

Método para Locação de Medidores e UTRs para Efeito de Estimação de Estados em Sistemas Elétricos de Potência

George Lauro Ribeiro de Brito

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia
de São Carlos, da Universidade de São Paulo,
como parte dos requisitos para a obtenção do
título de Mestre em Engenharia Elétrica.

DEDALUS - Acervo - EESC



31100044223

ORIENTADOR: Prof. Dr. Newton G. Bretas

São Carlos

2003



Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço: 20 / 11 / 03

Ass.: *Leandro Cordeiro*

Class.	TESE
Cutt.	0975
Tombo	7336/03
Sysno	1349640

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

B862m

Brito, George Lauro Ribeiro de
Método para locação de medidores e UTRs para efeito
de estimação de estados em sistemas elétricos de
potência / George Lauro Ribeiro de Brito. -- São
Carlos, 2003.

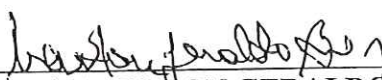
Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos-Universidade de São Paulo, 2003.
Área: Engenharia Elétrica.
Orientador: Prof. Dr. Newton G. Bretas.

1. Locação de medidores e UTRs. 2. Estimação de
estados. 3. Observabilidade de redes. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO


Candidato: Bacharel **GEORGE LAURO RIBEIRO DE BRITO**

Dissertação defendida e julgada em 15-10-2003 perante a Comissão Julgadora:



Prof. Tit. **NEWTON GERALDO BRETAS (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado



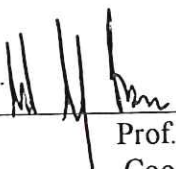
Prof. Dr. **MARINHO GOMES DE ANDRADE FILHO**
(Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação/USP)

Aprovado



Prof. Dr. **JOÃO BOSCO AUGUSTO LONDON JUNIOR**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado



Prof. Assoc. **MURILO ARAUJO ROMERO**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica



Profa. Assoc. **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

A meus pais, Roosevelt e Regina de Brito, pois sem eles nada disto teria sentido.

Agradecimentos

A Deus, meu único Senhor e Salvador.

Ao Professor Newton G. Bretas, pela orientação, pelos conselhos e pela força nos momentos difíceis.

Ao Professor João Bosco A. London Jr., pelas dicas, idéias, amizade etc.

A todos os amigos do LACO, pela amizade, união e compartilhamento de idéias.

A todos os amigos da EESC e do ICMC, pelos bons momentos de companheirismo e amizade.

Aos amigos da IPB São Carlos, pelo carinho e cuidado com a minha vida.

A meus amados pais, pela vida, apoio, dedicação durante cada momento da minha vida.

Aos meus irmãos, Kelvia e Harison por todo o apoio e carinho durante toda minha vida.

A minhas tias Marlene de Brito Diniz e Maria de Fátima Weber por todo o auxílio e esforço durante toda essa etapa de minha vida.

À CAPES, pela bolsa concedida.

Conteúdo

Agradecimentos	v
Lista de Abreviaturas e Siglas	xiii
Lista de Símbolos	xv
Resumo	xvii
Abstract	xix
1 Introdução	1
1.1 Objetivos e Organização	4
2 O Estado da Arte em Estimação de Estados em SEPs	7
2.1 Etapas Envolvidas no Processo de Estimação de Estados	7
2.2 Considerações quanto ao Conjunto de Medidas	13
2.3 Observabilidade de Um Sistema Elétrico de Potência	16
2.4 Estimação Estática de Estados	16
2.5 Medidas Críticas e UTRs Críticas	20
2.6 Conjuntos Críticos de Medidas	21
2.7 Redundância das Medidas	22
2.8 Discussões Preliminares	24
3 Método para Identificação do NR das Medidas Associadas a um SEP	27
3.1 Introdução	27

3.2	Considerações quanto à Observabilidade Algébrica	29
3.3	Metodologia	30
3.4	Algoritmo e Exemplo	34
3.4.1	Algoritmo	34
3.4.2	Exemplo	35
4	Método para locação de medidores e UTRs	41
4.1	Introdução	41
4.2	Método Proposto	41
4.2.1	Fase 1: Análise e Restauração da Observabilidade	42
4.2.2	Algoritmo da Fase 1	45
4.2.3	Fase 2: Análise e restauração do NR das medidas	46
4.2.4	Algoritmo da Fase 2	47
4.2.5	Fase 3: Identificando e aumentando a redundância das UTRs críticas	48
4.2.6	Algoritmo da Fase 3	49
4.3	Exemplo	50
5	Testes e Análise dos Resultados	61
5.1	Testes Realizados	62
5.1.1	Testes com o sistema de 14 barras do IEEE	63
5.1.2	Testes com o sistema de 30 barras do IEEE	66
5.1.3	Testes com o sistema de 121 barras da ELETROSUL	69
5.1.4	Testes com o sistema de 383 barras da CHESF	70
5.2	Análise dos Resultados	71
6	Conclusões	77

Lista de Figuras

2.1	Diagrama de Unidades Terminais Remotas - UTRs	15
3.1	Sistema de 6 barras	35
4.1	Matriz H^t com $PZ_{(i,i)}$, com m elementos da linha i nulos e as medidas e UTRs candidatas	43
4.2	Matriz H^t com elemento não-nulo na linha (i) da medida candidata “s”	44
4.3	Matriz H^t com PZ somente na diagonal (n, n)	45
4.4	Sistema de 6 barras associado a um plano de medição.	50
5.1	Topologia do sistema de 14 barras do IEEE	63
5.2	Topologia do sistema de 30 barras do IEEE	66
5.3	Topologia do sistema de 121 barras da ELETROSUL	73

Lista de Tabelas

5.1	Resultado do plano de medição 1 - Sistema IEEE 14 barras	64
5.2	Resultado do plano de medição 2 - Sistema IEEE 14 barras	65
5.3	Plano de medição 1 do sistema IEEE 30 barras	67
5.4	Resultado do plano de medição 1 - Sistema IEEE 30 barras	67
5.5	Plano de medição 2 do sistema IEEE 30 barras	68
5.6	Resultado do plano de medição 2 - Sistema IEEE 30 barras	68
5.7	Resultado do plano de medição 1 - SEP 121 barras da ELETROSUL	69
5.8	Resultado do plano de medição 2 - SEP 121 barras da ELETROSUL	70
5.9	Resultado do plano de medição 1 - SEP 383 barras da CHESF . .	71
5.10	Resultado do plano de medição 2 - SEP 383 barras da CHESF . .	71
5.11	Plano de medição 1 do sistema de 121 barras da ELETROSUL . .	74
5.12	Plano de medição 2 do sistema de 121 barras da ELETROSUL . .	75

Lista de Abreviaturas e Siglas

UTR	<u>U</u> nidade <u>T</u> erminal <u>R</u> emota
COS	<u>C</u> entro de <u>O</u> peração do <u>S</u> istema
NR	<u>N</u> ível de <u>R</u> edundância
MC	<u>M</u> edida <u>C</u> rítica
CCM	<u>C</u> onjunto <u>C</u> rítico de <u>M</u> edidas
SEP	<u>S</u> istema <u>E</u> létrico de <u>P</u> otência
PZ	<u>P</u> ivô <u>Z</u> ero
N	<u>N</u> úmero Total de Variáveis de Estado do Sistema
PMI	<u>P</u> lano de <u>M</u> edição <u>I</u> nicial
TM	<u>T</u> otal de <u>M</u> edidas <u>E</u> xistentes
TU	<u>T</u> otal de <u>U</u> TRs <u>E</u> xistentes
LC	<u>L</u> ista de medidas e UTRs <u>C</u> andidatas
TMC	<u>T</u> otal de <u>M</u> edidas <u>C</u> andidatas a serem instaladas no sistema
TUC	<u>T</u> otal de <u>U</u> TRs <u>C</u> andidatas a serem instaladas no sistema
TMS	<u>T</u> otal de <u>M</u> edidas <u>S</u> elecionadas em uma determinada fase
TUS	<u>T</u> otal de <u>U</u> TRs <u>S</u> elecionadas em uma determinada fase
PC	<u>P</u> ersonal <u>C</u> omputer (Computador pessoal)

Lista de Símbolos

H Matriz Jacobiana ($m \times n$).

H_{Δ} Matriz resultante da decomposição LDU.

m Número de medidas do sistema.

n Número de barras do sistema.

Z Vetor de medidas ($m \times 1$).

$\underline{h}(\cdot)$ Vetor de funções não lineares, relacionando as medidas com os estados ($m \times 1$).

\underline{x}_v Vetor de estados verdadeiros ($N \times 1$).

\underline{w} Vetor dos erros das medidas ($m \times 1$).

$J(x)$ Função quadrática a ser minimizada.

W^{-1} Matriz de ponderação para as medidas.

G Matriz Ganho.

$H_{P\theta}$ Matriz Jacobiana do modelo ativo ($P\theta$).

H_{QV} Matriz Jacobiana do modelo reativo (QV).

$F_{(a-b)}$ Fluxo de potência da barra a para a barra b .

I_a Injeção de potência na barra a .

Resumo

Desenvolveu-se neste trabalho um método para projeto e fortalecimento de planos de medição, para efeito de estimação de estados. O método proposto permite a obtenção de planos de medição que além de isentos de medidas críticas e de conjuntos críticos de medidas, garantem a observabilidade do sistema, mesmo com a perda simultânea de 1 ou 2 medidas quaisquer, ou, até mesmo, com a perda de 1 UTR. É um método numérico simples, de fácil implantação, que se baseia na análise da estrutura da matriz H_{Δ} , que é obtida através da fatoração triangular da matriz Jacobiana. Para comprovar a sua eficiência, vários testes foram realizados, utilizando os sistemas de 14 e 30 barras do IEEE, o sistema de 121 barras da ELETROSUL e o sistema de 383 barras da CHESF.

Palavras-Chaves: Localização de medidores e UTRs, Estimação de estados, Observabilidade de redes

Abstract

In this work a method to design and to upgrade Measurements Placement Plan for state estimation is proposed. The proposed method allows the obtention of measurements placement plans that, besides free of both critical measurements and critical sets, maintain the system observability when 1 or 2 measurements are lost, at same time, or even when a Remote Terminal Unit (RTU) is lost. It is a simple numerical method, easy to implement and based on the analysis of the structure of the H_{Δ} matrix, that it is obtained through a triangular factorization of the Jacobian matrix. To prove the efficiency of the proposed method, several tests were made using the IEEE 14 and 30-bus systems, a 121-bus system from ELETROSUL and a 383-bus system from CHESF .

Key-words: Meter placement, RTU placement, State estimation, Network observability

Capítulo 1

Introdução

Ao final da década de 1960, blecautes ocorridos na costa leste dos Estados Unidos trouxeram à tona questões relacionadas à confiabilidade e segurança da operação dos Sistemas Elétricos de Potência (SEPs). Estas questões tornaram-se relevantes a ponto de provocar significativas mudanças na filosofia de operação dos SEPs, a qual, freqüentemente, se deparava com a necessidade de ferramentas adicionais que processassem a grande quantidade de dados disponíveis, devido ao grau de interligação desses sistemas, e disponibilizassem ao operador esse conjunto de informações de uma forma adequada.

No mesmo período, acontecia um grande desenvolvimento na área da computação que culminou com o surgimento dos minicomputadores digitais e alcançou o setor das telecomunicações. A fusão destes acontecimentos (os desenvolvimentos tecnológicos em computação e telecomunicações e as dificuldades para a operação dos SEPs cada vez mais interligados) alavancou o surgimento das funções ligadas à monitoração e segurança em tempo real dos SEPs.

Partindo da constatação de que as ferramentas, então disponíveis para auxiliar o operador do sistema nos complexos processos de tomada de decisão relativos à segurança do sistema, eram inadequadas, surgiu o novo conceito de operação de SEP com considerações de segurança. Este tem por objetivo manter o SEP operando ininterruptamente, atendendo a todos os consumidores e, preferencialmente, com economia de serviço. Estes objetivos podem ser alcançados se, necessariamente, os níveis de tensão, frequência, fluxos nas interligações, carregamento

de linhas e equipamentos, forem mantidos dentro de faixas ou limites de segurança.

Este controle de segurança exige que uma grande quantidade de informações esteja disponível ao operador do SEP.

A fusão dos acontecimentos descritos anteriormente fortaleceram a utilização dos sistemas de telemedição, ou seja, as medidas obtidas diretamente dos pontos de medição do sistema são transmitidas por um equipamento eletrônico de uso dedicado. Este equipamento denominado Unidade Terminal Remota (UTR), é responsável pela leitura das informações dos SEPs, nas usinas e subestações, e pelo envio ao Centro de Operação do Sistema (COS). Estas informações, serão processadas e auxiliarão nas decisões do operador do SEP.

O banco de dados do COS de uma companhia de energia elétrica precisa ser confiável para possibilitar uma operação adequada do SEP, surgindo, então, a necessidade de um processo de filtragem para essas informações, pois as mesmas estão sujeitas a erros que podem inviabilizar toda a operação do SEP. O Estimador de Estados (EE) é a ferramenta utilizada nos modernos COSs para realização dessa filtragem.

A estimação de estados de um SEP consiste na obtenção, em tempo real, dos estados desse sistema¹, através do processamento de um conjunto redundante de medidas, usualmente constituídas de: magnitudes de tensão nas barras, fluxos de potência ativa e reativa nas linhas e injeções de potência ativa e reativa nas barras. Essas medidas podem estar corrompidas por erros de medição, erros de conversão analógico-digital e ruídos de transmissão, inviabilizando toda a operação do SEP.

Para obter-se uma estimação de estados confiável, o primeiro passo é verificar se o SEP é observável como um todo. Se for possível a obtenção dos estados de todas as barras do SEP, diz-se que o SEP é observável. Caso contrário, o SEP é não-observável. Entretanto, a observabilidade é uma condição necessária, mas não suficiente, para a obtenção de uma estimação de estados confiável, porque as medidas fornecidas ao EE estão sujeitas a Erros Grosseiros (EGs), que podem

¹Os estados do sistema são: as magnitudes e os ângulos das tensões nas barras.

levar o processo de estimação à não-convergência, ou, caso alcance a convergência, as estimativas obtidas pelo EE podem ser não-verdadeiras. Logo, a detecção e a identificação de EGs em medidas torna-se, também, uma condição necessária para o sucesso do processo de estimação de estados.

Em razão do que se disse acima, o sucesso da estimação de estados depende do número, tipo e localização dos medidores e/ou UTRs instalados no sistema. Neste sentido, considera-se como confiável o plano de medição que atenda aos seguintes critérios técnicos:

(i) Observabilidade e confiabilidade: durante a operação de um SEP, problemas podem ocorrer no sistema de aquisição de dados, podendo acarretar a perda de medidas e/ou UTRs. Em razão disso, as medidas e UTRs disponíveis devem garantir a observabilidade do sistema, mesmo com a perda simultânea de 1 ou 2 medidas quaisquer, ou até mesmo, com a perda de uma UTR qualquer;

(ii) Detecção e identificação de EG : o Nível de Redundância (NR) das medidas disponíveis deve garantir a não-presença das Medidas Críticas (MC)² e dos Conjuntos Críticos de Medidas (CCMs)³. Isto porque não é possível detectar EG em medida crítica, nem mesmo identificá-lo em medidas pertencentes a conjuntos críticos de medidas.

Buscando tornar mais confiável o processo de estimação de estados, diversas pesquisas foram realizadas, aparecendo então os métodos para análise e restauração da observabilidade [(Monticelli & Wu; Maio de 1985a),(Monticelli & Wu; Maio de 1985b),(Bretas; Janeiro de 1996)], os métodos para a identificação de medidas críticas e conjuntos críticos de medidas [(Clements, Krumpholz & Davis; Abril de 1981),(Simões Costa, Piazza & Mandel; Agosto de 1990), (London Jr.; Março de 1997), (London Jr. & Bretas; 1998)] e os métodos para projeto e fortalecimento dos planos de medição [(Clements, Krumpholz & Davis; Abril de

²Medida crítica é a medida que, quando perdida, faz um SEP observável tornar-se não-observável.

³Conjunto crítico de medidas é, segundo sua definição topológica, o conjunto de medidas formado por medidas não-críticas, em que a eliminação de uma medida qualquer, a ele pertencente, torna as demais críticas.

1982), (Abur & Magnago; Novembro de 1999), (Mounir, Obrahim & Richard Maio de 2001;), (London Jr.; Outubro de 2000), (London Jr., Alberto & Bretas; Junho/Julho/Agosto de 2001a), (London Jr., Alberto & Bretas; Setembro de 2001b)].

Uma limitação da grande maioria desses métodos é o tratamento dado às UTRs. Em muitos, nem se considera a existência das UTRs, sendo que, naqueles que as consideram, são requeridas muitas iterações para a identificação de UTRs críticas⁴. Isto ocorre porque a identificação destas UTRs se realiza através de algoritmos destinados à identificação de medidas críticas.

1.1 Objetivos e Organização

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um método que permita determinar onde devem ser instalados medidores e UTRs, em um SEP, para a obtenção de um plano de medição confiável⁵.

Este método baseia-se na análise da estrutura da matriz H_{Δ} . Em razão de ser possível, através dessa análise, identificar os conjuntos de medidas que, caso perdidas simultaneamente, tornam um SEP observável, não-observável (London Jr. et al. Setembro de 2001b), o método possibilita a identificação das UTRs críticas, de uma forma simples e direta, superando, assim, a limitação dos métodos já desenvolvidos para projeto e fortalecimento de planos de medição.

Este trabalho é organizado como segue:

No capítulo 2 estão descritos a trajetória comumente utilizada no processo de estimação de estados, as pesquisas relevantes que descrevem o desenvolvimento de algoritmos e os métodos para obtenção de uma estimação de estados confiável. O capítulo 3 apresenta a metodologia que possibilita o desenvolvimento deste trabalho, que foi proposta em (London Jr.; Outubro de 2000).

O método proposto, juntamente com um exemplo da sua aplicação, estão no capítulo 4. Os testes e a análise dos resultados são descritos no capítulo 5, tendo

⁴UTR crítica é aquela que, quando perdida, faz um SEP observável tornar-se não-observável.

⁵De acordo com a definição de plano de medição confiável apresentada anteriormente.

as conclusões apresentadas no capítulo 6.

Capítulo 2

O Estado da Arte em Estimação de Estados em SEPs

Neste capítulo serão apresentadas as etapas envolvidas no processo de estimação de estados em SEP. Cada etapa será descrita dentro do cenário de pesquisas desenvolvidas. Recordam-se, ainda, algumas definições importantes para o entendimento do trabalho, procedendo-se em sequência a uma discussão.

2.1 Etapas Envolvidas no Processo de Estimação de Estados

Com o aumento das interligações dos SEPs, motivado principalmente pela busca de um melhor aproveitamento das suas fontes energéticas, a necessidade de uma operação em tempo real confiável tem sido fundamental para garantir um grau de segurança e confiabilidade cada vez maior ao fornecimento de energia elétrica. Os modernos COSs têm um papel preponderante na implementação e coordenação das funções de operação e segurança dos sistemas monitorados em tempo real.

O sucesso dessas funções depende da disponibilidade de informações confiáveis a respeito do ponto de operação atual do sistema. Ou seja, é de suma importância dispor de meios que atualizem, em tempo real, o banco de dados do sistema. Essa

é a função do Estimador de Estados.

Os problemas relacionados à estimação de estados, em SEPs, foram tratados primeiramente por Schweppe que, em 1970 apresentou uma série de três artigos, juntamente com outros autores [(Schweppe; janeiro de 1970), (Schweppe & Douglas; Maio de 1970), (Schweppe & Wildes; Maio de 1970)], que mostraram a natureza geral do problema de estimação de estados, a modelagem, as técnicas iterativas para o seu cálculo e os conceitos relacionados a detecção e à identificação de medidas com EG ¹.

Para entender os problemas relacionados ao processo de estimação de estados, é necessário conhecer as etapas envolvidas em tal processo. Tradicionalmente, essas etapas são as seguintes:

1ª Etapa: Obtenção da topologia do sistema no modelo barra linha.

A partir das medidas lógicas, que são realizadas continuamente e consistem em estados de chaves e disjuntores, bem como de informações quanto ao tipo e localização dos medidores instalados no sistema, o configurador de sistemas determina a topologia e a correspondente configuração de medidores, no modelo barra linha. Importa destacar que as informações processadas pelo configurador de sistemas são modeladas ao nível de seção de barra ² (Monticelli; 1999).

2ª Etapa: Análise e restauração da observabilidade do sistema.

Através do modelo barra linha, obtido pelo configurador de sistemas, nesta etapa verifica-se se é possível, por intermédio das medidas analógicas ³ e virtuais disponíveis ⁴, determinar o estado em todas as barras do sistema.

Se for possível, diz-se que o SEP é observável. No entanto, se não for possível, a falta de medidas pode ser suprida, em algumas situações, por pseudomedidas

¹Desde então, várias pesquisas têm sido desenvolvidas, relacionadas ao processo de estimação de estados (Coutto Filho, Leite da Silva & Falcão; Agosto de 1990).

²Representação física dos elementos do sistema.

³Medidas analógicas são realizadas continuamente e usualmente são constituídas de fluxo de potência ativa e reativa nas linhas, injeção de potência ativa e reativa, e algumas magnitudes de tensão nas barras.

⁴Medidas virtuais são medidas de injeção zero, em barras passivas do sistema.

⁵, através das quais o sistema se torna observável como um todo. Uma outra alternativa para essa situação é determinar as partes observáveis do sistema, isto é, as ilhas observáveis.

3ª Etapa: Estimação de estados.

Considerando a topologia do sistema, obtida pelo configurador de sistemas, e através dos seus parâmetros armazenados no banco de dados, bem como do conjunto de medidas disponível ⁶, o estimador de estados fornece o estado de todas as barras do sistema.

4ª Etapa: Processamento de EG(s) em medidas analógicas.

As medidas analógicas fornecidas ao EE estão sujeitas a EGs, que levam o processo de estimação a estados não-verdadeiros, ou, até mesmo, à não-convergência ⁷. Devido a esta fragilidade do conjunto de medidas, o EE deve ser robusto o suficiente para detectar e identificar a ocorrência de EG(s) na(s) medida(s). Em seguida, a(s) medida(s) identificada(s) como portadora(s) de EG(s) é(são) eliminada(s) e os estados são estimados novamente.

O fracasso de uma dessas etapas inviabiliza todo o processo. Por exemplo, caso ocorra algum erro topológico ⁸ e este não tenha sido detectado pelo configurador de sistemas, tal erro pode causar um aumento nos resíduos das medidas analógicas, localizadas nas vizinhanças dos elementos do sistema erroneamente configurados. Logo, na 4ª Etapa, as medidas analógicas que contêm resíduos elevados são identificadas como portadoras de EG. A partir de tal situação, inicia-se um processo onde as medidas analógicas são eliminadas e, eventualmente, tal processo pode conduzir a zero o NR local⁹. Assim, EGs não serão mais detectados em medidas analógicas, mas permanece o erro topológico. Conseqüentemente os

⁵Pseudomedidas são dados de previsão de carga, previsão de geração, dados históricos etc, que fazem parte do banco de dados dos COSs.

⁶Medidas analógicas, virtuais e possíveis pseudomedidas determinadas na 2ª Etapa.

⁷As causas dos EG em medidas são: erros de conversão analógico-digital, ruídos de transmissão, erros nos canais de comunicação etc...

⁸Erros topológicos são erros causados por informações errôneas, quanto aos estados das chaves e/ou disjuntores; erros nas medidas lógicas.

⁹Ver a seção (2.7) do capítulo 2.

estados serão estimados, mas não vão representar corretamente a situação atual do sistema.

Similar análise pode ser realizada considerando erros nos parâmetros do sistema ¹⁰, pois as Etapas 3ª e 4ª se baseiam nos parâmetros fornecidos ao EE, na 3ª Etapa. Assim, caso a informação de algum parâmetro do sistema tenha sido erroneamente fornecida ao estimador de estados, tal erro causará um aumento nos resíduos das medidas analógicas, localizadas nas vizinhanças do elemento cujo parâmetro forneceu aquela informação errada.

É drástico o efeito de um erro topológico e de um erro de parâmetro, para o processo de estimação de estados, normalmente intolerável. Diante disto, vários autores desenvolveram trabalhos, em busca de métodos para análise de erros topológicos e de parâmetros [(Lugtu et al.; Novembro/Dezembro de 1980), (Clements & Davis; Novembro de 1988), (Monticelli; Agosto de 1993), (Alsaç, Vempati, Stott & Monticelli; Agosto de 1998), (Mili, Steeno, Dobraca & French; Novembro de 1999), (Zarco & Expósito; Fevereiro de 2000), (Jaén & Expósito; Setembro de 2001)]. Entretanto, pouco se sabe sobre o sucesso da implantação desses métodos (Monticelli; 1999).

Com relação à análise e restauração da observabilidade, pode-se dividir os métodos desenvolvidos em dois grupos: os métodos topológicos e os numéricos.

Os métodos topológicos caracterizam-se pela criação de rotinas específicas, que não exigem cálculos, mas que são de natureza combinatorial e complexas [(Handschin & Bongers; 1972), (Krumpholz, Clements & Davis; Julho/Agosto de 1980), (Quintana, Simões Costa & Mandel; Março de 1982), (Nucera & Gilles; Maio de 1991), (Mori & Tsuzuki; Maio de 1991)]. Os métodos numéricos são mais simples e de fácil implantação, pois utilizam rotinas já disponíveis nos programas de estimação de estados. Contudo, estes estão sujeitos a erros numéricos [(Monticelli & Wu; Maio de 1985a), (Monticelli & Wu; Maio de 1985b), (Monticelli & Wu; Fevereiro de 1986), (Contaxis & Korres; Novembro de 1988), (Gou & Abur; Maio de 2000)].

¹⁰Impedância de linhas de transmissão e posição de taps de transformadores.

Quanto à estimação de estados propriamente dita, foram criados os estimadores desacoplados [(Horisberger, Richard & Rossier; Janeiro/Fevereiro de 1976), (Garcia, Monticelli & Abreu; Setembro/Outubro de 1992), (Monticelli & Garcia; Maio de 1990), (Roy & Mohamed; Novembro de 1997)] e os estimadores com técnicas mais robustas, que evitam os problemas numéricos [(Simões Costa & Quintana; Fevereiro de 1981), (Gjelsvik, Aam & Holten; Novembro de 1985), (Monticelli, Murari & Wu; Dezembro de 1985), (Mili, Cheniae, Vichare & Rousseeuw; 1996), (Gouvêa & Simões Costa; Setembro de 1998)].

Considerando a dinâmica do vetor de estado, algumas pesquisas buscaram desenvolvimentos de algoritmos para a estimação dinâmica de estados: umas acompanham as mudanças dos estados com o tempo, valendo-se do estimador “Tracking” [(Masiello & Schweppe; Maio/Junho de 1971), (Falcão, Cooke & Brameller Fevereiro de 1982;)]; em outras a teoria do filtro de Kalman foi adicionada aos estimadores “Tracking” [(Debs & Larson; Setembro/Outubro de 1970), (Leite da Silva, Coutto Filho & Cantera; Novembro de 1987), (Bretas; Janeiro de 1989)].

Nota-se ainda que, após o desenvolvimento dos valiosos trabalhos relacionados à representação dos ramos de impedância nula [(Monticelli & Garcia; Novembro de 1991), (Monticelli; Agosto de 1993)], foram desenvolvidos estimadores de estados que incluem as medidas lógicas na sua formulação [(Clements & Simões Costa; Maio de 1998), (Alsaç et al. Agosto de 1998), (Monticelli; 1999), (Jaén & Expósito; Setembro de 2001)]. Tais métodos propiciam uma melhor discriminação entre erros topológicos e grosseiros.

Em relação à detecção e identificação de medidas com EG, existem alguns trabalhos em que se propõe a análise das medidas, antes do processo de estimação, através de testes estatísticos das inovações ¹¹ [(Leite da Silva et al. Novembro de 1987), (Souza, Leite da Silva & Alves da Silva; Agosto de 1996)]. São os chamados estimadores com capacidade de previsão (FASE - Forecasting Aided State Estimators).

A vantagem desses estimadores resulta da possibilidade da detecção e iden-

¹¹Diferenças entre os valores medidos e os previstos.

tificação de medidas com EG, realizar-se sem a necessidade de se analisarem os resíduos das medidas. Entretanto, os mesmos estimadores apresentam dificuldades na determinação da matriz transição de estado.

A maioria dos estimadores de estados são dependentes da análise dos resíduos, por serem estes, os mais aceitos. Através dos algoritmos baseados na análise dos resíduos, a detecção de EG em medidas é realizada através do índice $J(\hat{x})$, por intermédio de um teste de hipótese ¹²[(Handschin, Schweppe, Kohlas & Fiechter; Março/Abril de 1975)], e o processo de identificação de medidas com EG é feito através da análise dos resíduos de estimação normalizados [(Schweppe; janeiro de 1970), (Handschin et al. Março/Abril de 1975)]. Quando uma medida com EG é identificada, a mesma é eliminada do conjunto de medidas, fazendo-se necessário novamente a estimação de estados, através do novo conjunto de medidas ¹³.

Portanto, para situações em que ocorram múltiplos erros, esse processo torna-se muito pesado, pois, para cada medida com EG que se elimine, será realizada uma nova estimação de estados, até que todas as medidas com EG sejam eliminadas.

Existem métodos que propiciam a eliminação de mais de uma medida de cada vez, reduzindo assim o tempo de processamento necessário para detectar e identificar medidas com EG (Mili, Cutsem & Ribbens-Pavella; Novembro de 1984).

Em razão de as medidas críticas apresentarem resíduos nulos (Clements et al. Abril de 1981), bem como de as medidas de um conjunto crítico apresentarem resíduos normalizados idênticos (Mili et al. Novembro de 1984), conclui-se não ser possível a detecção de EG em medidas críticas, nem mesmo a identificação de EG em medidas pertencentes a conjuntos críticos. Em razão disso, é fundamental que o NR das medidas seja tal que garanta a não-presença das medidas críticas e dos conjuntos críticos de medidas.

No sentido de contornar essas limitações, várias pesquisas foram desenvolvi-

¹²Existem métodos que detectam EG diretamente nos resíduos normalizados.

¹³No trabalho de Garcia (Garcia et al. Setembro/Outubro de 1992), ao invés de eliminar a medida com erro, elimina-se o efeito dessa medida.

das, surgindo então os métodos de identificação de medidas críticas e de conjuntos críticos de medidas [(Clements et al. Abril de 1981), (Aires & Haley; Agosto de 1986), (Crainic, Horisberger, Do & Mukhedkar; Novembro de 1990), (Simões Costa et al. Agosto de 1990), (Korres & Contaxis; Maio de 1991b), (Korres & Contaxis; Agosto de 1991a), (Falcão & Arias; Maio de 1994), (London Jr.; Março de 1997), (Bretas & London Jr.; Agosto de 1998), (London Jr. & Bretas; 1998), (London Jr., Alberto & Bretas; Junho de 2000b), (Coutto Filho et al.; Setembro de 2001), (London Jr., Alberto & Bretas; Outubro de 2001c)].

Neste mesmo contexto, métodos para análise da confiabilidade e planejamento de conjuntos de medidas confiáveis foram desenvolvidos [(Clements et al. Abril de 1982), (Lo et al.; Setembro de 1982), (Clements, Krumpholz & Davis; Julho de 1983), (Aam, Holten & Gjerde; Dezembro de 1983), (Park, Moon, Choo & Kwon; Agosto de 1988), (Korres & Contaxis; Maio de 1994), (Çelik & Edwin Liu; Agosto de 1995), (Baran, Zhu, Zhu & Garren; Agosto de 1995), (Abur & Magnago; Novembro de 1999), (Antônio, Toreão & Coutto Filho 2001;), (London Jr. et al. Setembro de 2001b)].

2.2 Considerações quanto ao Conjunto de Medidas

Será proposto, neste trabalho, um método para projeto e fortalecimento de planos de medição para efeito de estimação de estados.

Cabe então, antes de apresentá-lo, definir quais são as medidas fornecidas ao estimador de estados.

Em SEPs, existem basicamente quatro tipos de medidas:

- Medidas Lógicas: consistem em estados de chaves e disjuntores;
- Medidas Analógicas: são usualmente constituídas de magnitudes de tensão nas barras, fluxos de potência ativa e reativa nas linhas de transmissão e injeção de potência ativa e reativa nos barramentos;
- Medidas Virtuais: são medidas de injeção zero em barras passivas.

Normalmente tratadas como restrições de igualdade na formulação da estimação de estado, por serem medidas de qualidade superior ¹⁴ (Gouvêa & Simões Costa; Setembro de 1998);

- Pseudomedidas: são constituídas por dados de previsão de carga, dados históricos, dados de geração etc..., fornecidos pelo banco de dados dos COSs.

As medidas lógicas e as analógicas são realizadas continuamente. As lógicas são utilizadas para a determinação da configuração do sistema e as analógicas, assim como as virtuais e as pseudomedidas, para a determinação dos estados.

As pseudomedidas são utilizadas na restauração da observabilidade dos SEPs que se tornaram não-observáveis, ou, ainda, para a modelagem do sistema externo (Simões Costa & Tardio Arze; 1996). Por isso, elas devem ser pseudo-medidas críticas, para não afetarem os resíduos das medidas obtidas em tempo real.

Como mencionado na seção (2.1), usualmente a determinação da configuração e a dos estados são realizadas separadamente. Entretanto, existem métodos para a estimação de estados, que incluem as medidas lógicas e os estados das chaves na sua formulação (Monticelli; Agosto de 1993).

O método que será proposto neste trabalho considera, em sua análise, as medidas analógicas, virtuais e as pseudo-medidas. Conseqüentemente, este trabalho será desenvolvido visando a aumentar a confiabilidade do processo de estimação de estados, que não incluía, na sua formulação, as medidas lógicas.

As medidas analógicas são colhidas em tempo real, através dos sistemas de telemedição. Como o estimador de estados depende da qualidade dessas medidas, o mesmo vai depender também do sistema de telemedição.

O processo de telemedição envolve uma série de etapas, desde a medição propriamente dita, nas subestações e usinas, até a recepção do sinal analógico ou digital, pelo COS ¹⁵. Estas etapas envolvem uma grande quantidade de equipamentos ¹⁶, os quais estão sujeitos a erros que afetam a qualidade das medidas a serem processadas pelo estimador de estados.

¹⁴Sob o ponto de vista da estabilidade numérica.

¹⁵Veja Figura (2.1).

¹⁶Transformadores de medição, transmissores, receptores, conversores A/D etc...

Se não bastasse os erros, aos quais as medidas estão sujeitas, estas podem tornar-se não disponíveis nos COSs, devido a possíveis falhas nos sistemas de telemedicação. Dependendo da falha, poderá a mesma causar a perda de uma ou mais medidas. Isto se deve ao fato de o sistema de telemedicação ser formado por UTRs que, por sua vez, são compostas por diversos medidores. Cada UTR destina-se a transmitir, do ponto de medição para o COS, uma determinada quantidade de medidas. Cada medidor é responsável por uma determinada medida.

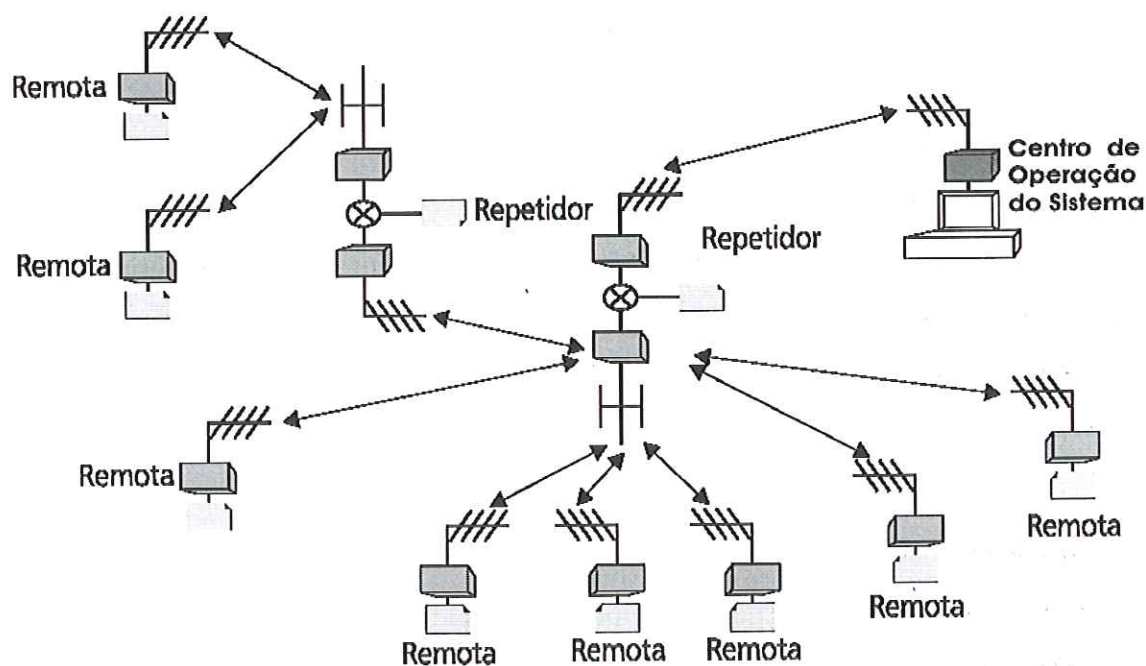


Figura 2.1: Diagrama de Unidades Terminais Remotas - UTRs

De uma forma geral, as falhas que podem ocorrer no sistema de telemedicação podem ser divididas em 2 grupos:

- Falha em medidor;
- Falha em UTR.

A perda de uma medida é causada pela falha em um medidor. Contudo, a perda de todas as medidas transmitidas por uma UTR é gerada por uma falha nesta UTR.

2.3 Observabilidade de Um Sistema Elétrico de Potência

A verificação da observabilidade do sistema é condição necessária para o sucesso da estimação de estados. Para verificar a observabilidade de um SEP, vários métodos foram desenvolvidos, como mostrado no início deste capítulo. Esses métodos tomam como base os seguintes conceitos de observabilidade [(Krumpholz et al. Julho/Agosto de 1980)]:

a - Observabilidade Algébrica: um SEP é dito ser “algebricamente observável”, se a matriz Jacobiana H , correspondente à associação desse sistema a um conjunto de medidas, tiver posto completo. Isto é, se o posto da matriz Jacobiana H for igual ao número de variáveis de estado a serem estimadas;

b - Observabilidade Numérica: Diz-se que um SEP é “numericamente observável” se o conjunto de medidas associado a esse sistema possibilita, uma estimativa para o vetor de estado, através de uma solução iterativa das equações do estimador de estados ¹⁷;

c - Observabilidade Topológica: Um SEP é dito ser “topologicamente observável”, levando em consideração um conjunto de medidas, se existir uma árvore representativa de posto completo associada a esse sistema. Ou seja, se existir uma árvore que, além de relacionar todas as barras do sistema, possua uma medida distinta associada a cada um de seus ramos.

2.4 Estimação Estática de Estados

Nesta seção, será dada uma introdução ao conceito de estimador estático de estados¹⁸, o qual pode ser considerado como uma generalização do problema clássico de fluxo de carga [(Handschin et al. Março/Abril de 1975)].

¹⁷Essas equações serão apresentadas na seção (2.4).

¹⁸Isso porque a grande maioria dos estimadores utilizados nos COSs são estimadores estáticos. Estes não consideram as variações entre as grandezas e a variável tempo, utilizando apenas equações algébricas.

A seguir será apresentada a formulação do problema de estimação estática de estados através do método dos mínimos quadrados ponderados, o mais utilizado dos muitos critérios estatísticos existentes, para a estimação de estados.

Seja:

$$\underline{Z} = \underline{h}(\underline{x}_v) + \underline{w} \quad (2.1)$$

onde:

\underline{Z} - vetor de medidas ($m \times 1$);

$\underline{h}(\cdot)$ - vetor de funções não lineares, relacionando as medidas com os estados ($m \times 1$);

\underline{x}_v - vetor de estados verdadeiros ($N \times 1$);

\underline{w} - vetor dos erros das medidas ($m \times 1$);

m - número de medidas;

N - número de variáveis de estado;

Obtem-se a melhor estimativa do vetor de estados \underline{x}_v , designada por $\hat{\underline{x}}$, determinando o valor de \underline{x} que minimiza o índice $J(\underline{x})$, dado por:

$$J(\underline{x}) = \underline{w}^t \cdot W^{-1} \cdot \underline{w} \quad (2.2)$$

ou

$$J(\underline{x}) = [\underline{Z} - \underline{h}(\underline{x})]^t \cdot W^{-1} \cdot [\underline{Z} - \underline{h}(\underline{x})] \quad (2.3)$$

sendo W^{-1} uma matriz de ponderação para as medidas; é o inverso da matriz covariância das mesmas. É uma matriz diagonal, cujos valores diferentes de zero são os inversos das variâncias de cada medida (σ_{ii}^{-2}) [(Handschin et al. Março/Abril de 1975), (Horisberger et al. Janeiro/Fevereiro de 1976)]. A matriz W^{-1} pondera as medidas de acordo com a qualidade de cada uma.

Da equação (2.3) deduz-se que $J(\underline{x})$ é uma função quadrática. Considerando que \underline{x}_v torna mínimo $J(\underline{x})$, podemos dizer que $J(\underline{x})$ é convexo nas proximidades de \underline{x}_v . Desta forma, para obter $\hat{\underline{x}}$, que torne $J(\underline{x})$ mínimo, fazemos:

$$\frac{\partial J(\underline{x})}{\partial \underline{x}} = 0 \quad (2.4)$$

portanto:

$$2H(\hat{\underline{x}})^t \cdot W^{-1} \cdot [\underline{z} - h(\hat{\underline{x}})] = 0 \quad (2.5)$$

onde $H(\hat{\underline{x}})$ é o jacobiano, dado por:

$$H(\hat{\underline{x}}) \triangleq \frac{\partial h(\underline{x})}{\partial \underline{x}} \Big|_{\hat{\underline{x}}} \quad (2.6)$$

A equação (2.5) relaciona o vetor de estados estimados $\hat{\underline{x}}$. Contudo, para que a sua solução seja conhecida, tem-se que recorrer a técnicas de soluções iterativas, pois, em razão de $h(\hat{\underline{x}})$ ser não-linear, a solução direta daquela equação não é possível. Levando-se em conta o fato de $J(\underline{x})$ ser uma função quadrática sem restrições, o método de Newton-Raphson é usado para obter-se o valor de $\hat{\underline{x}}$ que minimiza $J(\underline{x})$.

Tornando $h(\underline{x})$ linear, em torno de um determinado ponto de operação \underline{x}^0 , tem-se:

$$\underline{h}(\underline{x}) \simeq \underline{h}(\underline{x}^0) + H(\underline{x}^0) \cdot \Delta \underline{x}^0 \quad (2.7)$$

sendo:

$$\Delta \underline{x}^0 = \underline{x} - \underline{x}^0 \quad (2.8)$$

$$H(\underline{x}^0) = \frac{\partial h(\underline{x})}{\partial \underline{x}} \Big|_{\underline{x} = \underline{x}^0} \quad (2.9)$$

De (2.1) obtém-se:

$$\underline{Z} \approx \underline{h}(\underline{x}^0) + H(\underline{x}^0) \cdot \Delta \underline{x}^0 + \underline{w} \quad (2.10)$$

Definindo:

$$\Delta \underline{Z}(\underline{x}^0) = \underline{Z} - \underline{h}(\underline{x}^0) \quad (2.11)$$

onde $\Delta \underline{Z}$ é o erro de estimação, obtendo-se:

$$\Delta \underline{Z}(\underline{x}^0) = H(\underline{x}^0) \cdot \Delta \underline{x}^0 + \underline{w} \quad (2.12)$$

Assim, a função objetivo passa a ser:

$$J(\underline{x}) = [\Delta \underline{Z}(\underline{x}^0) - H(\underline{x}^0) \cdot \Delta \underline{x}^0]^t \cdot W^{-1} \cdot [\Delta \underline{Z}(\underline{x}^0) - H(\underline{x}^0) \cdot \Delta \underline{x}^0] \quad (2.13)$$

E o mínimo é encontrado tomando:

$$H(\underline{x}^0)^t \cdot W^{-1} \cdot [\Delta \underline{Z}(\underline{x}^0) - H(\underline{x}^0) \cdot \Delta \underline{x}^0] = 0 \quad (2.14)$$

Portanto:

$$\Delta \underline{x}^0 = [H(\underline{x}^0)^t \cdot W^{-1} \cdot H(\underline{x}^0)]^{-1} H(\underline{x}^0)^t \cdot W^{-1} \cdot \Delta \underline{Z}(\underline{x}^0) \quad (2.15)$$

onde a matriz ganho é dada por:

$$G^0 = [H(\underline{x}^0)^t \cdot W^{-1} \cdot H(\underline{x}^0)] \quad (2.16)$$

e

$$\underline{x}^1 = \underline{x}^0 + \Delta \underline{x}^0 \quad (2.17)$$

Assim, a estimativa de \underline{x}_v corresponde ao valor de \underline{x} , de uma determinada iteração, em que se verifica um índice de convergência pré-fixado.

2.5 Medidas Críticas e UTRs Críticas

Como mencionado anteriormente, medida crítica é a medida que, se retirada do conjunto de medidas de um sistema observável, torna o mesmo não-observável. Dessa mesma forma, voltando à definição de observabilidade algébrica, podemos dizer que medida crítica é a medida que, se retirada do conjunto de medidas, faz com que o posto da matriz Jacobiana diminua de uma unidade (Clements et al. Abril de 1981).

Analisando a estrutura da matriz Jacobiana, cujas linhas correspondem às equações de medidas e as colunas às variáveis de estado a serem estimadas, verifica-se que as medidas críticas estão associadas às linhas linearmente independentes dessa matriz. Consequentemente, a retirada de uma dessas linhas causaria a diminuição do posto dessa matriz.

Outra característica importante das medidas críticas, decorrente do fato de essas medidas estarem associadas às linhas linearmente independentes da matriz Jacobiana, é que são nulos os elementos da diagonal principal da matriz sensibilidade de resíduo, associados às medidas críticas (Clements et al. Abril de 1981).

Através dos conceitos topológicos, verifica-se que a medida crítica é aquela que fornece o único ‘caminho medido’ entre duas barras de um SEP observável. Sendo ‘caminho entre duas barras’ um conjunto de ramos que une essas barras, esse caminho é chamado de caminho medido, se for possível associar-se-lhe, a cada um dos ramos, uma medida distinta. Logo, a perda de uma medida crítica impede a construção de uma árvore representativa de posto completo, associada ao sistema, ou seja, tornará o sistema topologicamente não-observável. Então, o sistema seria dividido em ilhas.

Observação 2.1: *Pesquisas afirmam que 50% do total de medidas, associadas a um SEP são medidas críticas (Gu, Clements, Krumpholz & Davis; Fevereiro de 1983)*¹⁹.

¹⁹Cutsen e Pavella não concordam com um número de medidas críticas tão alto. Nas discussões desse artigo, eles afirmam que, para os sistemas da Bélgica, esse número está na ordem

Considerando o fato de as medidas críticas representarem um risco para a observabilidade de um SEP, independentemente da sua qualidade, assim também por não se permitir a detecção de erros em tais medidas²⁰, é de suma importância que o operador de um sistema saiba, durante a operação, da existência das mesmas e possa identificá-las, a fim de que lhe seja possível a operação de uma forma mais confiável.

Desta mesma maneira, a identificação de medidas críticas é também importante para tornar mais confiável um conjunto de medidas já existente, porquanto, identificando-as, torna-se possível ao projetista determinar onde e que tipo de medidor deve ser instalado no sistema, para garantir-se a não-presença, no mesmo, de medidas críticas.

Uma UTR pode também ser classificada como crítica ou não-crítica. Como já mencionado na introdução deste trabalho, uma UTR é crítica se a eliminação simultânea de todas as medidas transmitidas por ela fizer um SEP observável, tornar-se não-observável.

Deve-se destacar que, mesmo não contendo medida crítica, uma UTR pode ser crítica. Por exemplo, uma UTR possuindo ' p ' medidas não-críticas, se o sistema se tornar não-observável com a retirada simultânea dessas ' p ' medidas, essa UTR é crítica.

Face a essas considerações, observa-se que as UTRs críticas também representam um risco para a observabilidade de um SEP. Logo, a identificação de UTRs críticas é de suma importância para o sucesso da estimação de estados em SEP(s).

2.6 Conjuntos Críticos de Medidas

Também conhecidos como "minimally dependent sets of measurements", ou "bad data groups", podem ser definidos, segundo (Aires & Haley; Agosto de 1986), de duas formas:

1^a - Definição Numérica: os conjuntos críticos de medidas são aqueles

de 3,5% a 8,5%.

²⁰Isto porque o resíduo de uma medida crítica é nulo.

correspondentes às submatrizes da matriz covariância dos resíduos, com posto igual a 1;

2ª - Definição Topológica: conjunto crítico de medidas é o conjunto de medidas formado por medidas não-críticas, em que a eliminação de uma medida qualquer, a ele pertencente, torna as demais medidas críticas.

O desempenho do estimador de estados depende da identificação dos conjuntos críticos. Isto porque, a eliminação de quaisquer duas medidas, pertencentes a um conjunto crítico de medidas associado a um sistema observável, torna tal sistema não-observável. Além disso, vale lembrar que os resíduos normalizados das medidas de um conjunto crítico são iguais (Mili et al. Novembro de 1984). Isto implica que, embora seja possível detectar a existência de EG em uma das medidas pertencentes a um conjunto crítico, é impossível identificar qual, dentre essas medidas, é aquela com EG.

2.7 Redundância das Medidas

A identificação do NR das medidas associadas a um SEP foi motivo de diversas pesquisas [(Al-Atwan & Koglin; Julho de 1998), (London Jr. et al. Junho de 2000b), (London Jr., Alberto & Bretas; Setembro de 2000a), (London Jr.; Outubro de 2000), (London Jr., Alberto & Bretas; Dezembro de 2000c), (London Jr. et al. Junho/Julho/Agosto de 2001a)].

O NR das medidas pode ser definido de duas maneiras:

a - NR global: definido como a razão entre o número de medidas disponível e o número de estados a serem estimados (Crainic et al. Novembro de 1990).

b - NR local: é o NR de cada uma das medidas associadas a um SEP.

O NR global não expressa a real situação das medidas, porque, mesmo para sistemas com alto NR global, há a possibilidade de existirem medidas críticas ou conjuntos críticos de medidas [(Çelik & Edwin Liu; Agosto de 1995), (Al-Atwan & Koglin; Julho de 1998), (London Jr.; Outubro de 2000), (Simões Costa et al. Agosto de 1990), (Clements et al. Abril de 1981), (Crainic et al. Novembro de 1990)].

Em (Al-Atwan & Koglin; Julho de 1998), foram discutidos dois aspectos da redundância local. Nesse trabalho, mostrou-se a importância da análise da redundância local, para o processo de estimação de estados, salientando que, em um conjunto de medidas, formado apenas por medidas com NR local maior ou igual a 2, garantir-se-ia a não-presença de medidas críticas e de conjuntos críticos de medidas, tornando possível, para tal conjunto de medidas, a detecção e a identificação de EG.

Um método para a identificação do NR local de medidas foi proposto em (Al-Atwan & Koglin; 1993), entretanto tal método requer a análise dos resíduos das medidas bem como muitas iterações. Já o método desenvolvido em (London Jr.; Outubro de 2000), que é utilizado como base para o desenvolvido neste trabalho, não requer a análise dos resíduos e identifica o NR local das medidas com muito menos iterações.

Em razão de o método a ser proposto trabalhar com o conceito de NR local de medidas, a seguir serão definidas, de uma forma bastante sucinta, as medidas com NR local 0, 1 e 2 ²¹.

Medida com NR 0:

É a medida crítica, cuja definição já foi apresentada na seção (2.5) deste capítulo.

Medida com NR 1:

É a medida que possui uma informação necessária para a observabilidade do sistema, mas que pode ser obtida por meio de pelo menos uma outra medida. Isto implica que, mesmo que esta medida fosse perdida, o sistema continuaria observável. Contudo, a perda simultânea dessa medida, juntamente com uma outra que compartilhe a mesma informação, com NR também igual a 1, tornaria o sistema não-observável.

Medida com NR 2:

É a medida que possui uma informação necessária para a observabilidade do sistema, mas que pode ser obtida por meio de, pelo menos, duas outras medidas.

²¹Para obter uma definição mais completa, consulte (London Jr.; Outubro de 2000).

Assim, a perda dessa medida só torna o sistema não-observável se forem perdidas também, simultaneamente, duas outras medidas, com NR também igual a 2, que compartilham a mesma informação.

Observação 2.1: *Essas definições podem ser generalizadas para medidas com NR 3, 4, ...p.*

2.8 Discussões Preliminares

Uma limitação da maioria dos métodos desenvolvidos, para análise de observabilidade e de redundância de medidas, está em considerar a perda de uma determinada medida como um evento independente. Isto porque, como mencionado na seção (2.2), considerando que algumas medidas são transmitidas para os COSSs, por uma única UTR, a falha de uma UTR pode significar a perda de mais de uma medida, simultaneamente. Conseqüentemente, dependendo do tipo de problema que tenha ocorrido no sistema de telemedição, a perda de uma medida não pode ser considerada como um evento independente.

Na busca de métodos que contornassem essa limitação, surgiram alguns para análise de confiabilidade de um conjunto de medidas, os quais consideram a existência das UTRs [(Clements et al. Abril de 1982)]. Este era uma versão modificada do algoritmo combinatorial para identificação de medidas críticas, desenvolvido por [(Clements et al. Abril de 1981)].

Neste método, a perda de uma UTR é considerada como um evento independente. Considerando que este método é baseado em um algoritmo que permite identificar apenas medidas críticas, este só permite determinar, diretamente, se uma UTR é crítica quando a mesma possuir alguma medida crítica. Contudo, como apresentado na seção (2.5), mesmo que não possua medida crítica, uma UTR pode ainda ser crítica.

Para permitir a identificação desse tipo de UTR crítica, o método proposto por (Clements et al. Abril de 1982) requer que o algoritmo combinatorial seja processado ' p ' vezes, sendo ' p ' o número de medidas transmitidas pela UTR em análise, tornando muito lenta a análise de confiabilidade do conjunto de medidas.

Considerando também a existência das UTRs, (Korres & Contaxis; Maio de 1994) criaram um método para análise e seleção de um confiável conjunto de medidas. Tal método utiliza um algoritmo numérico que permite a identificação das medidas críticas e dos conjuntos críticos de medidas [(Korres & Contaxis; Maio de 1991b), (Korres & Contaxis; Agosto de 1991a)]. Logo, assim como acontece com o método de (Clements et al. Abril de 1982), por esse método não se consegue identificar diretamente se uma UTR é crítica ou não.

No início deste século (Magnago & Abur; Agosto de 2000) apresentaram um procedimento sistemático pelo qual conjuntos de medidas podem ser otimamente atualizados. Este procedimento produz uma configuração de medidas que pode resistir a qualquer perda de linha(s) ou de uma única medida, sem que o sistema se torne não observável. É um método numérico baseado na matriz Jacobiana das medidas e no processo de fatoração triangular esparsa. O custo de instalação de medidores foi incorporado na formulação do problema. Contudo, o método se baseia numa busca heurística e não considera a existência das UTRs.

Sequencialmente, (Mounir et al. Maio de 2001;) propuseram um método para locação de UTRs, com o objetivo de obter um conjunto de medidas que, além de garantir a observabilidade do sistema, mesmo com a perda de uma UTR qualquer, garantisse a não-presença de medidas críticas. Entretanto, tal método apresenta as mesmas limitações dos anteriores ²².

Através das diversas pesquisas desenvolvidas até o presente momento, pode-se notar que a busca por metodologias e por algoritmos que sejam capazes de projetar e atualizar planos de medição que resistam à perda de uma ou mais medidas, vêm se tornando objetivo de diversos pesquisadores. Verifica-se, também, que a maioria dos métodos que analisam a perda de medidas levam em consideração os casos em que somente uma medida é excluída de cada vez, não considerando a existência das UTRs e por conseqüência não conseguindo determinar UTR crítica, o que vem representar uma limitação.

Consequentemente, pela necessidade de uma metodologia mais eficiente, por

²²Não consegue identificar, diretamente, se uma UTR é crítica.

assim dizer, para a análise de um plano de medição, para efeito de estimação de estados, que permita, além da identificação das medidas críticas, a identificação de conjuntos de duas, três, ..., p medidas, que, caso perdidas simultaneamente, fazem um SEP observável se tornar não-observável, verificou-se que o método para identificação do NR das medidas, descrito em (London Jr.; Outubro de 2000), é um método com um bom embasamento teórico, que permite a identificação dos chamados conjuntos p -críticos de medidas de uma forma bastante direta. Assim, acredita-se que este método pode ser usado como ferramenta de auxílio, tanto para o projeto de um novo conjunto de medidas, quanto para indicar um adequado fortalecimento de um conjunto de medidas já existente, vindo de encontro ao objetivo deste trabalho.

Face ao exposto, tal método é utilizado como base para o desenvolvimento deste trabalho e, em razão disso, o próximo capítulo traz os seus pontos fundamentais.

Capítulo 3

Método para Identificação do NR das Medidas Associadas a um SEP

3.1 Introdução

O método para a identificação do NR das medidas¹, desenvolvido em (London Jr.; Outubro de 2000), permite a identificação dos conjuntos de p medidas ($p \geq 1$), associadas a um SEP observável, que, caso perdidas simultaneamente, tornam tal sistema não-observável². Considerando que esses conjuntos de medidas podem causar a perda da observabilidade, serão chamados de conjuntos p -críticos.

Definição 3.1: Conjuntos p -críticos de medidas são conjuntos de ' p ' medidas ($p \geq 1$), associadas a um SEP observável, medidas essas que, caso perdidas simultaneamente, tornam tal sistema não observável.

Assim, como descrito em (London Jr. et al. Setembro de 2000a), podemos verificar que:

Para $p = 1$, o conjunto p -crítico é a medida crítica;

para $p = 2$, par crítico de medidas;

¹O NR considerado aqui é o NR local, definido na seção (2.7).

²Esse método pode ser encontrado, também, em [(London Jr. et al. Junho de 2000b), (London Jr. et al. Setembro de 2000a), (London Jr. et al. Junho/Julho/Agosto de 2001a)].

para $p = 3$, trio crítico; e assim por diante.

Definição 3.2: Uma medida tem NR igual a $(p - 1)$, se o conjunto p -crítico com menor número de medidas a que ela pertencer possuir p medidas.

Considerando essa definição, a medida crítica tem $NR = 0$. Já uma medida não-crítica, que aparece em pelo menos um par crítico de medidas, tem $NR = 1$, e assim por diante.

Vale destacar que **conjunto p -crítico** não é, por definição, a mesma coisa que **conjunto crítico** de medidas, pois, de acordo com sua definição, **conjunto crítico** de medidas é aquele constituído por medidas não críticas, em que a eliminação de uma medida qualquer, a ele pertencente, torna as demais medidas críticas (Korres & Contaxis; Maio de 1991b). Assim, observa-se que um conjunto p -crítico será igual a um **conjunto crítico**, somente se ambos possuírem duas medidas, porquanto, a retirada de uma das medidas de um **par crítico** torna a outra crítica. Verifica-se também que as medidas de um **par crítico**, assim como as medidas de um **conjunto crítico**, possuem resíduos normalizados iguais.

Entretanto, os conjuntos p -críticos, com $p \neq 2$, não constituem **conjuntos críticos** de medidas. Por exemplo, o conjunto p -crítico, com $p = 1$, é a própria medida crítica; já em um conjunto p -crítico, com $p = 3$, verifica-se que a retirada de uma das suas medidas não torna as demais medidas críticas. Vale ressaltar também que as medidas que pertencem a esses conjuntos p -críticos, com $p \neq 2$, em geral não apresentam os mesmos resíduos normalizados.

Para identificar os conjuntos p -críticos, o método baseia-se nas relações de dependência linear das linhas da matriz Jacobiana. Para determinar essas relações, uma conveniente mudança de base no espaço dos estados é realizada. A finalidade dessa mudança de base é encontrar estados equivalentes, cujo relacionamento com as medidas seja mais direto. Logo, a identificação dessas relações se torna simples e direta.

3.2 Considerações quanto à Observabilidade Algébrica

Para um SEP com n barras e m medidas, a equação de medidas do estimador linear estático de estados é dada por:

$$z = Hx + w, \quad (3.1)$$

onde z é o vetor de medidas ($m \times 1$), H é a matriz Jacobiana [$m \times (2n - 1)$], x é o vetor dos estados [$(2n - 1) \times 1$] e w é o vetor dos erros das medidas ($m \times 1$), sendo “ n ” o número de barras do sistema.

A matriz Jacobiana H relaciona as medidas com os estados do sistema. Os estados são os ângulos de fase (θ) e as magnitudes de tensão (V), nas barras do sistema. As medidas usualmente são: fluxo de potência ativa e reativa nas linhas, injeções de potência ativa e reativa e medidas de magnitude de tensão nos barramentos.

Levando em consideração as propriedades da matriz Jacobiana H e a definição de observabilidade algébrica (Krumpholz et al. Julho/Agosto de 1980), anteriormente descrita no capítulo 2 - seção 2.3, um sistema com n barras é dito ser observável se:

$$\text{Posto}(H) = 2n - 1, \quad (3.2)$$

sendo $(2n - 1)$ a dimensão do vetor de estado a ser estimado.

Através do desacoplamento $\underline{P}\theta - \underline{Q}V$, conhecido como desacoplamento do modelo (Monticelli & Garcia; Maio de 1990), podemos realizar a análise de observabilidade, separadamente, para cada um dos modelos. Desta forma, um sistema é $\underline{P}\theta$ algebricamente observável, considerando somente as medidas de potência ativa, se:

$$\text{Posto}(H_{P\theta}) = (n - 1), \quad (3.3)$$

onde $(n - 1)$ é o número de ângulos de fase a serem estimados, pois o ângulo de uma das barras é usado como referência angular. Da mesma forma, um sistema é QV algebricamente observável, considerando as medidas de potência reativa e as de magnitude de tensão, se:

$$\text{Posto}(H_{QV}) = n, \quad (3.4)$$

sendo n o número de magnitudes de tensão a serem estimadas.

Observação 3.1: *Neste trabalho será considerado apenas o modelo $P\theta$. Entretanto, considerando que as medições de potência ativa e reativa são realizadas aos pares, bem como a existência de pelo menos uma medida de magnitude de tensão, um plano de medição que é confiável para o modelo $P\theta$ será confiável para o modelo QV .*

3.3 Metodologia

Como a condição para a observabilidade algébrica é que o posto da matriz Jacobiana H seja completo, pode-se afirmar que as medidas críticas correspondem às linhas linearmente independentes dessa matriz. Seguindo o mesmo raciocínio, as p medidas que constituem um conjunto p -crítico correspondem a p linhas da matriz H , que, caso retiradas simultaneamente, fazem com que o posto da matriz H diminua de uma unidade. Contudo, a retirada simultânea de quaisquer $(p - 1)$ medidas desse conjunto não reduz o posto da matriz H .

Considerando essas propriedades, a idéia do método é analisar as relações de dependência linear entre as linhas da matriz H . Essas relações são de difícil análise, através da estrutura da matriz H , mas, com uma mudança conveniente de base, no espaço dos estados, essa análise é bastante simplificada. Sendo assim, considerando o modelo $P\theta$, pode-se enunciar o seguinte teorema:

Teorema 3.3.1 *Considere a matriz Jacobiana $H_{P\theta}$, associada a um SEP com m medidas, sendo $m > (n - 1)$. Se o sistema for observável [$\text{Posto}(H_{P\theta}) = n - 1$],*

então existe uma mudança de base C , no espaço dos estados, tal que, nesta nova base, a matriz $H_{P\theta}$ apresentará a seguinte forma:

$$H_{\Delta} = \left[\begin{array}{cccccc|c} 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & . & \cdots & 0 & 0 & . \\ \vdots & & & & & \vdots \\ 0 & & & . & 0 & . \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline & & & & & R \\ & & & & & 0 \\ & & & & & \vdots \\ & & & & & 0 \end{array} \right]_{m \times n} \Rightarrow H_{\Delta} = \left[\begin{array}{c|c} I_{(n-1)} & \begin{array}{c} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{array} \\ \hline R & \begin{array}{c} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{array} \end{array} \right]_{m \times n}$$

Sendo:

$H_{\Delta} \Rightarrow$ matriz $H_{P\theta}$ na nova base;

$I \Rightarrow$ matriz identidade de dimensão $(n-1) \times (n-1)$;

$R \Rightarrow$ submatriz de dimensão $[m - (n-1)] \times (n-1)$, composta por linhas linearmente dependentes das linhas da submatriz $I_{(n-1)}$;

Observação 3.2: A última coluna da matriz H_{Δ} é constituída apenas por zeros, por corresponder à barra escolhida como referência angular.

Observação 3.3: A demonstração desse teorema é apresentada em (London Jr.; Outubro de 2000).

Considerando a mudança de base que foi realizada, a equação (3.1) torna-se:

$$z = H_{\Delta} x_{eq} + w$$

onde: $x_{eq} = C_x$, é o vetor de estados equivalentes. Conseqüentemente, os estados equivalentes são combinações lineares dos estados reais e H_{Δ} relaciona as medidas com os estados equivalentes.

A matriz H_{Δ} pode ser obtida mediante a solução de um sistema esparso de equações lineares, havendo dois caminhos para a sua determinação, através da decomposição LDU:

(i)-Aplicando diretamente à matriz Jacobiana;

(ii)-Aplicando à matriz Jacobiana transposta H^t .

Em (London Jr.; Outubro de 2000), verificou-se ser mais interessante seguir o segundo caminho, o qual facilita a implantação do processo de decomposição LDU.

Vale lembrar que a matriz H^t é a transposta da matriz H , logo, possui as mesmas propriedades desta matriz. Desta forma, tudo o que foi apresentado em relação à matriz H , aplicar-se-á à matriz H^t , desde que sejam observadas as diferenças entre essas matrizes, devido ao fato da matriz H^t ser a transposta da matriz H . Logo, a matriz H_{Δ}^t , que será obtida para um SEP observável, associado a um conjunto de “ m ” medidas [$m > (n - 1)$], possuirá a seguinte forma:

$$H_{\Delta}^t = \left[\begin{array}{ccc|cc} 1 & & & & \\ & \ddots & & & \\ & & 1 & & R \\ \hline 0 & \dots & & \dots & 0 \end{array} \right] \Rightarrow H_{\Delta}^t = \left[\begin{array}{ccc|cc} I_{(n-1)} & & & R & \\ \hline 0 & \dots & & \dots & 0 \end{array} \right] \quad (3.5)$$

Sendo:

$H_{\Delta}^t \Rightarrow$ matriz H^t na nova base;

$I_{(n-1)} \Rightarrow$ submatriz identidade de dimensão $(n - 1) \times (n - 1)$;

$R \Rightarrow$ submatriz de dimensão $(n - 1) \times [m - (n - 1)]$, composta por colunas linearmente dependentes das colunas da submatriz $I_{(n-1)}$;

Analisando a estrutura da submatriz I , de H_{Δ}^t , verifica-se que as suas $(n - 1)$ colunas são, isoladamente, linearmente independentes. Por esta razão, as medidas correspondentes a essas colunas serão chamadas de medidas Básicas³, pois essas medidas são suficientes para tornar o sistema em consideração observável. As outras medidas serão chamadas de Suplementares. Considerando a estrutura da matriz H_{Δ}^t , os seguintes lemas são formulados:

Lema 3.3.1

Toda medida crítica pertence ao conjunto de medidas Básicas.

Lema 3.3.2

³Denominação utilizada em (Baran et al. Agosto de 1995). Já em (Abur & Magnago; Novembro de 1999), essas medidas são chamadas de essenciais.

Todo conjunto p -crítico de medidas possui pelo menos uma medida Básica.

A busca pelos conjuntos p -críticos de medidas é dividida em duas fases:

(i)-Identificação dos conjuntos p -críticos de medidas que contêm apenas uma medida Básica;

(ii)-Identificação dos conjuntos p -críticos de medidas que contêm mais de uma medida Básica.

A seguir será mostrado que a segunda fase é um aplicação recursiva da primeira. Considere-se então, o seguinte Teorema, cuja demonstração é apresentada em (London Jr. et al. Junho/Julho/Agosto de 2001a):

Teorema 3.3.2 *As p medidas, correspondentes às colunas dos p elementos não-nulos, que pertençam a uma linha da matriz H_{Δ}^t , formam um conjunto p -crítico de medidas, contendo apenas uma medida Básica ⁴.*

Corolário 3.3.1

Toda medida Suplementar possui nível de redundância maior que 0.

Através do Teorema (3.3.2) verifica-se que, quando uma linha tem apenas um elemento não nulo, significa que a informação do estado equivalente, correspondente àquela linha, é fornecida apenas por uma medida. Portanto, essa medida é crítica e será classificada com NR igual a 0.

Para realizar a segunda fase da busca, utilizando as diretrizes do Teorema (3.3.2), elimina-se uma medida Básica não-crítica da matriz H_{Δ}^t , para, em seqüência, proceder-se à obtenção da nova matriz H_{Δ}^t . Como a linha correspondente a medida retirada é linearmente dependente de pelo menos uma medida Suplementar, existe uma outra medida que pode substituí-la. Efetuando a substituição, obtém-se a nova matriz H_{Δ}^t . Analisando as linhas desta matriz, considerando o Teorema (3.3.2), conclui-se que as p medidas, associadas aos novos conjuntos p -críticos identificados, constituem, juntamente com a medida Básica que foi retirada, um conjunto $(p + 1)$ -crítico de medidas.

⁴Maiores detalhes deste teorema e sua respectiva prova estão em (London Jr.; Outubro de 2000)

Aplicando-se esse processo a todas as medidas Básicas, com NR maior ou igual a 1, identificam-se todos os conjuntos p -críticos, contendo duas medidas básicas. Continuando esse processo, eliminando conjuntos de “ b ” medidas Básicas, com NR maior ou igual a b , todos os conjuntos p -críticos de medidas, com $p \geq (b + 1)$, contendo $(b + 1)$ medidas Básicas, serão identificados.

Observação 3.4: *A busca por conjuntos p -críticos de medidas, formados por mais de uma medida Básica, será necessária apenas se: $[m - (n - 1)] \geq p$. Caso esta diferença seja menor que p , a perda simultânea de quaisquer p medidas tornaria o sistema não-observável, porque o número de medidas disponível tornar-se-ia menor que o número de estados a serem estimados.*

Observação 3.5: *De acordo com (Crainic et al. Novembro de 1990), um conjunto de medidas, formado apenas por medidas com NR maior que 2, é bastante confiável para a estimação de estados. Isto porque, para tal conjunto, estaria garantida a não presença de medidas críticas e de conjuntos críticos de medidas. Em razão disso, o algoritmo que será apresentado na próxima seção restringe a busca por conjuntos p -críticos de medidas para no máximo $p = 3$.*

3.4 Algoritmo e Exemplo

3.4.1 Algoritmo

Antes de apresentar os passos do algoritmo, é bom salientar que o NR das medidas depende somente do número, tipo e localização das mesmas, não do valor real dos parâmetros da rede. A matriz H^t pode ser construída, atribuindo-se às reatâncias de linha o valor 1, entretanto, a utilização do valor real das reatâncias de linha não inviabiliza a utilização do método.

Consequentemente, os passos do algoritmo são os seguintes:

Passo 1

Através das medidas disponíveis, forme a matriz H^t ;

Passo 2

Através da decomposição LDU, obtenha H_{Δ}^t (para isto pode ser necessário trocar a posição de algumas colunas da matriz H^t);

Passo 3

Identifique as medidas com NR igual 0 e também os pares e trios críticos de medidas, que possuem apenas uma medida Básica;

Passo 4

Identifique os pares e trios críticos de medidas, que possuem mais de uma medida Básica;

Passo 5

Identifique as medidas com NR 1 e 2, de acordo com a Definição 3.2

3.4.2 Exemplo

Neste exemplo, o método proposto em (London Jr.; Outubro de 2000) é aplicado ao sistema de 6 barras, associado ao conjunto de medidas ilustrado na Figura (3.1).

Verifica-se, através do conjunto de medidas, que o sistema é algébricamente observável.

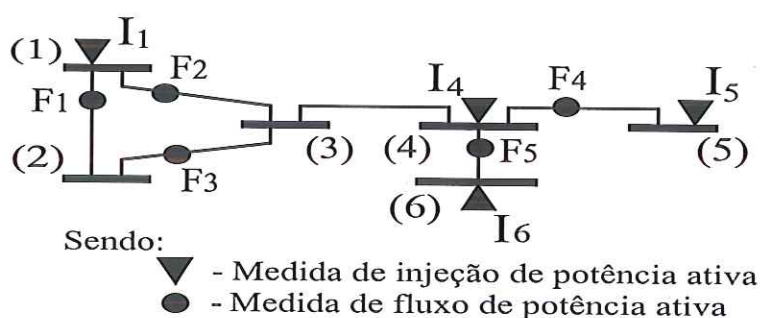


Figura 3.1: Sistema de 6 barras

Passo 1:

Construa a matriz Jacobiana transposta H^t :

$$H^t = \begin{matrix} & F_1 & F_2 & F_3 & F_4 & F_5 & I_1 & I_4 & I_5 & I_6 \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix} & \left[\begin{array}{ccccccccc} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 3 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 1 \end{array} \right] \end{matrix}$$

Passo 2:

Obtenha a matriz H_{Δ}^t (observe que, para obter a matriz H_{Δ}^t , foi necessário trocar a posição das colunas correspondentes às medidas F_3 e I_4):

$$H_{\Delta}^t = \begin{matrix} & F_1 & F_2 & I_4 & F_4 & F_5 & I_1 & F_3 & I_5 & I_6 \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix} & \left[\begin{array}{cccccc|cccc} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right] \end{matrix}$$

Passo 3:

Analisando as linhas da matriz H_{Δ}^t , obtém-se:

1ªLinha: Aparecem três elementos não-nulos, nas colunas correspondentes às medidas F_1 , I_1 e F_3 . Assim, essas medidas constituem o seguinte trio crítico de medidas: $[F_1; I_1; F_3]$;

2ªLinha: $[F_2; I_1; F_3]$ - trio crítico;

3ªLinha: Nesta linha aparece apenas um elemento não nulo, na coluna correspondente à medida I_4 . Logo, essa medida é crítica;

4ªLinha: $[F_4; I_5]$ - par crítico;

5ªLinha: $[F_5; I_6]$ - par crítico.

Passo 4:

Como $[m - (n - 1)] = [9 - (6 - 1)] = 4 \geq 3$, será necessário identificar os pares e trios críticos de medidas, formados por mais de uma medida básica. Assim, elimina-se da matriz H_{Δ}^t a coluna correspondente à medida F_1 , obtendo-se a matriz $H_{\Delta(F_1)}^t$:

$$H_{\Delta(F_1)}^t = \begin{array}{c} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \left[\begin{array}{cccc|cccc} F_2 & I_4 & F_4 & F_5 & I_1 & F_3 & I_5 & I_6 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 5 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right]$$

Aplicando a decomposição LDU à matriz $H_{\Delta(F_1)}^t$, trocando de posição a coluna correspondente à medida I_1 , a matriz torna-se:

$$H_{\Delta(F_1)}^t = \begin{array}{c} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \left[\begin{array}{cccc|cccc} I_1 & F_2 & I_4 & F_4 & F_5 & F_3 & I_5 & I_6 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right]$$

Analisando as linhas da matriz $H_{\Delta(F_1)}^t$, obtém-se:

1ªLinha: Identifica-se um novo par crítico, formado pelas medidas I_1 e F_3 . Conseqüentemente, tais medidas constituem, juntamente com a medida que corresponde à coluna que foi eliminada, medida F_1 , um trio crítico de medidas. Mas esse trio já havia sido identificado através do Passo 3;

2ªLinha: Identifica-se um novo par crítico de medidas, formado pelas medidas F_2 e F_3 . Assim, essas medidas formam, juntamente com a medida F_1 , o seguinte trio crítico de medidas: $[F_1; F_2; F_3]$;

Nas 3^a, 4^a e 5^a linhas, o número de elementos nulos não mudou em relação às respectivas linhas da matriz H_{Δ}^t . Conseqüentemente, essas linhas não identificam nenhum novo conjunto p -crítico de medidas.

Para o exemplo em pauta, é necessário identificar todos os trios críticos, formados por mais de uma medida básica. Assim, partindo da matriz $H_{\Delta(F_1)}^t$, elimina-se a coluna correspondente à medida F_2 , obtendo-se a matriz $H_{\Delta(F_1, F_2)}^t$. Aplicando a decomposição LDU a essa nova matriz, trocando a posição da coluna correspondente à medida F_3 , tal matriz torna-se:

$$H_{\Delta(F_1, F_2)}^t = \begin{array}{c} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \left[\begin{array}{cccccc|cc} I_1 & F_3 & I_4 & F_4 & F_5 & I_5 & I_6 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{array} \right]$$

Analisando as linhas de $H_{\Delta(F_1, F_2)}^t$, obtém-se:

1^aLinha: Nesta linha aparece apenas um elemento não-nulo, na coluna correspondente à medida I_1 . Logo, essa medida constitui, juntamente com as medidas correspondentes às colunas que foram retiradas (F_1, F_2), o seguinte trio crítico de medidas: $[F_1; F_2; I_1]$;

2^aLinha: $[F_1; F_2; F_3]$ - Este trio crítico de medidas já havia sido identificado;

Nas 3^a, 4^a e 5^a linhas; o número de elementos nulos não mudou, em relação às respectivas linhas da matriz $H_{\Delta(F_{1-2})}^t$. Assim, essas linhas não identificam nenhum novo conjunto p -crítico de medidas.

Continuando tal processo, para todas as medidas Básicas não-críticas e para todos os conjuntos de duas medidas Básicas, com NR maior que 1, todos os pares e trios críticos de medidas, contendo mais de uma medida Básica, serão identificados ⁵. Após a realização dessas operações, os resultados obtidos são:

⁵Maiores detalhes podem ser encontrados em (London Jr.; Outubro de 2000).

-Uma medida crítica: I_4 ;

-Dois pares críticos: $[F_4; I_5], [F_5; I_6]$;

-Quatro trios críticos: $[F_1; I_1; F_3], [F_2; I_1; F_3], [F_1; F_2; F_3], [F_1; F_2; I_1]$.

Passo 5:

Através das informações obtidas nos Passos 3 e 4, as medidas ficam assim classificadas:

-Medida com NR 0: I_4 ;

-Medida com NR 1: F_4, F_5, I_5, I_6 ;

-Medida com NR 2: F_1, F_2, I_1, F_3 ;

Capítulo 4

Método para locação de medidores e UTRs

4.1 Introdução

Será proposto, neste capítulo, um método para locação de medidores e UTRs que possibilita a obtenção de planos de medição confiáveis para efeito de estimação de estados[(London Jr., Brito & Bretas; Setembro de 2002), (London Jr., Brito & Bretas; Junho de 2003)]¹.

O que motivou a proposição deste trabalho foi vislumbrar a possibilidade de obtenção de um método que superasse as limitações dos até então desenvolvidos para o mesmo fim, como a incapacidade de identificar, de uma forma direta, as UTRs críticas.

Para superar tal limitação, o método proposto se baseia na metodologia desenvolvida em (London Jr.; Outubro de 2000), que possibilita a identificação de conjuntos de medidas que, caso perdidas simultaneamente, fazem um SEP observável tornar-se não-observável.

4.2 Método Proposto

O método proposto pode ser utilizado para realizar as seguintes tarefas:

¹Considerando a definição de plano de medição confiável apresentada no Capítulo 1.

- (i) Projetar um plano de medição novo e confiável;
- (ii) Analisar e fortalecer um plano de medição já existente.

Considerando o fato de a grande maioria das companhias de energia elétrica estar mais interessada em tornar mais confiáveis os seus planos de medição, este trabalho mostrará como o método permite a realização da segunda tarefa descrita acima.

Em relação ao número de medidores e UTRs de um plano de medição já existente, o método proposto possibilita o seu fortalecimento de duas maneiras:

(i) Através da seleção e instalação de medidas candidatas: consiste na instalação de medidores novos, em usinas e subestações que já possuem UTRs e alguns medidores;

(ii) Através da seleção e instalação de UTRs candidatas: consiste na instalação de medidores e UTRs, em usinas e subestações previamente desprovidas desses equipamentos.

Para que o objetivo do método seja alcançado, o mesmo é dividido em três fases distintas, que serão apresentadas a seguir.

4.2.1 Fase 1: Análise e Restauração da Observabilidade

O primeiro passo desta fase é investigar se o SEP é observável considerando o plano de medição já existente. Caso não seja, o método permite determinar onde devem ser instalados medidores e/ou UTRs para tornar o SEP observável como um todo.

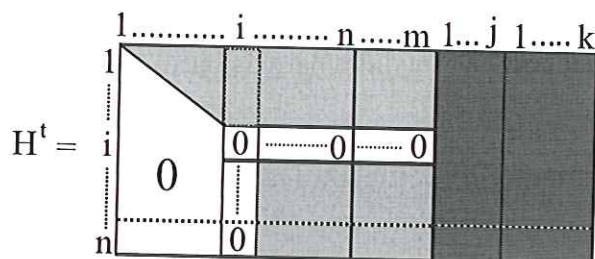
Para esta análise, proceder-se-á à fatoração triangular da matriz H^t . Se o sistema for observável, a fatoração resultará em apenas um Pivô Zero (PZ), na diagonal (n, n) , sendo “ n ” o número de barras do sistema ².

Caso o sistema não seja observável, surgirá, durante a fatoração de H^t , um PZ antes da diagonal (n, n) , não existindo, em tal momento, nenhuma outra coluna dentre as primeiras “ m ” colunas de H^t ³, com elemento não-nulo na linha do PZ.

²Isto porque, para o modelo real, se o sistema for observável, o posto da correspondente matriz H^t será $(n - 1)$.

³Sendo “ m ” o número de medidas já disponíveis no sistema, isto é, medidas fornecidas pelos

Isto indica a não-existência de medida disponível, dando a informação do estado equivalente correspondente à linha do PZ. Nesta situação, o próximo passo é a busca por uma medida candidata que dê aquela informação.



Onde:

- n - número de barras do sistema
- m - número de medidas já disponível do sistema
- i - linha do Pivo Zero, antecede (n, n)
- j - número de medidas candidatas do sistema
- k - número de medidas das UTRs candidatas do sistema

Figura 4.1: Matriz H^t com $PZ_{(i,i)}$, com m elementos da linha i nulos e as medidas e UTRs candidatas

Observação 4.1: De acordo com a figura (4.1), pode-se verificar que as medidas e UTRs candidatas são armazenadas na matriz H^t , após as medidas já existentes no plano de medição do sistema. Dessa forma, as colunas relativas as medidas e UTRs candidatas são fatoradas juntamente com as medidas já instaladas no sistema.

Observação 4.2: Na figura (4.1) a parte mais escura das “ m ” primeiras medidas da matriz H^t (em cinza) representa a região com elementos não-nulos, e a região sem preenchimento representa a região com elementos nulos.

Essa busca realiza-se da seguinte forma:

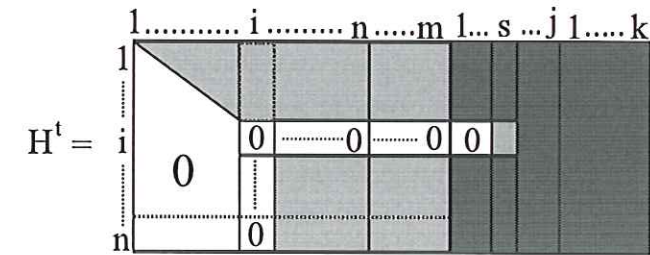
(i) Análise das medidas candidatas: Se existir, em tal momento, um elemento não-nulo na linha do PZ em pelo menos uma das colunas de H^t correspondente as medidas candidatas (de “ $m + 1$ ” até “ j ”), isto indica a existência de medida candidata que dá informação do estado equivalente correspondente à linha do PZ.

medidores já instalados (veja figura (4.1)).

Esta medida é selecionada para ser instalada, por ser necessária à restauração da observabilidade do sistema;

(ii) A coluna que representa a medida selecionada para ser instalada será inserida na matriz H^t , no lugar da coluna com PZ e a coluna com PZ será alocada no final das colunas relativas as medidas já existentes no sistema (Veja a figura (4.2).);

(iii) Na sequência o método continua a fatoração triangular da matriz H^t .



Onde:

- s - representa a medida candidata com elemento não nulo na linha do PZ

Figura 4.2: Matriz H^t com elemento não-nulo na linha (i) da medida candidata "s".

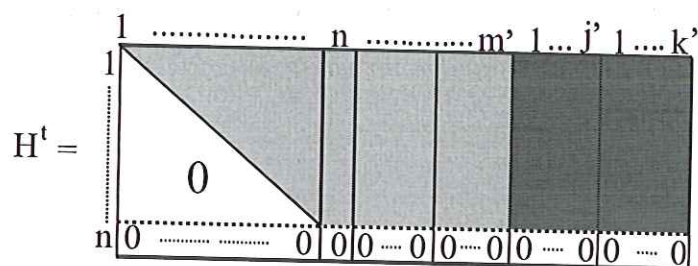
Podem haver situações em que não exista nenhuma medida candidata, que dê a informação do estado equivalente correspondente à linha do PZ, ou seja, situações que não permitem restaurar a observabilidade do sistema, através da instalação de um medidor em uma usina e/ou subestação, que já possuam UTR. Buscar-se-á, então, através das UTRs candidatas, uma que dê a informação desejada, de forma análoga à busca por medidas candidatas. A diferença entre ambas é que, na busca de UTR candidata, consideram-se, ao mesmo tempo, todas as medidas transmitidas por essa UTR. Logo, ao invés de termos 'uma' coluna inserida nas colunas relativas as medidas já existentes da matriz H^t , teremos "c" colunas a mais, sendo "c" o número de medidas transmitidas pela UTR candidata selecionada⁴.

O processo de busca por medidas e/ou UTRs candidatas continuará até que,

⁴Para selecionar uma UTR basta que uma de suas medidas dê a informação necessária.



na fatoração de H^t , apareça apenas um PZ na posição (n, n) . Nessa situação, a matriz H^t vai possuir a forma apresentada na figura (4.3).



Onde:

- m' - representa as m medidas já disponíveis no sistema mais as “c” medidas adicionadas
- j' - representa as “j” medidas candidatas, menos as instaladas
- k' - representa as “k” medidas das UTRs candidatas, menos as instaladas

Figura 4.3: Matriz H^t com PZ somente na diagonal (n, n)

Observação 4.3: Uma vez finalizada esta fase, pode-se garantir que o plano de medição atual torna o SEP observável.

4.2.2 Algoritmo da Fase 1

Passo 1:

Com o conjunto de medidas já disponível e com o conjunto de medidas e UTRs candidatas, monte a matriz H^t . Em seguida, fature H^t , armazenando os fatores triangulares, até $H^t_{(i,i)} = 0$. Se “ $i = n$ ”, o sistema é observável, considerando o plano de medição já existente, e fim de processamento. Caso contrário, vá para o próximo passo.

Passo 2:

Verifique se é possível obter-se a informação do estado equivalente, correspondente à linha “ i ”, através de uma das medidas candidatas. Se for possível, selecione essa medida e vá para o passo 3. Caso contrário, determine qual a UTR candidata que dá informação daquele estado equivalente. Em seguida, selecione essa UTR e vá para o passo 3.

Passo 3:

Continue a fatoração da matriz H^t , até que $H_{(i,i)}^t = 0$. Se $i = n$, o SEP é observável, considerando o plano de medição já existente e a instalação da(s) medida(s) e/ou UTR(s) selecionadas no passo 2; e fim de processamento. Caso contrário, volte ao passo 2.

4.2.3 Fase 2: Análise e restauração do NR das medidas

Nesta fase, tem-se por objetivo a obtenção de um plano de medição formado apenas por medidas com $NR > 1$, pois, considerando a definição de NR de medida apresentada no capítulo 2, para tal plano de medidas permitir-se-á afirmar que:

(i) Está garantida a ausência de medidas críticas e de conjuntos críticos de medidas ⁵, porquanto medida crítica tem $NR = 0$ e, de acordo com a definição de conjunto crítico de medidas, as medidas que constituem tais conjuntos possuem NR igual a 1;

(ii) O SEP associado ao mesmo continua observável, mesmo com a perda simultânea de duas medidas quaisquer, sendo estas transmitidas ou não por UTRs distintas.

Para a garantia de que todas as medidas de um plano de medição tenham $NR > 1$, é necessário garantir-se a não-existência de conjuntos p -críticos de medidas, com $p \leq 2$. Como todos os conjuntos p -críticos possuem pelo menos uma medida Básica, basta garantir-se que todas as medidas Básicas possuem $NR > 1$, para se ter a certeza da ausência de conjuntos p -críticos com $p \leq 2$.

Em razão disso, a primeira análise que o método proposto permite realizar, nesta fase, é identificar o NR das medidas Básicas, analisando a estrutura da matriz H_{Δ}^t ⁶, da forma apresentada no capítulo 3 ⁷. Caso exista alguma medida básica, com $NR \leq 1$, procede-se à busca das medidas e/ou UTRs candidatas, que propiciem o aumento de tal NR. Para isto, são duas as etapas necessárias:

⁵Definição apresentada no capítulo 3.

⁶Essa matriz é obtida a partir da matriz H^t , parcialmente fatorada na fase 1.

⁷Este método também pode ser encontrado em [(London Jr.; Outubro de 2000), (London Jr. et al. Setembro de 2001b)].

Etapa 1:

Determinar qual a informação dada pela medida básica com $NR \leq 1$: consiste em identificar a linha do elemento não-nulo, que aparece na coluna da matriz H_{Δ}^t , correspondente a essa medida.

Etapa 2:

Realizar a busca de uma medida e/ou UTR candidata, dando a informação do estado equivalente, correspondente à linha identificada na Etapa anterior ⁸.

4.2.4 Algoritmo da Fase 2

Considerando a seção anterior, o algoritmo da fase 2 consiste, basicamente, dos seguintes passos:

Passo 1:

A partir da matriz H^t , parcialmente fatorada na fase 1, obtenha a matriz H_{Δ}^t .

Passo 2: Identifique o NR das medidas básicas. Se existir alguma medida básica com $NR \leq 1$, vá para o próximo passo. Caso contrário, fim de processamento.

Passo 3:

Determine cada linha dos elementos não nulos, pertencentes às colunas peculiares de H_{Δ}^t , correspondentes às medidas Básicas com $NR \leq 1$. Vá para o próximo passo ⁹.

Passo 4:

Verifique se é possível obter a informação do estado equivalente, correspondente a, pelo menos, uma das linhas identificadas no passo 1, através de alguma medida candidata. Se for possível, selecione essa medida para ser instalada e volte ao

⁸Essa busca é a mesma utilizada na fase 1 do método. A diferença é que neste instante, ao invés de procurar uma coluna com elemento não-nulo na linha do PZ, procura-se uma coluna com elemento não-nulo na linha identificada na Etapa 1.

⁹Em cada uma das colunas de H_{Δ}^t , correspondentes às medidas Básicas, há apenas um elemento não-nulo, a que corresponde uma linha da citada matriz, sendo que, em duas colunas da mesma matriz, correspondentes a duas medidas Básicas quaisquer, os elementos não-nulos não podem se situar na mesma linha.

passo 1. Caso contrário, determine qual UTR candidata possui uma medida que dá a informação correspondente a uma daquelas linhas. Em seguida, selecione essa UTR e volte ao passo 2.

4.2.5 Fase 3: Identificando e aumentando a redundância das UTRs críticas

O objetivo desta fase é obter um plano de medição isento de UTRs críticas. Logo, a primeira tarefa do método, é verificar a existência de alguma UTR crítica, no plano de medição resultante da execução das fases 1 e 2 ¹⁰. Caso não exista, esse plano de medição é confiável e a análise se encerra. Caso contrário, o método permitirá determinar onde devem ser instalados medidor(es) e/ou UTR(s), para tornarem redundante(s) a(s) UTR(s) crítica(s) identificada(s).

De acordo com a definição de conjunto p -crítico de medidas, apresentada no capítulo 3, pode-se dizer que uma UTR é crítica se o conjunto de medidas transmitido por seu intermédio constituir, pelo menos, um conjunto p -crítico de medidas.

O método proposto permite a identificação das UTRs críticas, através da análise da estrutura da matriz H_{Δ}^t , resultante da execução das fases 1 e 2. Tal análise compreende duas etapas de classificação, que são as seguintes:

Etapa 1: UTRs que transmitem apenas uma medida Básica:

Através da estrutura da matriz H_{Δ}^t , identifique os conjuntos p -críticos de medidas, formados por apenas uma medida Básica. Em seguida, classifique como crítica a UTR que transmitir pelo menos um desses conjuntos.

Para tornar redundante a UTR identificada como crítica, verifique qual a linha correspondente ao conjunto p -crítico, transmitido por essa UTR. Proceda à busca de uma medida e/ou UTR candidata ¹¹, dando a informação do estado equivalente, correspondente àquela linha.

¹⁰Essa análise é bem direta, por consequência da rápida identificação dos conjuntos p -críticos de medidas.

¹¹A busca utilizada nesta fase é a mesma utilizada nas fases anteriores.

Nesta Etapa torna-se possível a identificação das UTRs críticas, que transmitem pelo menos um conjunto p -crítico formado por apenas uma medida Básica. Entretanto, como demonstrado em [(London Jr.; Outubro de 2000), (London Jr. et al. Setembro de 2001b)], podem existir conjuntos p -críticos, formados por mais de uma medida básica, cuja identificação não se faz diretamente através da estrutura da matriz H_{Δ}^t . Logo, podem existir UTRs, que são críticas por transmitirem pelo menos um desses conjuntos p -críticos. Proceder-se-á à identificação dessas UTRs críticas, na Etapa 2 desta análise.

Etapa 2: UTRs que transmitem mais de uma medida Básica:

Se existir alguma UTR ainda não identificada como crítica, que transmita mais de uma medida Básica, eliminam-se, da matriz H_{Δ}^t , as colunas correspondentes a todas as medidas transmitidas por ela. Em seguida, verifica-se se é possível obter-se uma nova matriz H_{Δ}^t , trocando-se as posições de algumas de suas colunas¹². Se isto for possível, a UTR que foi eliminada é classificada como redundante. Caso contrário, a mesma é classificada como crítica.

Para tornar redundante a UTR identificada como crítica na Etapa 2, determine qual(quais) a(s) linha(s) da matriz H_{Δ}^t , não considerando a última linha dessa matriz¹³, que, após a eliminação da UTR crítica, tenha(m) ficado com todos os seus elementos iguais a zero. Em sequência, proceda à busca da(s) medida(s) e/ou UTR(s) candidatas, que da(dão) informação(informações) do(s) estado(s) equivalente(s), correspondente(s) àquela(s) linha(s).

Esta Etapa é finalizada quando todas as UTRs que transmitirem mais de uma medida básica tiverem sido consideradas.

4.2.6 Algoritmo da Fase 3

Considerando as duas etapas referentes à identificação e ao aumento da redundância das UTRs críticas, citadas na subseção anterior, o algoritmo da Fase 3 consiste, basicamente, dos seguintes passos:

¹²Nesta etapa são consideradas as “ m ” medidas - menos as que correspondem a UTR eliminada - das colunas da matriz H_{Δ}^t .

¹³Por ser a linha relativa a barra previamente escolhida como referência angular.

Passo 1:

Classifique como redundantes as UTRs que transmitem somente medidas Suplementares. Como as mesmas não exigem nenhuma análise, vá para o próximo passo.

Passo 2:

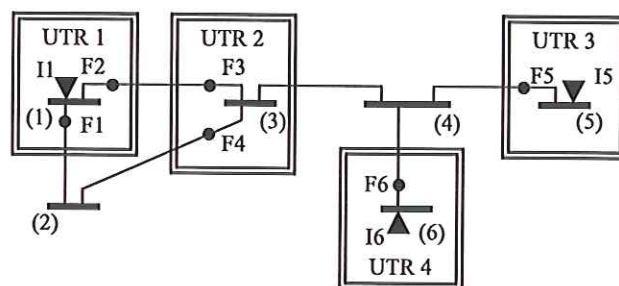
Identificação de UTR crítica. Se alguma das UTRs for identificada como crítica, vá para o próximo passo. Caso contrário, fim de processamento.

Passo 3:

Determinação e seleção das medidas e/ou UTRs candidatas, que tornam redundantes as UTRs identificadas como críticas no passo anterior. Retorne ao passo 2.

4.3 Exemplo

Neste exemplo, o método fará a análise e o fortalecimento, se necessário, do plano de medição associado ao sistema de 6 barras ilustrado na figura (4.4) ¹⁴.



Onde:

- - Medida de fluxo de potência.
- ◀ - Medida de injeção de potência.
- - Área que delimita as medidas pertencentes a uma determinada UTR.

Figura 4.4: Sistema de 6 barras associado a um plano de medição.

De acordo com a Figura (4.4), o conjunto de medidas e UTRs candidatas, para o fortalecimento daquele plano de medição, é o seguinte:

¹⁴Considera-se a existência de uma UTR por barra.

(i) 2 medidas candidatas: a medida de injeção na barra 3 (I_3) e a medida de fluxo da barra 3 para a barra 4 (F_7);

(ii) 2 UTRs candidatas: uma UTR na barra 2 (UTR 5), que transmite a medida de injeção na barra 2 (I_2) e as medidas de fluxo da barra 2 para a barra 1 (F_8) e da barra 2 para a barra 3 (F_9); e outra UTR na barra 4 (UTR 6), que transmite a medida de injeção na barra 4 (I_4), e as medidas de fluxo da barra 4 para a barra 3 (F_{10}), da barra 4 para a barra 5 (F_{11}) e da barra 4 para a barra 6 (F_{12}).

Considera-se que as medidas e UTRs indicadas na Figura (4.4) já estão instaladas no sistema, ou são pontos em que, necessariamente, devem existir medidores e UTRs.

Fase 1:

Passo 1: Forme a matriz jacobiana H^t associada ao conjunto de medidas disponíveis no sistema:

Observação 4.4: *A matriz H^t pode ser construída utilizando o valor real das reatâncias de linha, mas, como o NR das medidas depende somente do número, tipo e localização das mesmas, não do valor real dos parâmetros da rede, a matriz H^t utilizada no método proposto será construída atribuindo-se às reatâncias de linha o valor 1.*

Observação 4.5: *A matriz H^t deve ser construída considerando as medidas e UTRs candidatas, contudo neste exemplo mostraremos a matriz H^t somente com as medidas já instaladas no sistema, as medidas e UTRs candidatas serão apresentadas de forma individual no momento da busca para a melhor compreensão da aplicação do método proposto.*

$$H^t = \begin{array}{c} \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{array} \begin{array}{c} F_1 \quad F_2 \quad I_1 \quad F_3 \quad F_4 \quad F_5 \quad I_5 \quad F_6 \quad I_6 \\ \left[\begin{array}{cccccccccc} 1 & 1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{array} \right] \end{array}$$

Aplicando a fatoração triangular na matriz H^t até $H^t_{(n,n)} = 0$, obtém-se:

$$H^t = \begin{array}{c} \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{array} \begin{array}{c} F_1 \quad F_2 \quad I_1 \quad F_3 \quad F_4 \quad F_5 \quad I_5 \quad F_6 \quad I_6 \\ \left[\begin{array}{cccccccccc} 1 & 1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (1) & 1 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{array} \right] \end{array}$$

Observação 4.6: *Os números que aparecem entre parênteses são os fatores triangulares obtidos até o momento.*

Sendo $H^t_{(3,3)} = 0$, como $n \neq 3$ ($n = 6$), vá para o próximo passo.

Passo 2: Verificar se a medida candidata I_3 dá informação do estado equivalente, correspondente à linha 3. Analisa-se, então, a coluna na matriz H^t , em que foi armazenada a medida I_3 , como esta coluna está sendo fatorada juntamente com as colunas apresentadas na matriz H^t anterior, pode-se verificar que a matriz H^t e a medida candidata I_3 é:

$$H^t = \begin{array}{c} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \begin{array}{cccccccccc} F_1 & F_2 & I_1 & F_3 & F_4 & F_5 & I_5 & F_6 & I_6 & I_3 \\ \left[\begin{array}{cccccccccc} 1 & 1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ (1) & 1 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2 \\ 0 & (1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{array} \right] \end{array}$$

Como $H^t_{(3,10)} \neq 0$, selecione I_3 e vá para o passo 3.

Passo 3: Fatorando H^t até $H^t_{(i,i)} = 0$, obtém-se, após a troca de posições de algumas colunas de H^t que se fez necessária:

$$H^t = \begin{array}{c} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \begin{array}{cccccccccc} F_1 & F_2 & I_3 & F_5 & F_6 & F_3 & I_5 & F_4 & I_6 & I_1 \\ \left[\begin{array}{cccccccccc} 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ (1) & 1 & -2 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & (1) & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (1) & -1 & -1 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (1) & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right] \end{array}$$

Como $H^t_{(6,6)} = 0$ e $n = 6$, o sistema é observável, considerando o plano de medição já existente e a instalação da medida I_3 . Fim de processamento.

Fase 2:

Passo 1:

A partir da matriz H^t , parcialmente fatorada na fase 1, obtém-se a seguinte matriz H^t_{Δ} :

Como a coluna 11, que corresponde à medida F_7 , tem elemento não-nulo na linha 3, F_7 é selecionada para ser instalada; volte ao passo 2.

Observação 4.7: Neste caso, a medida F_7 contribui com apenas um elemento não nulo, na linha 3, aumentando o NR das medidas com elemento não nulo nesta linha. Como a análise anterior indicava apenas um elemento não-nulo na linha 3, referente à medida I_3 , essa medida era crítica. Agora, com a instalação da medida F_7 , a medida I_3 deixa de ser crítica, passando agora a constituir um par crítico com a medida F_7 .

Passo 2: As medidas básicas I_3 , F_5 e F_6 ainda possuem $NR \leq 1$.

Passo 3: As colunas correspondentes às medidas básicas I_3 , F_5 e F_6 possuem elementos não-nulos nas linhas 3, 4 e 5 respectivamente.

Passo 4: Como não existem mais medidas candidatas, o método vai analisar as UTRs candidatas. Analisando a UTR 5, obtém-se a seguinte matriz H_{Δ}^t :

$$H_{\Delta}^t = \begin{array}{c} \begin{array}{cccccccccccccccc} & F_1 & F_2 & I_3 & F_5 & F_6 & F_3 & I_5 & F_4 & I_6 & I_1 & F_7 & F_8 & F_9 & I_2 \\ 1 & \left[\begin{array}{cccc|cccccccc} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & -1 & -1 & -1 & -2 \\ 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 2 & 0 & 1 & 1 \\ 3 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right. \end{array} \end{array}.$$

Como não apareceu nenhum elemento não-nulo, nas linhas 3, 4 e 5, nas colunas de H_{Δ}^t , correspondentes às medidas transmitidas pela UTR 5¹⁵, esta UTR não será selecionada para ser instalada.

Ainda no passo 4, verifica-se que a próxima UTR candidata a ser analisada é a UTR 6, composta por 4 medidas. Analisando essa UTR, obtém-se a seguinte matriz H_{Δ}^t :

¹⁵Colunas referentes as medidas F_8 , F_9 e I_2 .

$$H_{\Delta}^t = \begin{array}{c} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \left[\begin{array}{cccccc|cccccccc} F_1 & F_2 & I_3 & F_5 & F_6 & F_3 & I_5 & F_4 & I_6 & I_1 & F_7 & F_{10} & F_{11} & F_{12} & I_4 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 2 & -2 & 0 & 0 & -2 \\ 3 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & -1 \\ 4 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 \\ 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right]$$

Como apareceram elementos não-nulos, nas linhas 3, 4 e 5, nas colunas de H_{Δ}^t , correspondentes às medidas transmitidas pela UTR 6, a instalação dessa UTR provoca um aumento do NR das medidas básicas I_3 , F_5 e F_6 . Conseqüentemente, essa UTR será selecionada para ser instalada; volte ao passo 2.

Passo 2: Todas as medidas básicas tem $NR > 1$. Fim de processamento.

Fase 3:

Passo 1: Observando as colunas da matriz H_{Δ}^t , obtidas das fases 1 e 2, verifica-se que a única UTR que transmite somente medidas suplementares é a UTR 6. Assim, essa UTR é imediatamente classificada como redundante.

Passo 2: Identificando UTR crítica.

Etapa 1: UTRs que transmitem apenas 1 medida Básica.

Através das linhas da matriz H_{Δ}^t , obtida das fases 1 e 2, identificam-se os seguintes conjuntos p -críticos formados por apenas 1 medida Básica¹⁶:

1ª Linha: $[F_1, F_4, I_1, F_7, F_{10}, I_4]$;

2ª Linha: $[F_2, F_3, F_4, I_1, F_7, F_{10}, I_4]$;

3ª Linha: $[I_3, F_7, F_{10}, I_4]$;

4ª Linha: $[F_5, I_5, F_{11}, I_4]$;

5ª Linha: $[F_6, I_6, F_{12}, I_4]$.

Analisando as medidas transmitidas por cada UTR do plano de medição resultante das fases 1 e 2, não considerando a UTR 6¹⁷, tem-se:

¹⁶ Através dos elementos não-nulos destas linhas.

¹⁷ Pois a UTR 6 já foi classificada como redundante no Passo 1.

UTR 1 - Transmite as medidas: $[F_1, F_2, I_1]$.

UTR 2 - Transmite as medidas: $[F_3, F_4, F_7, I_3]$.

UTR 3 - Transmite as medidas: $[F_5, I_5]$.

UTR 4 - Transmite as medidas: $[F_6, I_6]$.

Como as medidas descritas transmitidas pelas UTRs não constituem nenhum dos conjuntos p -críticos identificados anteriormente, pode-se concluir que nenhuma UTR é classificada como crítica nesta etapa.

Observação 4.8: *Se alguma UTR fosse identificada como crítica nessa Etapa, o procedimento seria uma busca por medida(s) e/ou UTR(s) que tornassem a mesma redundante.*

Etapa 2: UTR que transmite mais de uma medida Básica.

A UTR 1 é a única UTR do plano de medição resultante das fases 1 e 2 que transmite mais de uma medida básica. Assim, é necessário aplicar a análise da etapa 2 apenas para essa UTR.

Analisando a UTR 1: Eliminando da matriz H_{Δ}^t as colunas correspondentes às medidas transmitidas por essa UTR, que são as medidas básicas F_1 e F_2 , e a medida suplementar I_1 , obtém-se a matriz $H_{\Delta}^{t'}$:

$$H_{\Delta}^{t'} = \begin{array}{c} \begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{array} \left[\begin{array}{ccc|cccccccccccc} I_3 & F_5 & F_6 & F_3 & I_5 & F_4 & I_6 & F_7 & F_{10} & F_{11} & F_{12} & I_4 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 2 & -2 & 0 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right] \end{array}$$

Se for possível obter uma nova matriz $H_{\Delta}^{t'18}$, a partir da matriz $H_{\Delta}^{t'}$ mostrada acima, é porque a UTR 1 é redundante. Caso contrário, ela é crítica.

Analisando a matriz $H_{\Delta}^{t'}$, verifica-se que na 1ª linha da coluna correspondente à medida F_4 (coluna 6), aparece um elemento não-nulo. Isto indica que a medida

¹⁸Matriz $H_{\Delta}^{t'}$ é aquela que apresenta a estrutura mostrada na Equação (3.5), Página 30.

F_4 dá informação do estado equivalente correspondente à linha 1. Assim, com uma mudança nas posições das colunas de H'_Δ e através da fatoração triangular obtém-se a seguinte matriz:

$$H'_\Delta = \begin{array}{c} \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{array} \left[\begin{array}{cccc|cccccccc} F_4 & I_3 & F_5 & F_6 & F_3 & I_5 & I_6 & F_7 & F_{10} & F_{11} & F_{12} & I_4 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & -1 \\ 3 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & -1 \\ 4 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 \\ 5 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right]$$

Observação 4.9: *Se após esta última fatoração, a 2ª linha da matriz H'_Δ fosse composta apenas por zeros, a UTR 1 seria classificada como crítica por transmitir um par crítico formado pelas medidas básicas F_1 e F_2 . Nessa situação, o método realizaria a busca por uma candidata¹⁹ que desse a informação do estado equivalente correspondente à linha 2.*

Analisando a nova matriz H'_Δ , observa-se que aparece um elemento não-nulo na 2ª linha da coluna correspondente à medida F_3 (coluna 5). Assim, com uma mudança nas posições das colunas de H'_Δ e através da fatoração triangular obtém-se:

$$H^t_\Delta = \begin{array}{c} \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{array} \left[\begin{array}{cccc|cccccccc} F_4 & F_3 & I_3 & F_5 & F_6 & I_5 & I_6 & F_7 & F_{10} & F_{11} & F_{12} & I_4 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 3 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & -1 \\ 4 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 \\ 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right]$$

¹⁹Medida e/ou UTR.

Em razão de ter sido possível obter uma nova matriz H_{Δ}^t , a UTR 1 é classificada como redundante. Como nenhuma das outras UTRs transmite mais de uma medida básica, o método conclui que todas as UTRs do plano de medição resultante das fases 1 e 2 são redundantes. Fim de processamento.

Como resultado da análise do plano de medição mostrada na Figura (4.4), o método proposto indica que, para torná-lo confiável, é necessário a instalação de:

- (i) Um medidor de fluxo de potência da barra 3 para a barra 4;
- (ii) Um medidor de injeção de potência na barra 3;
- (iii) Uma UTR na barra 4, com um medidor de injeção de potência na mesma barra 4 e 3 medidores de fluxo de potência da barra 4 para as barras 3, 5 e 6.

Capítulo 5

Testes e Análise dos Resultados

Foram realizados diversos testes, visando comprovar a eficiência do método proposto para locação de medidores e UTRs, cujos resultados foram satisfatórios.

O alto grau de esparsidade da matriz H_{Δ}^t possibilita a utilização de uma estrutura de armazenamento, compacta e dinâmica, baseada na proposta em (Zollenkopf; 1971). Através dessa estrutura, são armazenados apenas os elementos não nulos da matriz H_{Δ}^t , diminuindo consideravelmente o tempo de execução das tarefas requeridas e a memória utilizada. No entanto, alguns inconvenientes podem surgir durante a fatoração da matriz H_{Δ}^t ¹. Em (London Jr.; Outubro de 2000), é apresentada uma forma de evitar que tal problema se traduza numa limitação para a aplicação do método.

Para a realização dos testes, utilizando o método proposto implementado, foram utilizados 4 SEPs. O primeiro deles é o IEEE 14 barras (Figura (5.1)), o segundo é o IEEE 30 barras (Figura (5.2)), o terceiro é o de 121 barras da ELETROSUL (Figura (5.3)) e por último o de 383 da CHESF. Dois planos de medição foram aplicados a cada um desses sistemas e testados através do programa implementado em linguagem C, num PC do tipo Pentium IV com processador 524 MHz, operando em ambiente Linux.

¹Tais como: aumentando o NR das medidas, o número de elementos não-nulos da submatriz R (veja a Equação (3.5), página 30) aumenta demasiadamente.

5.1 Testes Realizados

Para cada um dos testes realizados, o método proposto determina se o plano de medição em análise é confiável ². Caso não seja, o método indica as medidas e/ou UTRs candidatas que devem ser instaladas para torná-lo confiável.

Cada UTR instalada nos planos de medição descritos corresponde a um medidor de injeção de potência na devida barra e t medidores de fluxo de potência nos ramos adjacentes à barra, sendo t o número de ramos adjacentes àquela barra.

Nas tabelas que serão apresentadas a seguir, utiliza-se a seguinte notação:

- *PMI* \Rightarrow *Plano de Medição Inicial do Sistema;*
- *TM* \Rightarrow *Total de Medidas disponíveis (instaladas) no sistema;*
- *TU* \Rightarrow *Total de UTRs disponíveis (instaladas) no sistema;*
- *LC* \Rightarrow *Lista de medidas e UTRs Candidatas;*
- *TMC* \Rightarrow *Total de Medidas Candidatas a serem instaladas em subestações e/ou usinas que já possuem UTR e alguns medidores;*
- *TUC* \Rightarrow *Total de UTRs Candidatas a serem instaladas em subestações e/ou usinas que não possuem UTR;*
- *TMS* \Rightarrow *Total de Medidas candidatas Selecionadas numa determinada Fase;*
- *TUS* \Rightarrow *Total de UTRs candidatas Selecionadas numa determinada Fase;*

Observação 5.1: *Os testes realizados consideram a existência de uma UTR por barra, mas isto não representa uma limitação do método.*

Observação 5.2: *A instalação de uma UTR, em uma barra “ i ” qualquer, corresponde à instalação de um medidor de injeção de potência na barra “ i ” e de medidores de fluxo de potência em todos os ramos adjacentes à barra “ i ”.*

²Considerando a definição de plano de medição confiável apresentada no Capítulo 1.

5.1.1 Testes com o sistema de 14 barras do IEEE

No sistema de 14 barras do IEEE, mostrado na figura (5.1), foram considerados dois planos de medição, os quais serão descritos a seguir:

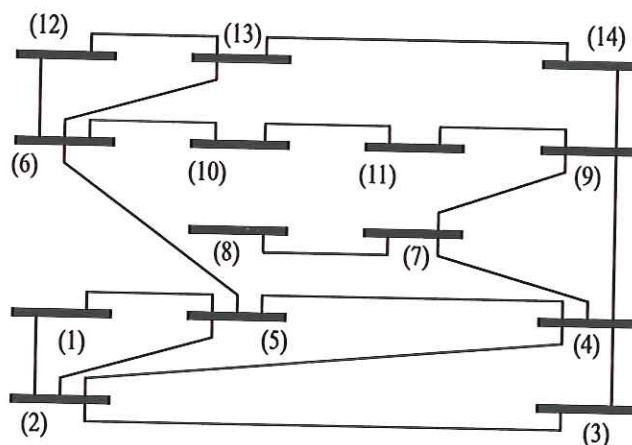


Figura 5.1: Topologia do sistema de 14 barras do IEEE

Plano de Medição 1

Possui um total de 16 medidas distribuídas em 11 UTRs³, sendo 10 medidas de injeção de potência nas barras 1, 2, 3, 4, 7, 9, 11, 12, 13 e 14; 6 medidas de fluxo de potência nos ramos (1 – 2), (1 – 5), (4 – 7), (6 – 10), (7 – 8) e (7 – 9).

As UTRs instaladas transmitem as seguintes medidas:

UTR 1 - Transmite as medidas: $[F_{(1-2)}, F_{(1-5)} \text{ e } I_1]$;

UTR 2 - Transmite a medida: $[I_2]$;

UTR 3 - Transmite a medida: $[I_3]$;

UTR 4 - Transmite as medidas: $[F_{(4-7)} \text{ e } I_4]$;

UTR 6 - Transmite a medida: $[F_{(6-10)}]$;

UTR 7 - Transmite as medidas: $[F_{(7-8)}, F_{(7-9)} \text{ e } I_7]$;

UTR 9 - Transmite a medida: $[I_9]$;

UTR 11 - Transmite a medida: $[I_{11}]$;

UTR 12 - Transmite a medida: $[I_{12}]$;

UTR 13 - Transmite a medida: $[I_{13}]$;

³O NR global do plano de medição 1 é igual a 1,23.

UTR 14 - Transmite a medida: $[I_{14}]$;

A lista de medidas e UTRs candidatas é composta por 27 medidas candidatas a serem instaladas em subestação ou usina que já contém UTR; 3 UTRs candidatas a serem instaladas em subestação ou usina que não possuem UTR.

Para este plano de medição, o resultado obtido foi:

PMI	LC	FASE 1	FASE 2	FASE 3	TEMPO
$TM = 16$	$TMC = 27$	$TMS = 0$	$TMS = 5$	$TMS = 0$	0,0000 Seg.
$TU = 11$	$TUC = 3$	$TUS = 0$	$TUS = 1$	$TUS = 0$	

Tabela 5.1: Resultado do plano de medição 1 - Sistema IEEE 14 barras

Na FASE 2, o método indica que a medida $F_{(6-5)}$ é crítica; com a instalação da medida candidata $F_{(6-12)}$, a medida $F_{(6-5)}$ deixa de ser crítica. Agora, as medidas $F_{(6-5)}$ e $F_{(6-12)}$ constituem um par crítico com apenas uma medida básica. Com a instalação da medida candidata I_6 , este par crítico deixa de existir.

Verificou-se ainda que as medidas que dão informação do estado equivalente correspondente a linha 8, o qual será chamado simplesmente de estado equivalente 8, constituem um par crítico com apenas uma medida básica (medidas $F_{(7-8)}$ e I_7). Este par crítico deixa de existir com a instalação da UTR candidata na barra 8⁴.

Após a instalação da UTR na barra 8, um novo par crítico é identificado, mas este é composto por duas medidas básicas I_3 e I_4 . Mesmo instalando a medida $F_{(3-2)}$, este par crítico não deixa de existir, pois será eliminado somente com a instalação da medida candidata $F_{(3-4)}$, tornando o plano de medição confiável.

O método proposto indica que, para tornar confiável o plano de medição 1, é necessária a instalação de:

- Medidores de fluxo de potência nos ramos: $(6 - 5)$, $(6 - 12)$ e $(3 - 2)$, $(3 - 4)$;
- Um medidor de injeção de potência na barra 6;

⁴A UTR candidata da barra 8, que foi instalada, contém pelo menos mais uma medida que dá a informação do estado equivalente 8.

-Uma UTR na barra 8, com um medidor de injeção nesta barra e um medidor de fluxo de potência, no ramo (8 – 7).

Plano de medição 2

Possui um total de 27 medidas distribuídas em 10 UTRs ⁵, sendo 10 medidas de injeção de potência, nas barras 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 11, 13 e 14; 17 medidas de fluxo de potência, nos ramos (1 – 5), (2 – 1), (3 – 2), (3 – 4), (4 – 7), (6 – 10), (6 – 12), (6 – 13), (7 – 9), (8 – 7), (11 – 9), (11 – 10), (13 – 6), (13 – 12), (13 – 14), (14 – 9) e (14 – 13).

As UTRs instaladas transmitem as seguintes medidas:

UTR 1 - Transmite as medidas: $[F_{(1-5)} e I_1]$;

UTR 2 - Transmite as medidas: $[F_{(2-1)} e I_2]$;

UTR 3 - Transmite as medidas: $[F_{(3-2)}, F_{(3-4)} e I_3]$;

UTR 4 - Transmite as medidas: $[F_{(4-7)} e I_4]$;

UTR 6 - Transmite as medidas: $[F_{(6-10)}, F_{(6-12)}, F_{(6-13)} e I_6]$;

UTR 7 - Transmite as medidas: $[F_{(7-9)} e I_7]$;

UTR 8 - Transmite as medidas: $[F_{(8-7)} e I_8]$;

UTR 11 - Transmite as medidas: $[F_{(11-9)}, F_{(11-10)} I_{11}]$;

UTR 13 - Transmite as medidas: $[F_{(13-6)}, F_{(13-12)}, F_{(13-14)} e I_{13}]$;

UTR 14 - Transmite as medidas: $[F_{(14-9)}, F_{(14-13)} e I_{14}]$;

A lista de medidas e UTRs candidatas é composta por 11 medidas candidatas a serem instaladas em subestação ou usina que já contém UTR; 4 UTRs candidatas a serem instaladas em subestação ou usina que não possuem UTR.

Para este plano de medição o resultado obtido foi:

PMI	LC	FASE 1	FASE 2	FASE 3	TEMPO
$TM = 27$	$TMC = 11$	$TMS = 0$	$TMS = 0$	$TMS = 0$	0,0000 Seg.
$TU = 10$	$TUC = 4$	$TUS = 0$	$TUS = 0$	$TUS = 2$	

Tabela 5.2: Resultado do plano de medição 2 - Sistema IEEE 14 barras

Na FASE 3, ETAPA 1, a UTR 11 foi classificada como crítica. Instalou-se a UTR candidata na barra 9. Na FASE 3, ETAPA 2, a UTR 6 foi classificada

⁵O NR global do plano de medição 2 é igual a 2,07.

como crítica. Com a instalação da UTR referente à barra 10, o plano de medição tornou-se confiável. Assim, o método proposto indica que, para tornar confiável o plano de medição 2, é necessária a instalação de:

- UTRs nas barra 9 e 10, com um medidor de injeção de potência nas barras 9 e 10 e medidores de fluxo de potência nos ramos: (9-4), (9-7), (9-11), (9-14), (10-6) e (10-11).

5.1.2 Testes com o sistema de 30 barras do IEEE

No sistema de 30 barras do IEEE, ilustrado na figura (5.2), foram utilizados os seguintes planos de medição:

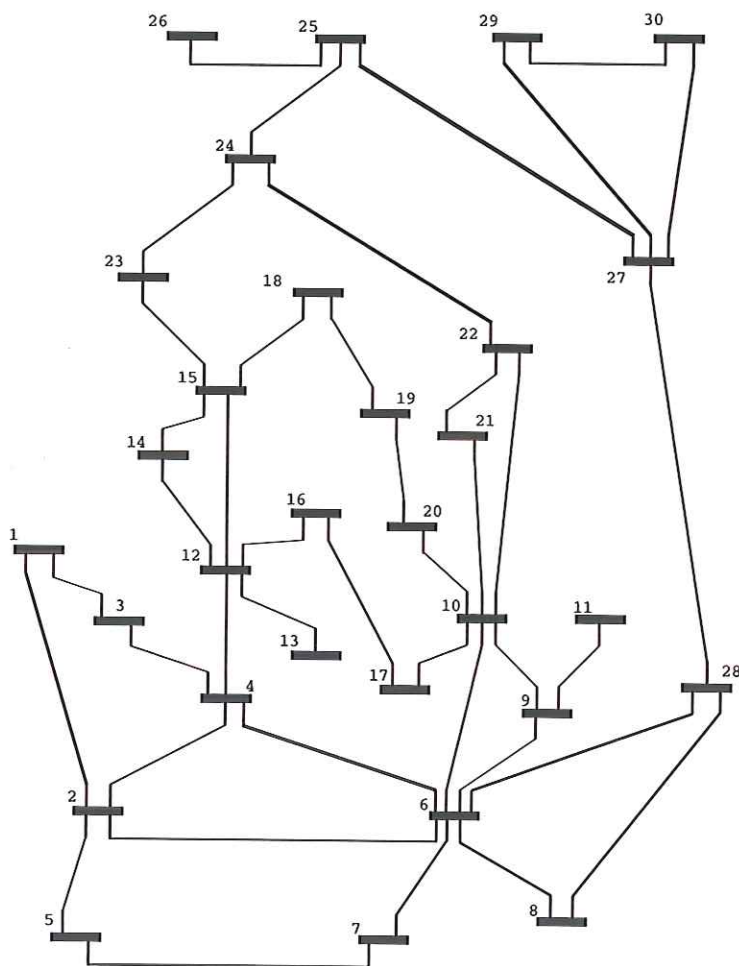


Figura 5.2: Topologia do sistema de 30 barras do IEEE

Plano de medição 1

- Medidas de fluxo de potência: 61;
- Medidas de injeção de potência: 23;
- UTRs instaladas no sistema: 23;
- Medidas candidatas: 28;
- UTRS candidatas: 7.

As medidas que compõem o plano de medição 1 estão descritas na tabela (5.3)⁶ e os resultados obtidos estão na tabela (5.4).

Medidas de fluxo de potência nos ramos:
(2 – 1),(2 – 5),(2 – 6), (3 – 1), (3 – 4), (4 – 3),(4 – 6), (4 – 15),(6 – 4),(6 – 8), (6 – 9), (6 – 10), (7 – 5), (7 – 6), (9 – 6), (9 – 10), (9 – 11), (10 – 6), (10 – 9), (10 – 17), (10 – 20), (10 – 22), (11 – 9), (12 – 4), (12 – 13), (12 – 14), (12 – 15), (12 – 16), (13 – 12), (14 – 12), (14 – 15), (15 – 12), (15 – 18), (15 – 23), (16 – 12), (16 – 17), (17 – 10), (17 – 16), (18 – 15), (18 – 19), (20 – 10), (20 – 19), (22 – 10), (22 – 21), (22 – 24), (23 – 15), (23 – 24), (24 – 22), (24 – 23), (24 – 25), (25 – 24), (25 – 26), (25 – 27), (27 – 25), (27 – 28), (27 – 29), (27 – 30), (29 – 27), (29 – 30), (30 – 27), (30 – 29).
Medidas de injeção de potência nas barras:
2,3, 4, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 20, 22, 23, 24, 25, 27, 29, 30.

Tabela 5.3: Plano de medição 1 do sistema IEEE 30 barras

PMI	LC	FASE 1	FASE 2	FASE 3	TEMPO
$TM = 84$	$TMC = 28$	$TMS = 0$	$TMS = 1$	$TMS = 1$	0,0010 Seg.
$TU = 23$	$TUC = 07$	$TUS = 1$	$TUS = 2$	$TUS = 0$	

Tabela 5.4: Resultado do plano de medição 1 - Sistema IEEE 30 barras

O método proposto indica que, para tornar confiável o plano de medição 1, é necessária a instalação de:

- Medidores de Fluxo de Potência nos ramos: (4 – 2),(15 – 14);

⁶O NR global do plano de medição 1 é igual a 2,89.

- UTRs nas barras: 8, 19, 26.

Plano de medição 2

- Medidas de fluxo de potência: 54;
- Medidas de injeção de potência: 20;
- UTRs instaladas no sistema: 20;
- Medidas candidatas: 38;
- UTRS candidatas: 10.

As medidas que compõem o plano de medição 2 estão descritas na tabela (5.5)⁷ e os resultados obtidos estão na tabela (5.6).

Medidas de fluxo de potência nos ramos:
(1 - 2), (2 - 1), (2 - 4), (2 - 6), (4 - 2), (4 - 3), (4 - 15), (5 - 2), (5 - 7), (6 - 4), (6 - 7), (6 - 10), (8 - 6), (8 - 28), (9 - 6), (9 - 10), (9 - 11), (10 - 6), (10 - 9), (10 - 17), (10 - 20), (10 - 21), (10 - 22), (12 - 4), (12 - 14), (12 - 15), (12 - 16), (14 - 12), (14 - 14), (15 - 14), (15 - 23), (17 - 10), (17 - 16), (19 - 18), (19 - 20), (21 - 20), (21 - 22), (22 - 10), (22 - 21), (22 - 24), (23 - 15), (23 - 24), (25 - 24), (25 - 26), (25 - 27), (27 - 25), (27 - 28), (27 - 29), (27 - 30), (28 - 6), (28 - 8), (28 - 27), (30 - 27), (30 - 29).
Medidas de injeção de potência nas barras:
1, 2, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 12, 14, 15, 17, 19, 21, 22, 23, 25, 27, 28, 30.

Tabela 5.5: Plano de medição 2 do sistema IEEE 30 barras

PMI	LC	FASE 1	FASE 2	FASE 3	TEMPO
$TM = 74$	$TMC = 38$	$TMS = 0$	$TMS = 1$	$TMS = 0$	0,0010 Seg.
$TU = 20$	$TUC = 10$	$TUS = 0$	$TUS = 3$	$TUS = 2$	

Tabela 5.6: Resultado do plano de medição 2 - Sistema IEEE 30 barras

O método proposto indica que, para tornar confiável o plano de medição 2, é necessária a instalação de:

⁷O NR global do plano de medição 2 é igual a 2,55.

- Um Medidor de Fluxo de Potência no ramo: (13 – 12);
- UTRs nas barras: 11, 13, 18, 20, 26.

5.1.3 Testes com o sistema de 121 barras da ELETROSUL

No sistema de 121 barras da ELETROSUL, ilustrado na figura (5.3), foram utilizados os seguintes planos de medição:

Plano de medição 1

- Medidas de fluxo de potência: 104;
- Medidas de injeção de potência: 81;
- UTRs instaladas no sistema: 81;
- Medidas candidatas: 89;
- UTRS candidatas: 40.

As medidas que compõem o plano de medição 1 estão descritas na tabela (5.11) ⁸ e os resultados obtidos estão na tabela (5.7).

PMI	LC	FASE 1	FASE 2	FASE 3	TEMPO
$TM = 185$	$TMC = 89$	$TMS = 1$	$TMS = 15$	$TMS = 0$	0,3500 Seg.
$TU = 81$	$TUC = 40$	$TUS = 1$	$TUS = 33$	$TUS = 0$	

Tabela 5.7: Resultado do plano de medição 1 - SEP 121 barras da ELETROSUL

O método proposto indica que, para tornar confiável o plano de medição 1, é necessária a instalação de:

- Medidores de Fluxo de Potência nos ramos: (5 – 7), (5 – 10), (23 – 22), (31 – 30), (32 – 31), (32 – 33), (32 – 50), (39 – 42), (39 – 45), (75 – 66), (79 – 85), (85 – 93), (86 – 88), (99 – 100), (99 – 101), (120 – 119) ;
- UTRs nas barras: 1, 6, 8, 9, 18, 22, 24, 26, 28, 30, 33, 34, 41, 44, 47, 48, 49, 54, 57, 58, 63, 70, 72, 81, 83, 92, 96, 98, 101, 107, 115, 119, 121.

Plano de medição 2

- Medidas de fluxo de potência: 156;
- Medidas de injeção de potência: 93;

⁸O NR global do plano de medição 1 é igual a 1,54.

- UTRs instaladas no sistema: 96;
- Medidas candidatas: 37;
- UTRS candidatas: 25.

As medidas que compõem o plano de medição 2 estão descritas na tabela (5.12) ⁹ e os resultados obtidos estão na tabela (5.8).

PMI	LC	FASE 1	FASE 2	FASE 3	TEMPO
$TM = 249$	$TMC = 37$	$TMS = 3$	$TMS = 9$	$TMS = 0$	0,4200 Seg.
$TU = 96$	$TUC = 25$	$TUS = 2$	$TUS = 16$	$TUS = 0$	

Tabela 5.8: Resultado do plano de medição 2 - SEP 121 barras da ELETROSUL

O método proposto indica que, para tornar confiável o plano de medição 2, é necessária a instalação de:

- Medidores de Injeção de Potência nas barras: 12, 16, 21, 36, 85;
- Medidores de Fluxo de Potência nos ramos: (5 – 3), (5 – 7), (5 – 10), (6 – 5), (7 – 5), (32 – 33), (32 – 50);
- UTRs nas barras: 6, 23, 27, 31, 34, 40, 42, 45, 50, 51, 55, 58, 70, 75, 77, 93, 107, 120.

5.1.4 Testes com o sistema de 383 barras da CHESF

Corresponde a uma das configurações do sistema de 383 barras da CHESF, foram utilizados os seguintes planos de medição:

Plano de medição 1

- Medidas de fluxo de potência: 343;
- Medidas de injeção de potência: 210 ;
- UTRs instaladas no sistema: 210;
- Medidas candidatas: 276;
- UTRS candidatas: 173.

⁹O NR global do plano de medição 2 é igual a 2,08.

As medidas que compõem o plano de medição 1 estão descritas acima¹⁰ e os resultados obtidos estão na tabela (5.9).

PMI	LC	FASE 1	FASE 2	FASE 3	TEMPO
$TM = 553$	$TMC = 276$	$TMS = 12$	$TMS = 36$	$TMS = 26$	2,320 Seg.
$TU = 210$	$TUC = 173$	$TUS = 34$	$TUS = 47$	$TUS = 16$	

Tabela 5.9: Resultado do plano de medição 1 - SEP 383 barras da CHESF

Plano de medição 2

- Medidas de fluxo de potência: 447;
- Medidas de injeção de potência: 321;
- UTRs instaladas no sistema: 321;
- Medidas candidatas: 108;
- UTRS candidatas: 62.

As medidas que compõem o plano de medição 2 estão descritas acima¹¹ e os resultados obtidos estão na tabela (5.10).

PMI	LC	FASE 1	FASE 2	FASE 3	TEMPO
$TM = 768$	$TMC = 108$	$TMS = 8$	$TMS = 17$	$TMS = 6$	2,860 Seg.
$TU = 321$	$TUC = 62$	$TUS = 18$	$TUS = 9$	$TUS = 7$	

Tabela 5.10: Resultado do plano de medição 2 - SEP 383 barras da CHESF

Observação 5.3: *A topologia e o detalhamento das medidas dos planos de medição 1 e 2 do sistema de 383 barras da CHESF não foram apresentados porque suas dimensões inviabilizam a apresentação dos mesmos neste trabalho.*

5.2 Análise dos Resultados

Analisando os resultados obtidos na seção anterior, pode-se verificar que, mesmo utilizando planos de medição com NR global maior que 2, o método identificou medidas críticas, pares críticos e até UTRs críticas. Comprova-se, mais

¹⁰O NR global do plano de medição 1 é igual a 1,45.

¹¹O NR global do plano de medição 2 é igual a 2,10.

uma vez, que a redundância global não expressa a real situação das medidas¹². Isso demonstra que o NR local expressa uma situação mais real das medidas de um SEP, ratificando a eficiência da metodologia utilizada como ferramenta para o desenvolvimento do método proposto.

Nos sistemas utilizados para teste, pode-se verificar que muitas vezes a UTR a ser instalada não precisa conter todos os medidores relativos às suas adjacências, por exemplo, no sistema de 14 barras do IEEE - plano de medição 2 - a UTR 9 selecionada a ser instalada precisa ter apenas um medidor de injeção de potência na barra 9 e um medidor de fluxo de potência em qualquer um dos ramos adjacentes à barra 9 ¹³.

Verifica-se, também, para o mesmo plano de medição, que, instalando a UTR 10, ao invés da UTR 9, a mesma torna o plano de medição confiável, mas, para que isso aconteça, devem ser considerados todos os medidores relativos à UTR 10 ¹⁴.

Podemos verificar então que o método pode ser usado para obter um plano de medição de baixo custo, minimizando o número de medidores e/ou UTRs a serem instaladas.

Como o método proposto é uma aplicação “off-line” os tempos de execução obtidos são mais que satisfatórios ¹⁵. Visto que, identifica UTR crítica e indica a medida e/ou UTR candidata a ser instalada para tornar o plano de medição confiável, de uma forma bastante simples e rápida.

¹²Nos trabalhos de (Çelik & Edwin Liu; Agosto de 1995), (London Jr.; Outubro de 2000) e (London Jr. et al. Junho de 2000b), isto já havia sido verificado.

¹³A barra 9 tem 4 adjacências.

¹⁴Um medidor de injeção de potência na barra 10 e dois medidores de fluxo de potência nos ramos: (10 – 6) e (10 – 11).

¹⁵Lembrando que os tempos de execução obtidos consideram a busca pela medida e/ou UTR a ser instalada.

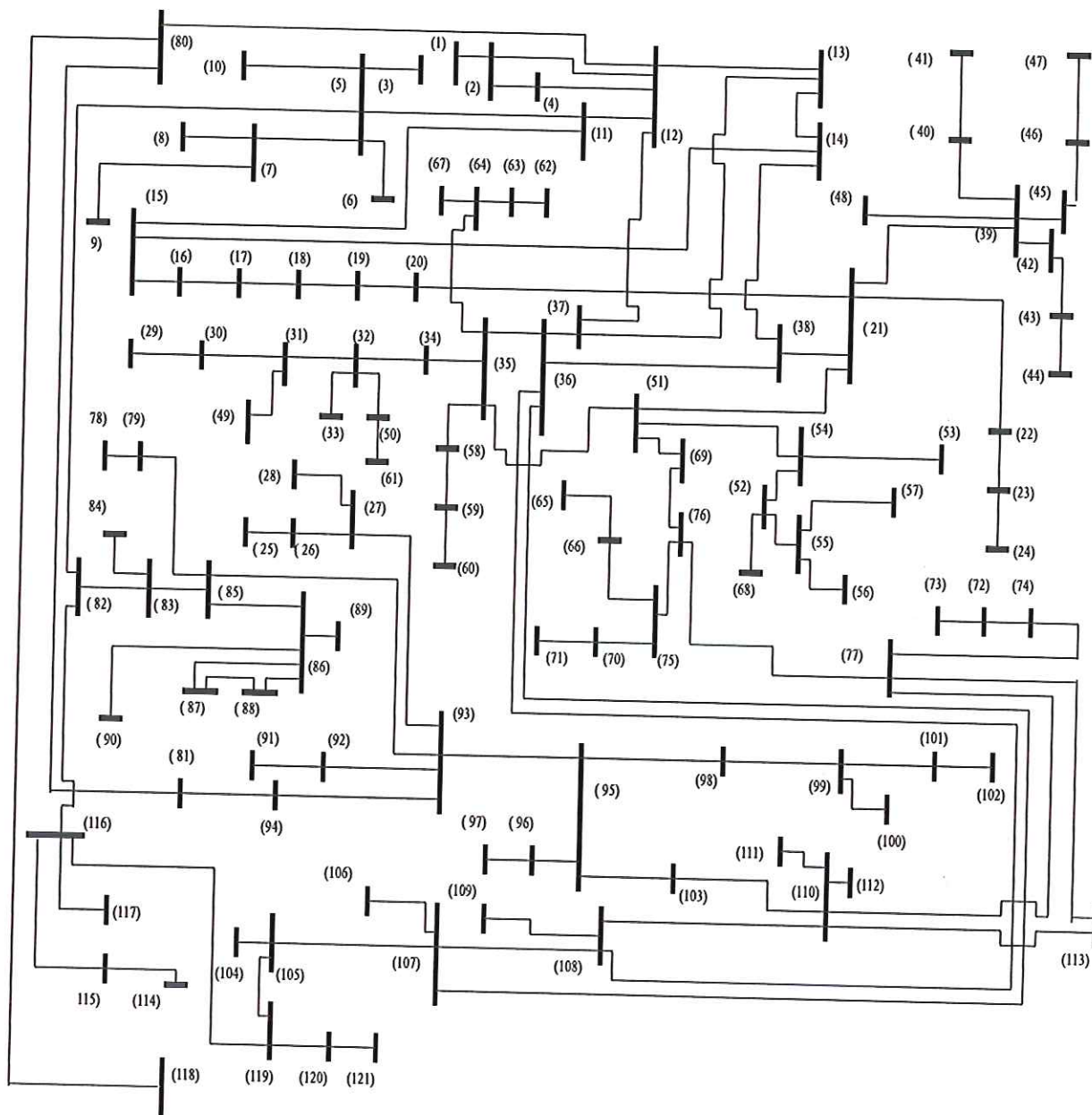


Figura 5.3: Topologia do sistema de 121 barras da ELETROSUL

Medidas de fluxo de potência nos ramos:
(2 – 4), (2 – 12), (3 – 5), (5 – 6), (5 – 11), (5 – 82), (7 – 8), (7 – 9), (10 – 5), (11 – 12), (12 – 37), (12 – 80), (13 – 14), (14 – 15), (15 – 16), (17 – 18), (19 – 20), (20 – 21), (21 – 22), (21 – 38), (21 – 39), (21 – 51), (23 – 24), (25 – 26), (27 – 93), (29 – 30), (31 – 49), (32 – 34), (35 – 34), (35 – 51), (35 – 58), (35 – 64), (36 – 37), (39 – 40), (39 – 48), (40 – 41), (42 – 43), (43 – 44), (45 – 46), (46 – 47), (50 – 32), (51 – 54), (52 – 54), (53 – 54), (55 – 52), (55 – 57), (56 – 55), (59 – 58), (60 – 59), (61 – 50), (62 – 63), (64 – 63), (65 – 66), (66 – 75), (67 – 64), (68 – 52), (69 – 51), (71 – 70), (73 – 72), (74 – 77), (75 – 76), (76 – 77), (77 – 110), (77 – 113), (78 – 79), (79 – 78), (80 – 81), (80 – 118), (82 – 116), (84 – 83), (85 – 83), (85 – 86), (86 – 89), (87 – 88), (89 – 86), (90 – 86), (91 – 92), (93 – 94), (93 – 95), (95 – 96), (95 – 98), (95 – 103), (97 – 96), (99 – 98), (100 – 99), (102 – 101), (104 – 105), (105 – 107), (105 – 119), (106 – 107), (108 – 107), (108 – 110), (109 – 108), (110 – 103), (111 – 110), (112 – 110), (113 – 77), (114 – 115), (116 – 115), (116 – 117), (116 – 119), (117 – 116), (118 – 80), (120 – 121).
Medidas de injeção de potência nas barras:
2, 3, 5, 7, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 17, 19, 20, 21, 23, 25, 27, 29, 31, 32, 35, 36, 39, 40, 42, 43, 45, 46, 50, 51, 52, 53, 55, 56, 59, 60, 61, 62, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 71, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 82, 84, 85, 86, 87, 89, 90, 91, 93, 95, 97, 99, 100, 102, 104, 105, 106, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 116, 117, 118, 120.

Tabela 5.11: Plano de medição 1 do sistema de 121 barras da ELETROSUL

Medidas de fluxo de potência nos ramos:
(1 - 2), (2 - 1), (2 - 4), (2 - 12), (3 - 5), (5 - 6), (5 - 11), (5 - 82), (7 - 8), (7 - 9), (8 - 7), (9 - 7), (10 - 5), (12 - 37), (12 - 80), (13 - 12), (13 - 14), (14 - 15), (14 - 38), (16 - 15), (16 - 17), (17 - 18), (18 - 17), (18 - 19), (19 - 18), (19 - 20), (21 - 20), (21 - 22), (21 - 38), (21 - 39), (21 - 51), (24 - 23), (25 - 26), (26 - 27), (28 - 27), (29 - 30), (30 - 29), (30 - 31), (32 - 31), (32 - 34), (33 - 32), (35 - 34), (35 - 58), (35 - 64), (36 - 35), (36 - 37), (36 - 38), (36 - 107), (36 - 108), (37 - 12), (37 - 13), (39 - 21), (39 - 40), (39 - 42), (39 - 45), (39 - 48), (41 - 40), (43 - 42), (43 - 44), (44 - 43), (46 - 45), (46 - 47), (47 - 46), (48 - 39), (49 - 31), (52 - 54), (52 - 55), (52 - 68), (53 - 54), (54 - 51), (54 - 52), (54 - 53), (56 - 55), (57 - 55), (59 - 58), (59 - 60), (60 - 59), (61 - 50), (62 - 63), (63 - 64), (64 - 63), (64 - 67), (65 - 66), (66 - 75), (67 - 64), (68 - 52), (69 - 51), (69 - 76), (71 - 70), (72 - 73), (72 - 74), (73 - 72), (74 - 77), (74 - 77), (76 - 69), (76 - 75), (76 - 77), (78 - 79), (79 - 85), (80 - 81), (81 - 94), (83 - 82), (83 - 85), (84 - 83), (85 - 79), (85 - 83), (85 - 86), (85 - 93), (86 - 85), (86 - 87), (86 - 88), (86 - 89), (86 - 90), (87 - 86), (87 - 88), (89 - 86), (90 - 86), (91 - 92), (94 - 93), (94 - 81), (95 - 93), (95 - 96), (96 - 95), (96 - 97), (97 - 96), (98 - 95), (98 - 99), (99 - 100), (99 - 101), (100 - 99), (101 - 102), (102 - 101), (103 - 95), (104 - 105), (105 - 107), (105 - 119), (106 - 107), (108 - 107), (108 - 110), (109 - 108), (110 - 77), (110 - 103), (111 - 110), (112 - 110), (113 - 77), (113 - 110), (114 - 115), (115 - 114), (115 - 116), (116 - 117), (116 - 119), (117 - 116), (118 - 80), (119 - 105), (119 - 120), (121 - 120).
Medidas de injeção de potência nas barras:
1, 2, 3, 5, 7, 8, 9, 10, 13, 14, 16, 17, 18, 19, 22, 24, 25, 26, 28, 29, 30, 32, 33, 35, 37, 39, 40, 41, 43, 44, 46, 47, 48, 49, 52, 53, 54, 56, 57, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 71, 72, 73, 74, 76, 78, 79, 80, 81, 83, 84, 86, 87, 89, 90, 91, 92, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 121.

Tabela 5.12: Plano de medição 2 do sistema de 121 barras da ELETROSUL

Capítulo 6

Conclusões

Os métodos desenvolvidos para o projeto e fortalecimento de planos de medição não dão um tratamento adequado às UTRs.

Conforme mostrado no Capítulo 2, em muitos nem se considera a sua existência e, naqueles que consideram, são requeridas muitas iterações para a identificação de UTRs críticas, pois os mesmos utilizam algoritmos de identificação de medidas críticas.

Na tentativa de superar tal limitação, neste trabalho foi proposto um método para projeto e fortalecimento de planos de medição para efeito de estimação de estados ¹.

Baseando-se na metodologia desenvolvida em (London Jr.; Outubro de 2000), que permite a identificação dos conjuntos p -críticos de medidas e possui um bom embasamento teórico, o método proposto permite a identificação das UTRs críticas de uma forma mais direta. Em razão disso, o mesmo possibilita a análise e o fortalecimento de planos de medição de uma forma mais robusta, no sentido de exigir menos iterações.

Apesar de o método proposto ter sido desenvolvido considerando as reatâncias de linha com valor 1 ², este não demonstra dificuldade em utilizar o valor real dos parâmetros da rede.

Em razão de dar um tratamento numérico às informações topológicas obtidas

¹Este método foi apresentado no capítulo 4.

²Pois o seu desenvolvimento se realiza, apenas, com informações topológicas.

através da estrutura da matriz H_{Δ} , o método não está sujeito aos problemas apresentados em (Monticelli, Garcia & Slutsker; Agosto de 1992), que aparecem nos métodos puramente topológicos.

O método proposto desenvolve-se em três fases, baseando-se na fatoração da matriz Jacobiana e na análise da estrutura da matriz H_{Δ} .

Através da estrutura da matriz H_{Δ} , torna-se possível, sem a exigência de cálculo numérico excessivo, a análise e a restauração da observabilidade, a identificação e a restauração da redundância das medidas, com $NR \leq 1$, e a identificação e o aumento da redundância das UTRs críticas.

Uma grande vantagem deste método é a sua flexibilidade, pois permite que se lhe incorporem critérios técnicos diversos, tendo em vista a obtenção da melhor solução. Por exemplo:

(i) Tornar mínimo o custo: com base no custo de medidores e UTRs, o método permite adequar-se facilmente, de forma a que se dê prioridade à instalação de medidores e UTRs de menor custo, possibilitando assim, a obtenção de um plano de medição de custo mais baixo;

(ii) Obtenção de um plano de medição formado por medidas com NR mais elevado;

(iii) Aumentar a redundância das medidas de uma determinada subestação ou usina.

O método proposto demonstrou ser eficiente e rápido, tendo em vista os testes realizados ³.

Por tudo isso acredita-se que o método proposto é uma ferramenta muito importante para o projeto e fortalecimento de planos de medição.

³No Capítulo 5 foram apresentados os resultados de diversos testes.

Bibliografia

- Aam, S., Holten, L. & Gjerde, O. (Dezembro de 1983). Design of the measurement system for state estimation in the norwegian high-voltage transmission network, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* Vol. PAS-102(12): 3769–3777.
- Abur, A. & Magnago, H. (Novembro de 1999). Optimal meter placement for maintaining observability during single branch outages, *IEEE Transactions on Power Systems* Vol. 14(4): 1273–1278.
- Aires, M. & Haley, P. H. (Agosto de 1986). Bad data groups in power systems state estimation, *IEEE Transactions on Power Systems* Vol.1(3): 1–9.
- Al-Atwan, A. & Koglin, H. J. (1993). Quantitative local redundance and its improvement, *Proceedings of the 11th Power System Computation Conference* Vol. 145(4): 458–462.
- Al-Atwan, A. & Koglin, H. J. (Julho de 1998). Two aspects of redundancy in state estimation, *IEE Proceedings - Generation Transmission Distribution* Vol. 145(4): 458–462.
- Alsaç, O., Vempati, N., Stott, B. & Monticelli, A. (Agosto de 1998). Generalized state estimation, *IEEE Transactions on Power Systems* Vol. 13(3): 1069–1075.
- Antônio, A. B., Toreão, J. R. A. & Coutto Filho, M. B. D. (2001). Meter placement for systems state estimation using simulted annealing, *Proceedings of 2001 IEEE Port Power Tech Conference* .

- Baran, E. M., Zhu, J., Zhu, H. & Garren, K. E. (Agosto de 1995). A meter placement method for state estimation, *IEEE Transactions on Power Systems* Vol. 10(3): 1704–1710.
- Bretas, N. G. (Janeiro de 1989). An iterative dynamic state estimation and bad data processing, *International Journal of Eletrical Power and Energy System* Vol. 11: 70–74.
- Bretas, N. G. (Janeiro de 1996). Network Observability: Theory and algorithms based on triangular factorization and path graph concepts, *IEE Proceedings, Generation, Transmission and Distribution* Vol. 143(1): 123-128.
- Bretas, N. G. & London Jr., J. B. A. (Agosto de 1998). Network observability: The critical measurement identification using the symbolic jacobian matrix, *International Conference on Power System Technology Proceedings* Vol. 2: 1222–1226.
- Cheniae, M. G., Mili, L. & Rousseeux, P. J. (Agosto de 1993). Identification of multiple interacting bad data via power system decomposition, *IEEE Transactions on Power Systems* Vol. 11(3): 1555–1563.
- Clements, K. A. & Davis, P. W. (Novembro de 1988). Detection and identification of topology errors in eletric power systems, *IEEE Transactions on Power and Systems* Vol. 3(4): 1748–1753.
- Clements, K. A., Krumpholz, G. R. & Davis, P. W. (Abril de 1981). Power system state estimation residual analysis - an algorithm using network topology, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* Vol. 100(4): 1779–1787.
- Clements, K. A., Krumpholz, G. R. & Davis, P. W. (Abril de 1982). State estimation measurement system reliability evaluation - an efficient algorithm based on topology observabililty theory, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* Vol. 101(4): 997–1004.

- Clements, K. A., Krumpholz, G. R. & Davis, P. W. (Julho de 1983). Power system state estimation with measurement deficiency: an observability/measurement placement algorithm, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* Vol. 102(7): 2012–2020.
- Clements, K. A. & Simões Costa, A. (Maio de 1998). Topology error identification using normalized lagrange multipliers, *IEEE Transactions on Power Systems* Vol. 13(2): 347–353.
- Contaxis, G. C. & Korres, G. N. (Novembro de 1988). A reduced model for power system observability analysis and restoration, *IEEE Transactions on Power Systems* Vol. 3(4): 1411–1417.
- Coutto Filho, M. B. D., Duncan Glover, J. & Leite da Silva, A. M. (Agosto de 1993). State estimators with forecasting capability, *XI PSCC proceedings* Vol. II: 689–695.
- Coutto Filho, M. B. D., Leite da Silva, A. M. & Cantera, J. M. C. (Maio de 1989). Information debugging for real-time power systems monitoring, *IEE Proceedings C*. Vol. 136: 145–152.
- Coutto Filho, M. B. D., Leite da Silva, A. M. & Falcão, D. M. (Agosto de 1990). Bibliography on power system state estimation (1968-1989), *IEEE Transactions on Power Systems* Vol. 5(3): 950–961.
- Coutto Filho et al., M. B. D. (Setembro de 2001). Identifying critical measurements and critical sets for power system state estimation, *Proceedings of 2001 IEEE Porto Power Tech Conference*
- Crainic, E. D., Horisberger, H. P., Do, X. D. & Mukhedkar, D. (Novembro de 1990). Power network observability: The assesment of the measurement system strength, *IEEE Transactions Power Systems* Vol. 5(4): 1267–1285.

- Çelik, M. K. & Edwin Liu, W. H. (Agosto de 1995). An incremental measurement placement algorithm for state estimation, *IEEE Transactions on Power Systems* Vol. 10(3): 1698–1703.
- Debs, A. S. & Larson, R. E. (Setembro/Outubro de 1970). A dynamic estimator for tracking the state of a power system, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* Vol. PAS-89(7): 1670–1678.
- Falcão, D. M. & Arias, M. A. (Maio de 1994). State estimation and observability analysis based on echelon forms of the linearized measurement models, *IEEE Transactions on Power Systems* Vol. 9(2): 979–987.
- Falcão, D. M., Cooke, P. A. & Brameller, A. (Fevereiro de 1982). Power system tracking state estimation and bad data processing, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* Vol. PAS-101(2): 325–333.
- Garcia, A. V., Monticelli, A. J. & Abreu, P. (Setembro/Outubro de 1992). Fast decoupled state estimation and bad data processing, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* PAS - 98(5): 1645–1652.
- Gjelsvik, A., Aam, S. & Holten, L. (Novembro de 1985). Hachtel's augmented matrix method - a rapid method improving numerical stability in power system static state estimation, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* Vol. PAS-104(11): 2987–2993.
- Gou, B. & Abur, A. (Maio de 2000). A direct numerical method for observability analysis, *IEEE Transactions on Power Systems* Vol. 15(2): 625–630.
- Gouvêa, J. P. S. & Simões Costa, A. J. A. (Setembro de 1998). Um método ortogonal com restrições de igualdade e desigualdade para a estimação de estados em sistemas de potência, *Proceedings of XII Brazilian Automatic Control Conference* Vol. 6: 2137–2142.

- Gu, J. W., Clements, K. A., Krumpholz, G. R. & Davis, P. W. (Fevereiro de 1983). Topology-partitioned power system state estimation, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* Vol. PAS-102(2): 483–491.
- Handschin, E. & Bongers, C. (1972). Theoretical and practical considerations in the design of state estimators for electric power systems. in computerized operation of power systems, *S. C. Savulesco* pp. 104–136.
- Handschin, E., Schweppe, F. C., Kohlas, J. & Fiechter, A. (Março/Abril de 1975). Bad data analysis for power systems state estimation, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* Vol. PAS-94(2): 329–337.
- Horisberger, H. P., Richard, J. C. & Rossier, C. (Janeiro/Fevereiro de 1976). A fast decoupled static state estimator for electric power systems, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* Vol. PAS-95(1): 208–215.
- Jaén, A. V. & Expósito, A. G. (Setembro de 2001). Modeling unknown circuit breakers in generalized state estimator, *Proceedings of 2001 IEEE Porto Power Tech Conference*.
- Korres, G. N. & Contaxis, G. C. (Agosto de 1991a). Identification and updating of minimally dependent sets of measurement in state estimation, *IEEE Transactions on Power Systems* Vol. 6(3): 999–1005.
- Korres, G. N. & Contaxis, G. C. (Maio de 1991b). A reduced model for bad data processing in state estimation, *IEEE Transactions on Power Systems* Vol. 6(2): 550–557.
- Korres, G. N. & Contaxis, G. C. (Maio de 1992). A tool for the evaluation and selection of state estimator measurement, *IEEE Transactions on Power Systems* Vol. 9(2): 1110–1116.
- Krumpholz, G. R., Clements, K. A. & Davis, P. W. (Julho/Agosto de 1980). Power system observability: a practical algorithm using network topology, *IEEE Transactions on Power Systems* Vol. PAS 99(4): 1534–1542.

- Leite da Silva, A. M., Coutto Filho, M. B. D. & Cantera, J. M. C. (Novembro de 1987). An efficient dynamic state estimation algorithm including bad data processing, *IEEE Transaction on Power Systems* Vol. 2(4): 1050–1058.
- Leite da Silva, A. M., Coutto Filho, M. B. D. & Queiroz, J. F. (Setembro de 1983). State forecasting in electric power systems, *IEE Proceedings C*. Vol. 130: 237–244.
- Lo et al. (Setembro de 1982). Power system state estimation: a method for metering reinforcement, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* Vol. PAS-101(9): 3493–3501.
- London Jr., J. B. A. (Março de 1997). *Observabilidade de redes de energia: Métodos de identificação de medidas críticas*, Tese de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos - USP.
- London Jr., J. B. A. & Bretas, N. G. (1998). Identificação de medidas críticas através da estrutura da matriz jacobiana, *Proceedings of XII Brazilian Automatic Control Conference* Vol. 6: 2149–2154.
- London Jr., J. B. A., Alberto, L. F. C. & Bretas, N. G. (Junho de 2000b). Identification of the redundancy level of measurement associated to observable power systems, *Revista EletroEvolução - Sistemas de Potência* pp. 44–49.
- London Jr., J. B. A., Alberto, L. F. C. & Bretas, N. G. (Setembro de 2000a). Identificação do nível de redundância das medidas associadas a um sistema de potência, *Anais do XIII congresso Brasileiro de Automática*.
- London Jr., J. B. A. (Outubro de 2000). *Identificação do nível de redundância das medidas de um sistema de potência, para efeito da estimação de seus estados*, Tese de Doutorado, Escola Politécnica - USP.
- London Jr., J. B. A., Alberto, L. F. C. & Bretas, N. G. (Dezembro de 2000c). Network observability: Identification of the measurement redundancy level,

Anais do POWERCON' 2000 - International Conference on Power System Technology .

London Jr., J. B. A., Alberto, L. F. C. & Bretas, N. G. (Junho/Julho/Agosto de 2001a). Identificação do nível de redundância das medidas para efeito de estimação de estado em sistemas de potência, *Revista Controle e Automação* Vol. 12(2): 141–147.

London Jr., J. B. A., & Bretas, N. G. (Setembro de 2001b). Measurements placement design and reinforcement for state estimation purposes, *Proceedings of 2001 IEEE Porto Power Tech Conference .*

London Jr., J. B. A., & Bretas, N. G. (Outubro de 2001c). Método para o tratamento de questões qualitativas referentes ao processo de estimação de estado, *Anais do XVI-SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica .*

London Jr., J. B. A., Brito, G. L. R. & Bretas, N. G. (Setembro de 2002). Método para locação de medidores e UTRs para efeito de estimação de estado, *Anais do XIV-CBA - Congresso Brasileiro de Automática .*

London Jr., J. B. A., Brito, G. L. R. & Bretas, N. G. (Junho de 2003). Method for meter and RTU placement for state estimation purposes, *Proceedings of 2003 IEEE Bologna Power Tech - Session State Estimation .*

Lugtu et al., R. L. (Novembro/Dezembro de 1980). Power system state estimation: detection of topological errors, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* Vol. PAS-99(6): 2406–2412.

Magnago, F. H. & Abur, A. (Agosto de 2000). A unified approach to robust meter placement against loss of measurements and branch outages, *IEEE Transactions on Power Systems* Vol. 15(3): 945–949.

Masiello, R. D. & Schweppe, F. C. (Maio/Junho de 1971). A tracking static state estimator, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* Vol. PAS-90(3): 1025–1033.

- Mili, L., Cheniae, M., Vichare, N. & Rousseeuw, P. (1996). Robust state estimation based on projection statistics, *IEEE Transactions on Power Systems* Vol. 11(2): 1118–1123.
- Mili, L., Cutsem, T. & Ribbens-Pavella, M. (Novembro de 1985). Bad data identification methods in power system state estimation - a comparative study, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* Vol. PAS-104(11): 3037–3049.
- Mili, L., Cutsem, T. V. & Ribbens-Pavella, M. (Novembro de 1984). Hypothesis testing identification: A new method for bad data analysis in power system state estimation, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* Vol. PAS-103(11): 3239–3252.
- Mili, L., Steeno, G., Dobraca, F. & French, D. (Novembro de 1999). A robust estimation method for topology error identification, *IEEE Transactions on Power Apparatus Systems* Vol. PAS-103(11): 3239–3252.
- Monticelli, A. J. (1999). *State estimation in electric power systems*, Kluwer Academic Publisher, Boston/Dordrecht/London.
- Monticelli, A. J. (Agosto de 1993). Modeling circuit breakers in weighted least squares state estimation, *IEEE Transactions on Power Systems* Vol. 8(3): 1–9.
- Monticelli, A. J. & Garcia, A. V. (Maio de 1983). Reliable bad data processing for real-time state estimation, *IEEE Transactions on Power Apparatus Systems* Vol. PAS-102(5): 1126–1139.
- Monticelli, A. J. & Garcia, A. V. (Maio de 1990). Fast decoupled state estimators, *IEEE Transactions on Power Systems* Vol. 5(2): 556–564.
- Monticelli, A. J. & Garcia, A. V. (Novembro de 1991). Modeling zero impedance branches in power system state estimation, *IEEE Transactions on Power Systems* Vol. 6(4): 1561–1570.

- Monticelli, A. J., Garcia, A. V. & Slutsker, I. W. (Agosto de 1992). Handling discardable measurements in power system state estimation, *IEEE Transactions on Power Systems* Vol. 7(3): 1333–1340.
- Monticelli, A. J., Murari, C. A. F. & Wu, F. F. (Dezembro de 1985). A hybrid state estimator: solving normal equations by orthogonal transformations, *IEEE Transactions on Power Systems* Vol. 104(12): 3460–3468.
- Monticelli, A. J. & Wu, F. F. (Fevereiro de 1986). Observability analysis for orthogonal transformation based state estimation, *IEEE Transactions on Power Systems* Vol. 1(1): 201–208.
- Monticelli, A. J. & Wu, F. F. (Maio de 1985a). Network observability: Identification of observability islands and measurement placement, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* Vol. 104(5): 1035–1041.
- Monticelli, A. J. & Wu, F. F. (Maio de 1985b). Network observability: Theory, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* Vol. 104(5): 1042–1048.
- Mori, H. & Tsuzuki, S. (Maio de 1991). A fast method for topological observability analysis using a minimum spanning tree technique, *IEEE Transactions on Power Systems* Vol. 6(2): 491–500.
- Mounir, Y., Obrahim, E. B. & Richard, W. (Maio de 2001). A pc based state estimator interface with a remote terminal unit placement algorithm, *IEEE Transactions on Power Systems* Vol. 16(2): 210–215.
- Nucera, R. R. & Gilles, M. L. (Maio de 1991). Observability analysis: A new topological algorithm, *IEEE Transactions on Power Systems* Vol. 6(2): 466–475.
- Park, Y. M., Moon, Y. H., Choo, J. B. & Kwon, T. W. (Agosto de 1988). Design a reliable measurement system for state estimation, *IEEE Transactions on Power Systems* Vol. 3(3): 830–836.

- Quintana, V. H., Simões Costa, A. & Mandel, A. (Março de 1982). Power system topological observability using a direct graph-theoretic approach, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* Vol. PAS 101(3): 617–626.
- Rousseaux, P., Cutsem, T. V. & Liacco, T. E. D. (Abril de 1990). Whither dynamic state estimation, *Electrical Power and Energy Systems* Vol. 12: 237–244.
- Roy, L. & Mohamed, T. A. (Novembro de 1997). Fast super decoupled state estimation for power systems, *IEEE Transactions on Power and Systems* Vol. 12(4): 1597–1603.
- Schweppe, F. C. (janeiro de 1970). Power system static-state estimation, part iii: Implementatio, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* Vol. PAS 89(1): 130–135.
- Schweppe, F. C. & Douglas, B. R. (Maio de 1970). Power system static-state estimation, part ii: Approximate model, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* Vol. PAS 89(1): 125–130.
- Schweppe, F. C. & Wildes, J. (Maio de 1970). Power system static-state estimation, part i: Exact model, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* Vol. PAS 89(1): 120–125.
- Simões Costa, A., Piazza, T. S. & Mandel, A. (Agosto de 1990). Quantitative methods to solve qualitative problems in power system state estimation, *IEEE Transactions on Power Systems* Vol. 5(3): 941–949.
- Simões Costa, A. & Quintana, V. H. (Fevereiro de 1981). A robust numerical technique for power system state estimation, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* Vol. PAS-100(2): 691–698.
- Simões Costa, A. & Tardio Arze, M. (1996). Critical pseudo-measurement selection for unreduced external system modeling, *Electrical Power and Energy Systems* Vol.18(2): 73–80.

- Slutsker, I. W. (Fevereiro de 1989). Bad data identification in power system state estimation based on measurement compensation and residual calculation, *IEEE Transactions on Power and Systems* Vol. 4(1): 53–60.
- Souza, J. C. S., Leite da Silva, A. M. & Alves da Silva, A. P. (Agosto de 1996). Data debugging for real-time power system monitoring based on pattern analysis, *IEEE Transaction on Power Systems* Vol. 11(3): 1592–1599.
- Zarco, P. & Expósito, A. G. (Fevereiro de 2000). Power system parameter estimation: a survey, *IEEE Transactions on Power Systems* Vol. 15(1): 216–222.
- Zollenkopf, K. (1971). *Bi-factorization-basic computation algorithm and programming techniques*. In: *Large sparse sets of linear equations*, J. K. Reid, Academic Press, N. York.