz identidade, correspondente às restrições estruturais do sistema, ($r_e \times N_{ti}$).

Usando o fato que $W_{21} = W_{21}^T$ temos:

$$W_{11}^i = W_{11} - W_{12} E_{2i} M_i E_{2i}^T W_{12}^T \quad (4.38)$$

Re-escrevendo a equação anterior:

$$W_{11}^i = W_{11} \left(I_m - W_{11}^{-1} W_{12} E_{2i} M_i E_{2i}^T W_{12}^T \right) \quad (4.39)$$

onde I_m é uma matriz identidade, ($m \times m$). Portanto, o determinante da matriz W_{11}^i é dado por:

$$\det(W_{11}^i) = \det(W_{11}) \det\left(I_m - W_{11}^{-1} W_{12} E_{2i} M_i E_{2i}^T W_{12}^T\right) \quad (4.40)$$

Utilizando as propriedades do determinante do produto de matrizes ([27], pág. 111), a equação (4.40) torna-se:

$$\det(W_{11}^i) = \det(W_{11}) \det(I_{N_{ti}} - M_i E_{2i}^T W_{12}^T W_{11}^{-1} W_{12} E_{2i}) \quad (4.41)$$

de forma que a matriz $(I_m - W_{11}^{-1} W_{12} E_{2i} M_i E_{2i}^T W_{12}^T)$, de ordem $(m \times m)$ foi transformada na matriz $(I_{N_{ti}} - M_i E_{2i}^T W_{12}^T W_{11}^{-1} W_{12} E_{2i})$ de ordem $(N_{ti} \times N_{ti})$. Isto reduz de forma considerável a dimensão da matriz e conseqüentemente o esforço computacional para calcular seu determinante.

Da equação (4.36) ainda temos que o termo $W_{21} W_{11}^{-1} W_{12}$ que aparece no lado direito de (4.41) pode ser expresso como:

$$W_{21} W_{11}^{-1} W_{12} = - (H_2 P H_2^T)^{-1} + W_{22} \quad (4.42)$$

Assim,

$$E_{2i}^T W_{12}^T W_{11}^{-1} W_{12} E_{2i} = -E_{2i}^T (H_2 P H_2^T)^{-1} E_{2i} + E_{2i}^T W_{22} E_{2i} \quad (4.43)$$

Calculando o limite de M_i , definida em (4.25), quando $\zeta \rightarrow \infty$, fica:

$$M_i = (E_{2i}^T W_{22} E_{2i})^{-1} \quad (4.44)$$

Então, quando $\zeta \rightarrow \infty$ temos:

$$I_{N_{ii}} - M_i E_{2i}^T W_{12}^T W_{11}^{-1} W_{12} E_{2i} = M_i E_{2i}^T \left(H_2 P H_2^T \right)^{-1} E_{2i} \quad (4.45)$$

e o cálculo do determinante da matriz $W_{11}^i = \Omega_i^{-1}$ fica reduzido a:

$$\det \left(W_{11}^i \right) = \det \left(W_{11} \right) \det \left(M_i E_{2i}^T \left(H_2 P H_2^T \right)^{-1} E_{2i} \right) \quad (4.46)$$

Desta forma, o esforço computacional para calcular o determinante da matriz $\Omega_i^{-1} = W_{11}^i$, necessário à determinação da função densidade de probabilidade condicional apresentado na equação (4.6) para cada hipótese, torna-se bastante reduzido. Da equação (4.46) pode-se observar que o cálculo do determinante da matriz W_{11} é realizado apenas uma vez, razão pela qual o esforço computacional para se obter o determinante da matriz W_{11}^i , correspondente a hipótese \mathcal{H}_i , fica determinado pelo cálculo do determinante da matriz $M_i E_{2i}^T \left(H_2 P H_2^T \right)^{-1} E_{2i}$. A ordem desta matriz está determinada pelo número de transações ativas na hipótese \mathcal{H}_i , o qual é muito menor que o número de medidas [3].

4.4.2 Cálculo do expoente de $f(z | \mathcal{H}_i)$

A implementação do cálculo do expoente da função densidade de probabilidade condicional, apresentado na equação (4.6), é realizado fazendo uso da solução do sistema modificado (4.28), resultante da aplicação da fórmula de Sherman-Morrison.

Da equação (4.6), o expoente é definido como:

$$\exp_i = (z_m)^T (\Omega_i)^{-1} (z_m) \quad (4.47)$$

onde $z_m = z - H\bar{x}$ é o vetor de medidas modificado.

Da equação (4.15) pode-se observar que $\lambda_m = Wz_m$, com $W = (\Omega)^{-1}$. Assim, o cálculo do expoente pode ser escrito como:

$$\exp_i = (z - H\bar{x})^T \lambda_{mi} \quad (4.48)$$

Usando a equação (4.28), λ_{mi} pode ser escrito como:

$$\lambda_{mi} = \begin{bmatrix} 0 & I \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \lambda_m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -\Sigma & B^T \\ B & W \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ E_i \end{bmatrix} M_i E_i^T \lambda_m \right) \quad (4.49)$$

e

$$\begin{aligned} (z - H\bar{x}) \lambda_{mi} &= \begin{bmatrix} 0 & (z - H\bar{x})^T \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \lambda_m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -\Sigma & B^T \\ B & W \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ E_i \end{bmatrix} M_i E_i^T \lambda_m \right) \\ &= (z - H\bar{x})^T \lambda_m - \begin{bmatrix} 0 & (z - H\bar{x})^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\Sigma & B^T \\ B & W \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ E_i \end{bmatrix} \times \\ &\quad M_i E_i^T \lambda_m \end{aligned} \quad (4.50)$$

Definindo-se a seguinte fatoração para a matriz de coeficientes referentes à hipótese \mathcal{H}_0 :

$$\begin{bmatrix} -\Sigma & B^T \\ B & W \end{bmatrix} = U^{-1} D^{-1} U^{-T} \quad (4.51)$$

e substituindo a equação (4.51) na equação (4.50), $(z - H\bar{x})^T \lambda_m$ pode ser escrito

como:

$$\begin{aligned}
 (z - H\bar{x})^T \lambda_{mi} &= (z - H\bar{x})^T \lambda_m - \begin{bmatrix} 0 & (z - H\bar{x})^T \end{bmatrix} U^{-1} D^{-1} U^{-T} \times \\
 &\quad \begin{bmatrix} 0 \\ E_i \end{bmatrix} M_i E_i^T \lambda_m \\
 &= (z - H\bar{x})^T \lambda_m - \begin{bmatrix} 0 & \tilde{z}^T \end{bmatrix} D^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ E'_i \end{bmatrix} M_i E_i^T \lambda_m
 \end{aligned} \tag{4.52}$$

onde:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \tilde{z}' \end{bmatrix} = U^{-T} \begin{bmatrix} 0 \\ (z - H\bar{x}) \end{bmatrix} \tag{4.53}$$

e

$$E'_i = U^{-T} \begin{bmatrix} 0 \\ E_i \end{bmatrix} \tag{4.54}$$

As equações (4.52) a (4.54) finalizam a descrição das técnicas utilizadas para o cálculo da função densidade de probabilidade condicional $f(z | \mathcal{H}_i)$, como apresentada na equação (4.6). Com estes resultados, podemos proceder ao cálculo das probabilidades condicionais *a posteriori*, conforme mostrado na equação (4.1), para cada uma das 2^{N_t} possíveis combinações das possíveis transações presentes no sistema.

4.5 Limites na identificação de transações bilaterais

Na obtenção de resultados numéricos a partir do método de identificação de transações proposto, foi observado que há um limite máximo no número de transações que podem ser simultaneamente identificadas. A existência de tal limite é esperada, e é fortemente relacionada à questão de observabilidade de sistemas de potência. Na sequência, é esclarecida a causa da existência do limite. Mostra-se também que o número máximo de transações que podem ser identificadas depende de N_E , que é o número de barras de fronteira do sistema.

Partindo da equação (3.39) e considerando a parte da matriz G correspondente às barras de injeção nula, denotada por G_2 , obtemos a seguinte expressão:

$$\bar{H} = \begin{matrix} & N_b & N_t \\ \begin{matrix} m \\ N_E \end{matrix} & \begin{bmatrix} H & 0 \\ G_2 & -M \end{bmatrix} \end{matrix}$$

onde:

\bar{H} : matriz de observação do modelo de medição, $(m \times N_b)$;

G_2 : matriz de observação correspondente às barras de injeção nula $(N_E \times N_b)$;

M : matriz com a informação dos fatores de participação para as N_t transações.

Supondo que a rede elétrica é observável no sentido convencional e denotando por $\rho(\cdot)$ o posto de matriz, então:

$$\rho(H) = N_b \tag{4.55}$$

e portanto:

$$\rho(\bar{H}) = N_b + \rho(M) \quad (4.56)$$

Na equação (3.32) temos que $p_k = (s^k - b^k) t_k = m_k t_k$. Para o caso sem perdas, o balanço de potência entre as injeções de potência dos geradores e as injeções nas barras dos compradores é nulo. Assim,

$$e^T m_K = 0 \quad (4.57)$$

onde:

e : vetor $1 \times N_t$ de elementos todos unitários;

m_K : coluna da matriz de transações M ,
correspondente à transação K .

Generalizando a equação (4.57) temos que:

$$e^T M = 0 \quad (4.58)$$

onde M é a matriz $N_E \times N_t$ relativa às injeções externas e às possíveis transações, cujos elementos são os fatores de participação das barras que as envolvem.

Assim:

$$\rho(M) \leq N_E - 1 \quad (4.59)$$

e

$$\rho(\bar{H}) \leq N_b + N_E - 1 \quad (4.60)$$

Para que \bar{H} tenha posto completo, isto é, $\rho(\bar{H}) = N_b + N_t$, temos que:

$$N_b + N_t \leq N_b + N_E - 1 \quad (4.61)$$

logo:

$$N_t \leq N_E - 1 \quad (4.62)$$

Da equação (4.58) observa-se que a matriz M tem, no máximo, $N_E - 1$ colunas linearmente independentes. Assim, uma condição necessária para se estimar t (na ausência de outras informações sobre as transações) é que $N_t \leq N_E - 1$.

Uma transação é dita *reconhecidamente inativa* se é inicialmente considerada inativa e posteriormente esta hipótese é confirmada pelo procedimento de teste de hipóteses. Se se tem conhecimento de que pelo menos uma transação é reconhecidamente inativa, então esta informação adicional contribui para possibilitar a estimativa dos valores das demais transações existentes. Isto decorre do fato de que a informação $t_i = 0$ relativa à transação reconhecidamente inativa, quando adicionada à equação (3.33), contribui para aumentar o posto da submatriz de transações. Portanto dependendo do número total de transações, a disponibilidade de transações *reconhecidamente inativas* pode viabilizar a estimação das transações mesmo se a desigualdade (4.62) não for respeitada.

4.6 Conclusões

Neste capítulo apresentaram-se as definições básicas para a implementação do teste de hipóteses aplicada à identificação de transações não-reveladas num sistema de potência.

Uma descrição detalhada das técnicas computacionais utilizadas na implementação do teste de hipóteses foi apresentada, dado que seu uso implica num aumento da eficiência computacional na implementação deste teste aplicado a sistemas de potência.

A implementação do teste de hipóteses evita a execução do estimador de estados para cada combinação de transações no sistema, reduzindo o grande esforço computacional que estes cálculos implicariam. Assim, o estimador de estados é executado uma única vez. A partir dos resultados obtidos, é implementado o cálculo do teste de hipóteses, de forma a fornecer aquela combinação de transações que apresente a maior probabilidade de estar presente no sistema para o plano de medição dado.

Neste capítulo também se investigou a existência de limites no número de transações que podem ser simultaneamente identificadas, e quais são os fatores que afetam estes limites.

CAPÍTULO 5

Simulações e Resultados

Numéricos

5.1 Introdução

Este capítulo apresenta todos os resultados de simulação referentes à implementação do teste de hipóteses para a identificação de transações não-reveladas. Basicamente, os resultados apresentados foram obtidos com a implementação do estimador de estados e o teste de hipóteses descritos nos Capítulos 3 e 4.

O desempenho da metodologia proposta neste trabalho foi avaliado com base nos resultados obtidos para três sistemas: sistema-teste de 5 barras, sistema IEEE de 14 barras e sistema IEEE de 118 barras, cujos diagramas unifilares, indicando um plano de medição que garanta a observabilidade do sistema, são apresentados neste capítulo. Na Tabela 5.1 são apresentadas as características principais para cada um dos sistemas-teste.

Os casos correspondentes ao sistema-teste de 5 barras e ao sistema IEEE de 14 barras, simulam a identificação de transações bilaterais não-reveladas para o caso em que estas transações sejam do tipo transações extra-área, como descrito na seção 2.2. Já os casos correspondentes ao sistema IEEE de 118 barras simulam a identificação de transações bilaterais não-reveladas para o caso em que estas transações sejam do tipo transações intra-área, também descrito na seção 2.2.

Os parâmetros correspondentes às linhas de transmissão, geradores e cargas dos sistemas teste de 5 barras e sistema IEEE de 14 barras são mostrados no Apêndice A. Os dados correspondentes ao sistema IEEE de 118 barras são apresentados em [28], com a diferença de que as injeções nas barras de fronteira (a serem definidas na seção 5.5) são consideradas nulas, mediante a distribuição proporcional de seus valores de injeção entre as barras adjacentes a elas.

TABELA 5.1: Dados gerais para o sistema teste de 5 barras (ST-5), IEEE 14 barras e IEEE 118 barras

Sistema-teste	ST-5	IEEE-14	IEEE-118
Número de Barras	5	14	118
Número de Linhas	6	20	179
No. de Medidas de Fluxo	5	23	179
No. de Medidas de Injeções	2	9	110
Número Total de Medidas	7	32	289

5.2 Descrição do software implementado

As simulações foram implementadas a partir da elaboração de um programa codificado em FORTRAN e executado em microcomputadores de tipo Pentium 233 Mhz, com 32 Mbytes de memória RAM.

O programa foi dividido em duas etapas: Na primeira, **Tr_idprep**, é realizado basicamente um processamento dos dados do sistema, com a finalidade de gerar as telemidas necessárias para serem usadas pelo estimador de estados. Na segunda etapa, **Tr_ident**, é realizada a estimação de estados propriamente, dita assim como a implementação do teste de hipóteses, de forma a identificar a combinação de transações não-reveladas que realmente estão sendo efetuadas no sistema. Dadas as características do problema, ambas etapas fazem uso de técnicas de esparsidade, conforme descrito em [29].

Na primeira etapa é executado o fluxo de carga, cujos resultados, em adição à informação do plano de medição, formam a base para a geração de um conjunto de telemidas usadas pelo estimador de estados. Para isto, são superpostos ruídos aleatórios normalmente distribuídos às grandezas indicadas pelo plano de medição. Esta tarefa é executada pelo programa **INPNML**, que utiliza como entrada, resultados de um fluxo de potência para as tensões, os fluxos nas linhas e as injeções nas barras do sistema de potência, bem como um plano de medição observável previamente projetado. A magnitude do ruído aleatório introduzido pelo programa **INPNML** depende da precisão atribuída aos medidores. Normalmente é atribuída uma precisão igual a 1×10^{-3} para voltímetros e 1×10^{-2} para medidores de fluxos e injeções de potência. Os valores das variâncias atribuídas às medidas são calculados com base no valor da medida e na precisão do medidor associado a ela.

Na segunda etapa da implementação é realizada a estimação de estados utilizando as telemidas geradas na primeira etapa. A estimação é baseada na solução do sistema linear apresentado na seção 3.3.3, sendo que, para todos os casos, o conhecimento do vetor de informação *a priori* é considerado unicamente para os ângulos das barras do sistema

($\bar{\theta}_i = 0$ para $i = 1, N_b$). Uma vez realizada a estimação de estados, é realizado o teste de hipóteses, tanto para a hipótese nula quanto para todas as combinações possíveis das transações presentes no sistema. Para tal, são calculadas as probabilidades condicionais para cada hipótese. Obtém-se como resultado final a combinação de transações não-reveladas que apresenta a maior probabilidade de estar ocorrendo no sistema de potência. Uma vez reconhecida a combinação de transações que apresenta a maior probabilidade de ocorrência, as restrições correspondentes às transações presentes são relaxadas e o estimador é novamente executado, com o objetivo de fornecer os valores dos estados e das transações que efetivamente ocorrem no sistema.

5.3 Sistema teste de 5 barras (ST-5)

A Figura 5.1 apresenta o diagrama unifilar para o sistema teste de 5 barras, indicando o plano de medição escolhido. Neste caso, as barras 3, 4 e 5 foram escolhidas como barras de fronteira, ou seja, foram simuladas como barras de injeção nulas dentro das restrições do método da matriz aumentada de Hachtel, tal como apresentado no Capítulo 3.

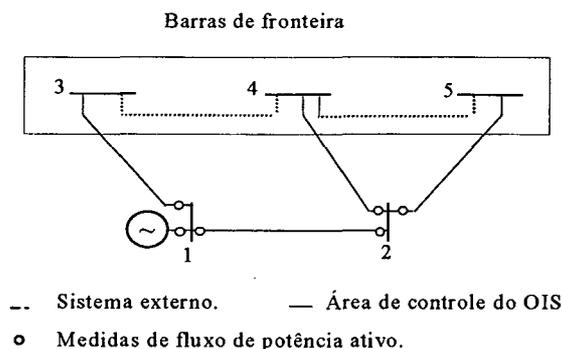


FIGURA 5.1: Sistema-teste 5 barras

A matriz Jacobiana para o sistema de 5 barras é dada abaixo:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} H \\ G \end{bmatrix} = \begin{matrix} & \theta_1 & \theta_2 & \theta_3 & \theta_4 & \theta_5 & T_{r1} & T_{r2} \\ t_{12} & 2.5 & -2.5 & & & & & \\ t_{21} & -2.5 & 2.5 & & & & & \\ t_{13} & 4 & & -4 & & & & \\ t_{24} & & 5 & & -5 & & & \\ t_{25} & & 8 & & & -8 & & \\ p_1 & 6.5 & -2.5 & -4 & & & & \\ p_2 & -2.5 & 15.5 & & -5 & -8 & & \\ \theta_1 & 1 & & & & & & \\ p_3 & -4 & & 7.33 & -3.33 & & -1 & \\ p_4 & & -5 & -3.33 & 10.33 & -2 & & -1 \\ p_5 & & -8 & & -2 & 10 & 1 & 1 \\ T_{r1} & & & & & & 1 & \\ T_{r2} & & & & & & & 1 \end{matrix} \quad (5.1)$$

onde:

H : matriz de observação do modelo de medição, a qual depende dos parâmetros das linhas ($m \times (N_b + N_t)$);

G : matriz de observação correspondente à restrição da barra de referência, às restrições das barras de injeção nula e à simulação das possíveis transações presentes no sistema ($r_e \times (N_b + N_t)$);

$r_e = N_E + N_t + 1$: número de restrições estruturais do sistema, incluindo as restrições das barras de injeção nula, as possíveis transações presentes no sistema e a restrição da barra de referência.

As transações consideradas para este caso são descritas na Tabela 5.2. Por simplicidade, foi considerado que cada transação envolve somente um produtor e um consumidor. Assim, se p e c são as barras do produtor e do consumidor, respectivamente, os fatores de participação são $\sigma_p = 1$ e $\sigma_k = 0$, para todos os $k \neq p$, e, similarmente, $\beta_c = 1$ e $\beta_k = 0$, para todos os $k \neq c$.

TABELA 5.2: Informação de transações para o sistema teste de 5 barras

Trans.	Barra p	Barra c	Valor (pu)
T_{r1}	3	5	0.50
T_{r2}	4	5	0.25
T_{r3}	3	4	0.25

5.3.1 Caso A

Neste caso apenas as transações T_{r1} e T_{r2} , apresentadas na Tabela 5.2, são consideradas como possíveis transações, sendo que a transação T_{r1} efetivamente está acontecendo no sistema (combinação 10). Os resultados deste caso são apresentados nas Tabelas 5.3 e 5.7. A Tabela 5.3 apresenta a probabilidade condicional da hipótese \mathcal{H}_i ocorrer, dadas as medidas z , $P(\mathcal{H}_i | z)$ e os valores dos multiplicadores de Lagrange associados tanto à hipótese básica \mathcal{H}_0 quanto à hipótese alternativa, que representam o estado de operação atual do sistema de potência, \mathcal{H}_i . Na primeira coluna da Tabela 5.7 são apresentados os valores estimados para as correspondentes transações.

TABELA 5.3: Multiplicadores de Lagrange e Probabilidades a Posteriori - Caso A

Comb.	$P(\mathcal{H}_i z)$	$(\lambda_N)_{\max}$
00	0.0000	347.24
10	0.9963	1.48
01	0.0000	–
11	0.0037	–

5.3.2 Caso B

Neste caso só as transações T_{r1} e T_{r2} , apresentadas na Tabela 5.2, são consideradas como possíveis transações, sendo que efetivamente ambas estão acontecendo no sistema (combinação 11). Os resultados deste caso são apresentados nas Tabelas 5.4 e 5.7. A Tabela 5.4 apresenta a probabilidade condicional $P(\mathcal{H}_i | z)$ e os valores dos multiplicadores de Lagrange associados tanto à hipótese básica \mathcal{H}_0 quanto à hipótese alternativa, que representam o estado de operação atual do sistema de potência, \mathcal{H}_i . Na segunda coluna da Tabela 5.7 são apresentados os valores estimados para as correspondentes as transações simuladas neste caso.

TABELA 5.4: Multiplicadores de Lagrange e Probabilidades a Posteriori - Caso B

Comb.	$P(\mathcal{H}_i z)$	$(\lambda_N)_{\max}$
00	0.00	488.32
10	0.00	–
01	0.00	–
11	1.00	0.88

5.3.3 Caso C

Neste caso as transações T_{r1} , T_{r2} e T_{r3} são consideradas como possíveis transações, sendo que apenas a transação T_{r3} está acontecendo no sistema (combinação 001). Os resul-

tados do caso são apresentados nas Tabelas 5.5 e 5.7. A Tabela 5.5 apresenta os valores das probabilidades condicionais para cada hipótese $P(\mathcal{H}_i | z)$, e os valores dos multiplicadores de Lagrange associados tanto à hipótese básica \mathcal{H}_0 quanto à hipótese alternativa. Na terceira coluna da Tabela 5.7 são apresentados os valores estimados para as correspondentes as transações simuladas neste caso.

TABELA 5.5: Multiplicadores de Lagrange e Probabilidades a Posteriori - Caso C

Comb.	$P(\mathcal{H}_i z)$	$(\lambda_N)_{\max}$
000	0.0000	602.32
100	0.0000	—
010	0.0000	—
001	0.9921	1.3789
110	0.0023	—
101	0.0024	—
011	0.0024	—
111	0.0007	—

5.3.4 Caso D

Neste caso as transações T_{r1} , T_{r2} e T_{r3} são consideradas como possíveis transações, sendo que só as transações T_{r1} e T_{r2} estão efetivamente acontecendo no sistema (combinação 110). Os resultados do caso são apresentados nas Tabelas 5.6 e 5.7. Na Tabela 5.6 são apresentado os valores correspondentes às probabilidades condicionais $P(\mathcal{H}_i | z)$ e os valores dos multiplicadores de Lagrange associados tanto à hipótese básica \mathcal{H}_0 quanto à hipótese alternativa. Na quarta coluna da Tabela 5.7 são apresentados os valores estimados para as transações simuladas neste caso.

TABELA 5.6: Multiplicadores de Lagrange e Probabilidades a Posteriori - Caso D

Comb.	$P(\mathcal{H}_i z)$	$(\lambda_N)_{\max}$
000	0.0000	487.11
100	0.0000	—
010	0.0000	—
001	0.0000	—
110	0.3488	1.4977
101	0.2882	—
011	0.2554	—
111	0.1076	—

TABELA 5.7: Valores estimados das transações para os casos A, B, C e D (ST-5)

Trans.	Caso A (pu)	Caso B (pu)	Caso C (pu)	Caso D (pu)
T_{r1}	0.4984	0.5002	0.0000	0.4996
T_{r2}	0.0000	0.2499	0.0000	0.2504
T_{r3}	—	—	0.2563	0.0000

5.3.5 Discussão dos Resultados para Sistema Teste ST-5

Em síntese, os resultados obtidos para os casos A , B , C e D , mostram que o máximo valor dos multiplicadores de Lagrange normalizados $(\lambda_N^0)_{\max}$, correspondente à hipótese básica \mathcal{H}_0 , apresenta um valor alto para todos os casos, implicando em que os dados existentes não suportam a hipótese básica, a qual é rejeitada.

Uma vez determinado que os dados existentes não suportam a hipótese básica é realizado o cálculo das probabilidades a posteriori para as hipóteses alternativas. Nas Tabelas 5.3, 5.4, 5.5 que correspondem aos caso A , B e C respectivamente, podem-se observar que os valor da probabilidade para a combinação de transações que estão realmente presentes no sistema são $P(10) = 0.9963$, $P(11) = 1,0000$ e $P(001) = 0.9921$ respectivamente. Já para o caso D , o valor da probabilidade para a combinação das transações realmente ocorrem é

$P(110) = 0.3488$. Este valor de probabilidade é relativamente baixo, e não corrobora exatamente a combinação de transações real. Isto se deve à existência de um número máximo de transações que podem ocorrer na rede e ainda serem detectáveis. O número máximo de transações detectáveis depende do número de barras de fronteira do sistema como foi demonstrado na Seção 4.5 no Capítulo 4.

Uma vez identificada a combinação de transações que é suportada pelos dados existentes, as restrições correspondentes às transações presentes foram relaxadas e o estimador foi novamente executado, estimando corretamente nesta tentativa os valores dos estados e das transações. Isto pode ser constatado na Tabela 5.7, para todos os casos considerados nesta seção.

Na coluna correspondente a $(\lambda_N)_{\max}$ nas Tabelas 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6 é indicado que o valor máximo do multiplicador de Lagrange associado à combinação identificada, $(\lambda_N)_{\max}$, apresenta sempre um valor inferior a 3.0; este é usualmente o limiar estabelecido para a identificação de erros grosseiros em estimação de estados. Os valores estimados das transações, apresentados na Tabela 5.7, são boas estimativas para os valores originalmente simulados, apresentados na Tabela 5.2.

5.4 Sistema teste IEEE-14 barras (ST-14)

A Figura 5.2 apresenta o diagrama unifilar para o sistema de 14 barras IEEE, indicando o plano de medição escolhido. Neste caso, as barras 4, 9, 12, 13 e 14 foram escolhidas como barras de fronteira. As transações consideradas são apresentadas na Tabela 5.9.

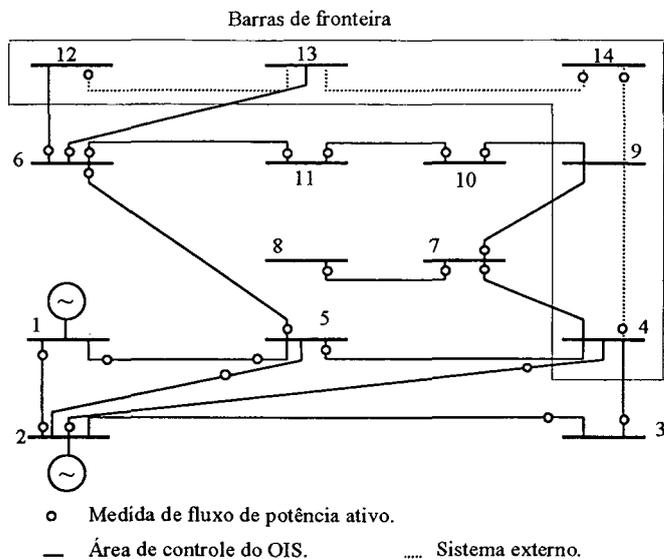


FIGURA 5.2: Sistema IEEE-14 barras

TABELA 5.8: Informação de transações para o sistema IEEE-14 barras, caso A

Trans.	Barra p	σ_p	Barra c	β_c	Valor (pu)
T_{r1}	4	0.7	13	1	0.23
	12	0.3			
T_{r2}	12	0.6	9	1	0.77
	14	0.4			
T_{r3}	4	1	14	1	0.63

5.4.1 Caso A

As transações T_{r1} , T_{r2} e T_{r3} , apresentadas na Tabela 5.8, são consideradas como possíveis transações, sendo que efetivamente apenas T_{r1} e T_{r2} estão acontecendo no sistema (combinação 110). Este caso considera que as possíveis transações envolvem varios produtores e um único consumidor, ou seja, envolvem fatores de participação não-unitarios. Assim, σ_p e β_c representam os fatores de participação do produtor e do consumidor respec-

vamente para cada transação.

TABELA 5.9: Informação de transações para o sistema IEEE-14 barras, casos B-D

Trans.	Barra p	Barra c	Valor (pu)
T_{r1}	12	13	0.23
T_{r2}	14	9	0.77
T_{r3}	4	14	0.63
T_{r4}	4	12	0.16
T_{r5}	13	9	0.33

5.4.2 Caso B

As transações T_{r1} , T_{r2} , T_{r3} e T_{r4} , apresentadas na Tabela 5.9, são consideradas como possíveis transações, porém apenas as transações T_{r1} e T_{r2} estão acontecendo efetivamente no sistema (combinação 1100).

5.4.3 Caso C

As transações T_{r1} , T_{r2} , T_{r3} e T_{r4} , apresentadas na Tabela 5.9, são consideradas como possíveis transações, sendo que, dentre estas, apenas as transações T_{r1} , T_{r2} e T_{r3} estão acontecendo efetivamente no sistema (combinação 1110).

5.4.4 Caso D

As transações T_{r1} , T_{r2} , T_{r3} , T_{r4} e T_{r5} , apresentadas na Tabela 5.9, são consideradas como possíveis transações, porém somente as transações T_{r1} , T_{r2} , T_{r3} e T_{r4} estão acontecendo efetivamente no sistema (combinação 11110).

Por simplicidade; as Tabelas 5.10 e 5.11, que apresentam os resultados para todos os casos simulados para o sistema IEEE 14 barras, indicam apenas valores correspondentes

à hipótese básica \mathcal{H}_0 e à hipótese alternativa \mathcal{H}_i , assim como os valores estimados das transações para todos os casos apresentados.

TABELA 5.10: Multiplicadores de Lagrange e Probabilidades a Posteriori - Sistema IEEE-14 barras

Caso	$(\lambda_N^0)_{\max}$	Max. $P(\mathcal{H}_i z)$		$(\lambda_N^f)_{\max}$
		Valor	Comb	
<i>A</i>	340	0.9995	110	1.318
<i>B</i>	180	0.9930	1100	0.865
<i>C</i>	354	0.9994	1110	0.615
<i>D</i>	342	0.2761	11110	0.6020

TABELA 5.11: Valores estimados das transações para o sistema IEEE-14 barras

Trans.	Caso <i>A</i>	Caso <i>B</i>	Caso <i>C</i>	Caso <i>D</i>
T_{r1}	0.2298	0.2299	0.2298	0.2300
T_{r2}	0.7702	0.7698	0.7696	0.7695
T_{r3}	0.0000	0.0000	0.6296	0.6294
T_{r4}	–	0.0000	0.0000	0.1603
T_{r5}	–	–	–	0.0000

5.4.5 Discussão de Resultados para Sistema Teste ST-14

Para os casos *A*, *B* e *C* é possível observar que os valores das probabilidades a posteriori, correspondentes à combinação de transações que estão presentes no sistema, apresentam valores altos e muito próximos a 1. Para o caso *D*, o valor da probabilidade é muito menor, $P(11110) = 0.2761$. Isto novamente se deve ao fato de o limite existente no número de transações a serem identificadas ter sido atingido, como mostrado na seção 4.5.

Novamente pode ser verificado que o método proposto é adequado para a identificação da combinação de transações não-reveladas que estão sendo efetuadas no sistema. A correção dos resultados pode ser avaliada observando que os valores dos multiplicadores

de Lagrange, para a hipótese básica \mathcal{H}_0 são bastante elevados. Para a hipótese alternativa \mathcal{H}_i , por outro lado, os multiplicadores de Lagrange, apresentam um valor menor do que o limiar estabelecido para identificação de erros grosseiros. Comparando as Tabelas 5.10 e 5.11 verifica-se que os valores estimados para as transações são muito aproximados aos seus valores reais.

5.5 Sistema teste IEEE-118 barras (ST-118)

A Figura 5.3 apresenta o diagrama unifilar para o sistema de 118 barras IEEE, indicando o plano de medição escolhido. As barras 8, 19, 24, 27, 55, 62, 69 e 106 foram escolhidas como barras de fronteira. As transações consideradas são apresentadas na Tabela 5.12.

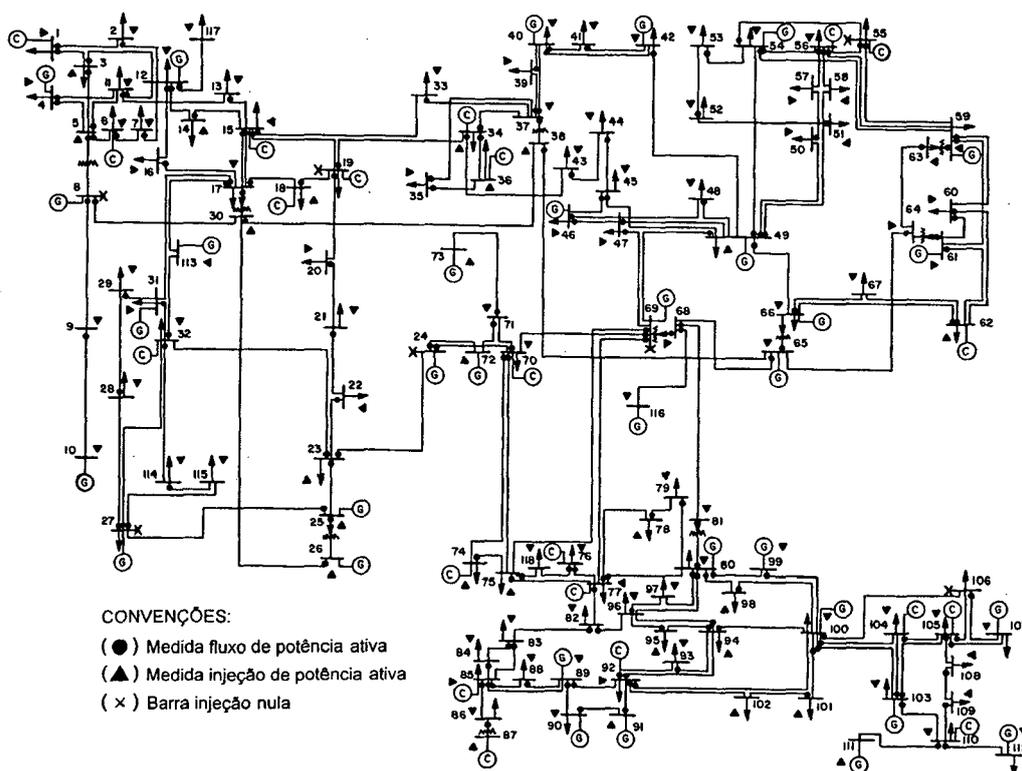


FIGURA 5.3: Sistema IEEE-118 barras

TABELA 5.12: Informação de transações para o sistema IEEE-118 barras

Trans.	Barra p	Barra c	Valor (pu)
T_{r1}	8	27	0.23
T_{r2}	55	19	0.77
T_{r3}	62	55	0.63
T_{r4}	106	24	0.16
T_{r5}	106	69	0.36
T_{r6}	8	69	0.42
T_{r7}	19	24	0.99
T_{r8}	27	62	0.57

5.5.1 Caso A

As transações T_{r1} , T_{r2} , T_{r3} e T_{r4} , apresentadas na Tabela 5.12, são consideradas como possíveis transações, sendo que apenas as transações T_{r1} , T_{r2} e T_{r4} estão acontecendo efetivamente no sistema (combinação 1101).

5.5.2 Caso B

As transações T_{r1} , T_{r2} , T_{r3} , T_{r4} , T_{r5} e T_{r6} , apresentadas na Tabela 5.12, são consideradas como possíveis transações, porém apenas as transações T_{r1} , T_{r2} , T_{r3} e T_{r4} estão acontecendo efetivamente no sistema (combinação 111100).

5.5.3 Caso C

As transações T_{r1} , T_{r2} , T_{r3} , T_{r4} , T_{r5} , T_{r6} , T_{r7} e T_{r8} , apresentadas na Tabela 5.12, são consideradas como possíveis transações, porém somente as transações T_{r1} , T_{r2} , T_{r3} e T_{r4} estão acontecendo efetivamente no sistema (combinação 11110000).

5.5.4 Caso D

As transações $T_{r1}, T_{r2}, T_{r3}, T_{r4}, T_{r5}, T_{r6}, T_{r7}$ e T_{r8} , apresentadas na Tabela 5.12, são consideradas como possíveis transações, sendo que, dentre destas, apenas as transações $T_{r1}, T_{r2}, T_{r3}, T_{r4}, T_{r5}$ e T_{r6} estão acontecendo efetivamente no sistema (combinação 11111100).

As Tabelas 5.13 e 5.14 apresentam os resultados para todos os casos simulados para o sistema IEEE 118 barras, indicando apenas os valores correspondentes à hipótese básica \mathcal{H}_0 e à hipótese alternativa \mathcal{H}_i , assim como os valores estimados das transações para todos os casos apresentados.

TABELA 5.13: Multiplicadores de Lagrange e Probabilidades a Priori - Sistema IEEE-118 barras

Caso	$(\lambda_N^g)_{\max}$	Max. $P(\mathcal{H}_i z)$		$(\lambda_N^f)_{\max}$
		Valor	Comb	
A	457.28	0.9993	1101	2.24
B	465.14	0.9970	111100	2.21
C	465.14	0.9874	11110000	2.21
D	459.20	0.9924	11111100	2.01

TABELA 5.14: Valores estimados das transações para o sistema IEEE-118 barras

Trans.	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D
T_{r1}	0.2295	0.2295	0.2295	0.2303
T_{r2}	0.7703	0.7708	0.7708	0.7709
T_{r3}	0.0000	0.6309	0.6309	0.6309
T_{r4}	0.1597	0.1598	0.1598	0.1587
T_{r5}	—	0.0000	0.0000	0.3614
T_{r6}	—	0.0000	0.0000	0.4179
T_{r7}	—	—	0.0000	0.0000
T_{r8}	—	—	0.0000	0.0000

5.5.5 Discussão de Resultados para Sistema Teste ST-118

Da mesma forma que nos casos anteriores, dos resultados apresentados para o sistema IEEE 118 barras nas Tabelas 5.13 e 5.14, é evidente que o procedimento do teste de hipóteses é efetivo na identificação da hipótese alternativa \mathcal{H}_i , a qual é corroborada pelos valores finais dos multiplicadores de Lagrange e pelos valores finais estimados para as transações ativas.

5.6 Conclusões

Neste capítulo foram apresentados os resultados numéricos obtidos com a aplicação do método proposto para identificação de TBNRs a 3 sistemas-teste: sistema-teste de 5 barras, IEEE-14 barras e IEEE-118 barras. Os resultados foram sumarizados em tabelas e sua interpretação foi detalhadamente discutida.

Através dos resultados apresentados neste capítulo, foi comprovado que a implementação da identificação de TBNRs por Testes de Hipóteses, através do uso dos resultados do estimador de estados, foi satisfatória para todos os casos, evitando o grande esforço computacional que implicaria a re-execução repetitiva do estimador de estados até que a combinação de transações suportada pelo valor das medidas fosse encontrada.

No seguinte e último capítulo, são apresentadas as conclusões finais desta dissertação e as sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 6

Conclusões

Este trabalho propõe uma abordagem para a identificação de transações não-reveladas em ambiente desregulamentado baseada no uso de estimação de estados e teste de hipóteses com enfoque Bayesiano.

Inicialmente foram discutidos aspectos gerais da reestruturação do mercado desregulamentado de energia. Em seguida foi apresentada a ferramenta de estimação de estados, usando um modelo linearizado de rede para garantir a observabilidade no sistema, foi considerada na formulação do problema a disponibilidade de informação a priori sobre os estados do sistema, modelada como parte da função-objetivo do problema de mínimos quadrados.

A ferramenta de estimação de estados foi aplicada de forma a incluir as transações como novas variáveis de estado. As barras do sistema sobre as quais podem ser efetuadas as transações foram simuladas como barras de injeção nula, sendo introduzidas na formulação como restrições de igualdade. Através da estimação de estados verifica-se se a hipótese básica \mathcal{H}_0 é respaldada pelas medidas presentes na rede elétrica. Este procedimento poderia

ser repetido para todas e cada uma das possíveis combinações das transações presentes no sistema, até se encontrar aquela combinação que seja coerente com os valores das medidas. No entanto, isto implicaria em um grande esforço computacional. Ao invés de re-estimação, propõe-se neste trabalho a aplicação de testes de hipóteses para selecionar a combinação de transações que têm maior probabilidade de estar ocorrendo no sistema. No processo de identificação das transações, foi constatada a existência de um limite sobre o número de transações identificáveis, que depende do número de barras de fronteira existentes no sistema.

Uma vez determinado que o plano de medição dá respaldo à hipótese básica \mathcal{H}_0 , o procedimento finaliza, determinando para este caso que nenhuma transação está ativa no sistema, sem a necessidade de realizar o teste de hipóteses. No caso em que o plano de medição não suporte a hipótese básica \mathcal{H}_0 , o que é verificado a partir dos valores apresentados pelos multiplicadores de Lagrange, os resultados provenientes do estimador de estados fornecem os dados necessários para a implementação do teste de hipóteses. Para cada hipótese alternativa \mathcal{H}_i , determina-se a probabilidade da mesma estar sucedendo no sistema. Finalmente, com a informação proveniente do teste de hipóteses, os valores das transações podem ser re-estimados, uma vez que as restrições associadas às transações realmente ativas no sistema são relaxadas.

Os resultados de todos os casos testados mostram claramente que a maior probabilidade de ocorrência está associada à combinação de transações previamente simulada como ativa. Uma vez realizada a identificação da combinação de transações que se encontram ativas no sistema, verifica-se igualmente que os valores re-estimados se aproximam bastante

dos valores simulados das transações.

Uma descrição detalhada das técnicas computacionais utilizadas na implementação do teste de hipóteses foi apresentada. A sua utilização levou a um aumento da eficiência computacional, já que o estimador de estados é executado uma única vez. Técnicas de esparsidade foram aplicadas, tanto para a simulação de medidas como para a implementação do teste de hipóteses, com vistas a obter um bom desempenho computacional.

Em síntese, a identificação de transações não-reveladas constitui uma ferramenta útil para o Operador Independente do Sistema. O método proposto pode ser utilizado para realizar corretamente tanto a cobrança pelo uso da rede de transmissão quanto a cobrança de penalizações associadas a congestionamentos que podem ser produzidos em alguns casos pela presença de transações não-reveladas.

6.1 Sugestões para Futuros Trabalhos

A seguir são apresentadas algumas sugestões que dariam continuidade à pesquisa efetuada nesta dissertação.

1. Estender a metodologia proposta ao caso AC, de forma a discriminar a participação das transações bilaterais, tanto nas perdas do sistema de transmissão quanto no congestionamento, com vistas a proporcionar ao OIS uma ferramenta útil para realizar as cobranças a elas associadas.
2. Considerar o processamento de erros grosseiros, realizando a formulação do estimador de estados de forma que a identificação de erros grosseiros seja independente da identificação dos erros produzidos pela presença de transações não-reveladas no sistema.

Desta forma, poder-se-ia evitar que um dos procedimentos influenciasse o outro.

3. Implementar a metodologia proposta, explorando técnicas de compactação por blocos, além das técnicas de esparsidade já implementadas. Isto permitiria melhorar ainda mais o desempenho computacional da ferramenta proposta em sua aplicação a sistemas de grande porte.
4. Introduzir o uso de métodos ortogonais com restrições de igualdade para tornar numericamente mais robusto o processo de identificação de transações bilaterais não-reveladas.

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Bose and K.A. Clements. “Real Time Modeling of Power Networks”. *Proceedings of the IEEE*, 75(12):, Dec 1987.
- [2] K. A. Clements. “Bilateral Transaction Reconciliation”. *Internal Report, Worcester Polytechnic Institute*, Sept 1998.
- [3] K. A. Clements. “Static State Stimulation with a Priori Information”. *Internal Report, Worcester Polytechnic Institute*, Oct 1998.
- [4] A. Simões Costa. “Identification of Undisclosed Bilateral Transactions through State Estimation and Hypothesis Testing”. *Internal Report, Worcester Polytechnic Institute*, Oct 1998.
- [5] H. Rudnick, N. De Franco, T.J. Hammons, L.V. Sbertoli, C. Chahfín, J.G.A. Do Nascimento, J.W. Maragnon Lima, and Gray P. “Latin American Deregulation Processes”. *IEEE Power Engineering Review*, pages 10–23, Dec 1988.
- [6] Paulo E. Born and Alvaro A. de Almeida. “O Novo Processo de Formação e Regulamentação de Preços no Setor Elétrico”. *Eletricidade Moderna*, (289):80–95, Abril 1998.

- [7] William W. Hogan. "Contracts Networks for Electric Power Transmission". *Journal of Regulatory Economics*, pages 211–242, 1992.
- [8] Feliz F. Wu. "Coordinated Multilateral Trades for Electric Power Networks". *12th Power Systems Computation Conference - Dresden - Germany*, Aug 1996.
- [9] Jhon W. M. Cheng, Francisco D. Galiana, and Donald T. McGillis. "Studies Of Bilateral Contracts Whit Respect To Steady- State Security In A Deregulated Environment". *IEEE Trans. on Power Systems*, pages 31–36, Jan 1997.
- [10] Francisco D. Galiana and Marija. Ilic. "A Mathematical Framework for the Analysis and Management of Power Transactions under Oppen Access". *IEEE Trans. on Power Systems*, 13(2):681–687, May 1998.
- [11] George. Gross and Shu. Tao. "A Loss Allocation Mechanism for Power System Transactions". *Bulk Power System Dynamics and Control IV - Restructuring, Santorini, Greece*, pages 375–387, Aug 1998.
- [12] Harry. Singh, Shangyou. Hao, and Alex. Papalexopoulos. "Transmission Congestion Management in Competitive Electricity Markets". *IEEE Trans. on Power Systems*, pages 1–9, Jun 1997.
- [13] Paul R. Gribik, George A. Angelidis, and Kovacs Ross R. "Transmission Acces and Pricing with Multiple Separate Energy Forward Markets". *IEEE Trans. on Power Systems*, pages 1–8, Nov 1997.
- [14] Jian. Yang and Max. D. Anderson. "Tracing the Flow of Power in Transmission Net-

- works for Use of Transmission-System Charges and Congestion Management". *IEEE Trans. on Power Systems*, pages 399–405, Jan 1998.
- [15] Thomas W. Gedra. "On Transmission Congestion and Pricing". *IEEE Trans. on Power Systems*, 14:241–248, Feb 1999.
- [16] Anders. Gjelsvik, Sverre. Aam, and Lars. Holten. "Hachtel's Augmented Matrix Method - A Rapid Method Improving Numerical Stability In Power System Static State Stimation". *IEEE Trans. on Power Systems*, 104(11):2987–2992, Nov 1985.
- [17] F.C. Schweppe, M.C. Caramanis, R.D. Tabors, and Bohn R.E.". "*Spot Pricing of Electricity*". Kluwer Academic Publishers, Boston., 1988.
- [18] M. Huneault, F.D. Galiana, and G. Gross. "A Review of Restructuring in the Electricity Business". *13th PSCC in Trondheim*, pages 19–31, Jun 1999.
- [19] F.C. Schweppe and J. Wildes. "Power System Static-State Estimation, Part i, ii and iii.". *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, 3(4):120–135, Jan 1970.
- [20] A. Simões Costa. "A Abordagem Topológica Para Observabilidade de Sistemas de Potência: Teoria e Um Algoritmo". *SBA: Controle e Automação*, 1(1):59–71, Jan 1987.
- [21] L. Holten, A. Gjelsvik, Feliz F. Wu, and Wen-Hsiung E. Liu. "Comparison of Different Methods for State Estimation". *IEEE Trans. on Power Systems*, 3(4):1798–1806, Nov 1988.

- [22] M.S. Bazaraa and C.M. Shetty. *"Nonlinear Programming, Theory and Algorithms"*. John Wiley and Sons, NY., 1979.
- [23] A. Monticelli. *"Fluxo de Carga em Redes de Energia (E)létrica"*. Edgard Blücher Ltda, SP., 1983.
- [24] A. Papoulis. *"Probability, Random Variables, and Stochastic Processes"*. McGraw-Hill, NY, 2nd. Ed., 1965.
- [25] R.A. Johnson and D.W. Wichern. *"Applied Multivariate Statistical Analysis"*. Prentice Hall and Englewood Cliffs, NY., 1982.
- [26] Gene H. Golub and Charles F. Van Loan. *"Matrix Computations"*. The John Hopkins University Press, Baltimore, 3rd. Ed., 1996.
- [27] Chi Tsong. Chen. *"Linear System Theory and Design"*. Saunders College, 1984.
- [28] *"University of Washington Web site, Data for the IEEE 118-bus Test System"*.
- [29] K. A. Clements. *"Computational Methods for Large Scale Power Systems"*. Curso ministrado na Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis., 1998.

APÊNDICE A

Dados dos Sistemas Teste

A.1 Sistema 5 Barras

A Tabela A.1 apresenta os dados correspondentes ao sistema teste de 5 barras utilizado nas simulações.

Para este sistema o vetor de injeções de potência ativa p , para o caso que nenhuma transação está acontecendo no sistema, é dado por:

$$p = \begin{bmatrix} 2.0 & -2.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \end{bmatrix}^T$$

TABELA A.1: Dados das linhas de transmissão do sistema teste de 5 barras.

Dados das linhas de Transmissão		
Da Barra	Para Barra	$x(\%)$
1	2	40.0
1	3	25.0
2	4	20.0
2	5	15.0
3	4	30.0
4	5	50.0

A.2 Sistema IEEE - 14 Barras

A Tabela A.2 apresenta os dados correspondentes ao sistema teste IEEE-14 barras utilizado nas simulações.

TABELA A.2: Dados das linhas de transmissão do sistema IEEE de 14 barras.

Dados das linhas de Transmissão				
Da Barra	Para Barra	r(%)	x(%)	b(%)
1	2	1.930	5.920	5.280
1	5	5.403	22.300	4.920
2	3	4.699	19.800	4.380
2	4	5.811	17.630	3.740
2	5	5.695	17.390	3.400
3	4	6.701	17.100	3.460
4	5	1.335	4.210	1.280
4	7	0.000	20.910	0.000
4	9	0.000	55.620	0.000
5	6	0.000	25.200	0.000
6	11	9.498	19.890	0.000
6	12	12.291	25.580	0.000
6	13	6.615	13.030	0.000
7	8	0.000	17.610	0.000
7	9	0.000	11.000	0.000
9	10	3.181	8.450	0.000
9	14	12.711	27.040	0.000
10	11	8.205	19.210	0.000
12	13	22.092	19.990	0.000
13	14	17.093	34.800	0.000

Para este sistema o vetor de injeções de potência ativa p , para o em caso que uma transação de $0.23 pu$ está acontecendo entre as barras 12 e 13, é dado por:

$$p = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.0 & 1.0 & 0.0 & 1.0 & -1.0 & -0.5 & -1.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.23 & -0.23 & 0.0 \end{bmatrix}^T$$