

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

ESTIMADORES DE ESTADO HIERÁRQUICOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS INTERLIGADOS:
UMA ANÁLISE COMPARATIVA

TESE SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA

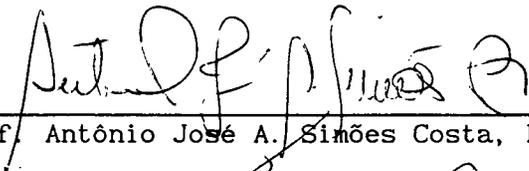
JOSÉ PAULO DA SILVA GOUVÊA

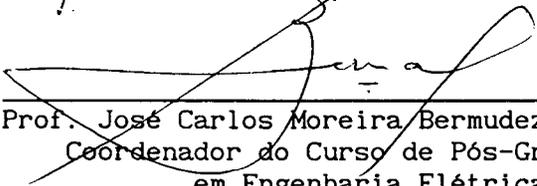
FLORIANÓPOLIS, AGOSTO DE 1990

ESTIMADORES DE ESTADO HIERÁRQUICOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS INTERLIGADOS
 UMA ANÁLISE COMPARATIVA

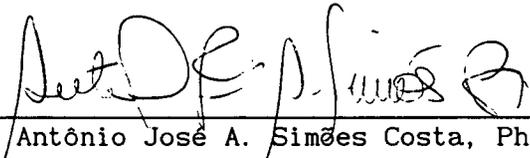
José Paulo da Silva Gouvêa

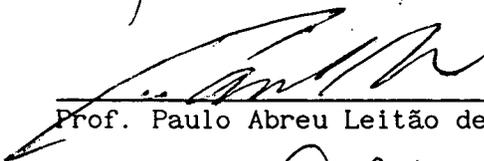
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA
 - ESPECIALIDADE ELÉTRICA E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE
 PÓS-GRADUAÇÃO.

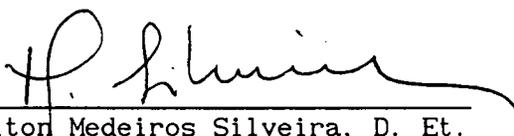

 Prof. Antônio José A. Simões Costa, Ph. D.

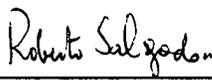

 Prof. José Carlos Moreira Bermudez, Ph.D.
 Coordenador do Curso de Pós-Graduação
 em Engenharia Elétrica

APROVADA PERANTE A BANCA EXAMINADORA COMPOSTA DOS PROFESSORES


 Prof. Antônio José A. Simões Costa, Ph.D.


 Prof. Paulo Abreu Leitão de Almeida, M.Sc.


 Prof. Hamilton Medeiros Silveira, D. Et.


 Prof. Roberto de Souza Salgado, Ph. D.

À Lúcia, minha esposa

Aos meus pais, Henny Mary e Evaristo

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Antônio José Alves Simões Costa pela amizade e inestimável apoio na elaboração deste trabalho.

À todos os professores e colegas da Pós-Graduação que, de uma forma ou de outra, contribuíram para a elaboração deste trabalho.

À Universidade Federal do Espírito Santo e à CAPES pelo apoio financeiro.

Aos meus colegas do Departamento de Engenharia Elétrica da UFES pelo apoio e incentivo à realização deste trabalho, em especial ao Paulo Fernando Monteiro Palmeira.

À Universidade Federal de Santa Catarina, pelo apoio técnico.

Aos meus pais, pelo inestimável apoio e incentivo.

À minha esposa Lúcia, pela compreensão e incentivo.

RESUMO

Este trabalho é um estudo comparativo entre três estimadores de estado hierárquicos em sistemas elétricos interligados. Os algoritmos correspondentes foram anteriormente propostos na literatura e consideram o sistema elétrico formado por diversos sub-sistemas, coordenados por um Centro de Operações. Os três algoritmos prevêem a existência de dois níveis hierárquicos. O primeiro é o nível local e corresponde à estimação de estado nos sub-sistemas. O segundo, é o nível central e corresponde a estimação dos ângulos de defasamento entre os sub-sistemas.

O objetivo deste trabalho é determinar as características de cada algoritmo, verificando sua aplicabilidade à estimação de estado em sistemas interligados. Aspectos como o intercâmbio de informações entre os sub-sistemas e o nível central e vice-versa, memória requerida por cada algoritmo, tempo de execução, precisão, confiabilidade dos resultados e capacidade de detectar, identificar e recuperar telemidas portadoras de erros grosseiros são analisados. São feitas ainda, comparações entre os resultados obtidos pelos estimadores hierárquicos entre si, assim como com os resultados obtidos por um Estimador Integrado.

O desempenho de cada um dos algoritmos implementados é testado usando-se dois sistemas de potência, sendo o primeiro o Sistema IEEE-30 barras. O segundo é um sistema realístico, obtido a partir da rede de 230kV/500kV do sistema interligado sul-sudeste brasileiro.

ABSTRACT

This work is a comparative study of three hierarchical state estimation algorithms for interconnected electric power systems. The algorithms related were proposed in the literature and consider the electric system made up of various subsystems coordinated by an Energy Control Center. All three algorithms work with two hierarchical levels. The first is the local level and is related to the state estimation of the individual subsystems. The second is the coordination level, and is related to the estimation of the phase angles among the slack busses of the individual subsystems.

The objective of this work is to determine the characteristics of each algorithm, assessing its applicability to the state estimation of interconnected power systems. Aspects such as information interchanges among the subsystems and the coordination level and vice-versa, storage requirements, execution time, accuracy, reliability and bad data processing are also analyzed. Comparisons are made between the results obtained by hierarchical estimators against the results obtained by a classical integrated estimator.

The performance of each algorithm is tested using two electric power systems. The first test system is the IEEE-30 bus network. The second one is a realistic system derived from the 230kV/500kV interconnected network of the south-southeast region of Brazil.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 - Introdução	1
1.2 - Revisão Bibliográfica	2
1.3 - Descrição do Trabalho	4

CAPÍTULO 2 - A ESTIMAÇÃO DE ESTADO EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

2.1 - Introdução: Definição e Objetivos	7
2.2 - Formulação Matemática	8
2.3 - Solução	9
2.4 - A Abordagem Hierárquica	13

CAPÍTULO 3 - ESTIMADORES DE ESTADO HIERÁRQUICOS

3.1 - Introdução	16
3.2 - O Esquema Geral de Organização	17
3.3 - O Nível Local dos Estimadores Hierárquicos	19
3.4 - O Algoritmo de Van Cutsem, Howard e Ribbens-Pavella	23
3.5 - O Algoritmo de Lo, Salem, Moffatt e McColl	30
3.6 - O Algoritmo de Kurzyn	32
3.7 - Comentários Adicionais	36

3.8 - Considerações Finais	38
----------------------------------	----

CAPÍTULO 4 - PROCESSAMENTO DE ERROS GROSSEIROS

4.1 - Introdução	40
4.2 - A Detecção de Erros Grosseiros em Estimadores de Estado Integrados .	41
4.3 - A Identificação e a Eliminação de Erros Grosseiros em Estimadores de Estado Integrados	43
4.3.1 - Métodos de Identificação de Erros Grosseiros	43
4.3.2 - Técnica da Matriz Esparsa Inversa para o Cálculo dos Elementos Diagonais de $\underline{\Sigma}_x$	45
4.3.3 - Recuperação de Medidas Portadoras de Erros Grosseiros	47
4.4 - O Processamento de Erros Grosseiros em Estimadores Hierárquicos	47
4.4.1 - O Processamento de Erros Grosseiros nos Algoritmos de Van Cutsem e Lo	47
4.4.2 - O Processamento de Erros Grosseiros no Algoritmo de Kurzyn .	48
4.5 - Considerações Finais	50

CAPÍTULO 5 - A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

5.1 - Introdução	51
5.2 - Os Sistemas Simulados	52
5.3 - Os Algoritmos	53
5.3.1 - Considerações Sobre os Níveis Locais	53
5.3.2 - Considerações Sobre o Algoritmo de Van Cutsem	59
5.3.3 - Considerações Sobre o Algoritmo de Lo	65
5.3.4 - Considerações Sobre o Algoritmo de Kurzyn	67
5.3.5 - Considerações Sobre o Processamento de Erros Grosseiros	69

CAPÍTULO 6 - RESULTADOS: ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS ALGORITMOS

6.1 - Introdução	70
6.2 - Intercâmbio de informações	72
6.3 - Memória Utilizada	72
6.4 - Tempo de Execução e Convergência	75
6.5 - Precisão e Confiabilidade dos Resultados	80
6.6 - Processamento de Erros Grosseiros	84
6.6.1 - Introdução	84
6.6.2 - Considerações Sobre o Processamento de Erros Grosseiros nos Algoritmos de Van Cutsem e Lo	84
6.6.3 - O Processamento de Erros Grosseiros no Algoritmo de Kurzyn .	88
6.6.4 - Resultados	89
6.7 - Considerações Finais	95

CAPÍTULO 7 - CONCLUSÃO

7.1 - Conclusões	98
7.2 - Sugestões para Futuros Trabalhos	102

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
----------------------------------	-----

APÊNDICE A - DADOS E CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DOS SISTEMAS TESTES

A.1 - Dados do Sistema IEEE-30 barras: Sistema I	110
A.2 - Diagrama Unifilar e Planos de Medição para o Sistema IEEE-30 barras.	112
A.3 - Dados do Sistema Sul-sudeste Brasileiro-91 barras	113

A.4 - Diagrama Unifilar e Planos de Medição para o Sistema Sul-sudeste Brasileiro-91 barras 118

A.5 - Condições de Operação dos Sistemas Testes Utilizados 119

APÊNDICE B - RESULTADOS: COMPARAÇÕES ENTRE OS ALGORITMOS HIERÁRQUICOS E O ESTIMADOR INTEGRADO

B.1 - Tensões nas Barras de Fronteira: Sistema I 129

B.2 - Tensões nas Barras de Fronteira: Sistema II 130

B.3 - Ângulos nas Barras de Fronteira: Sistema I 131

B.4 - Ângulos nas Barras de Fronteira: Sistema II 132

B.5 - Fluxos nas Linhas de Intercâmbio: Sistema I 133

B.6 - Fluxos nas Linhas de Intercâmbio: Sistema II 134

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Introdução:

Devido às grandes dimensões dos modernos Sistemas Elétricos de Potência e ao fato das empresas que os administram operarem de maneira interligada com as empresas vizinhas, surgiu a necessidade do desenvolvimento de novos métodos de Estimação de Estado capazes de reduzirem a ordem do sistema e devolver os resultados desejados em um tempo tal que viabilize a operação em tempo real do sistema interligado. Esses novos métodos devem ainda levar em conta o fato de que cada empresa que constitui o sistema interligado necessita manter sua independência, operando seu próprio Centro de Operações do Sistema (COS). Os algoritmos clássicos de estimação de estado em sistemas de potência ignoravam a existência desse tipo de organização de um grande sistema elétrico. Estes aspectos, mais o desenvolvimento natural em direção a estratégias de controle hierárquico em sistemas elétricos, tem levado ao desenvolvimento de abordagens multi-nível para a estimação de estado. A idéia básica é reduzir a complexidade associada a ordem elevada do "problema integrado", decompondo-o em vários sub-problemas de menor ordem, viabilizando, inclusive, a estimação de estado em sistemas interligados.

Dentro da estrutura básica de um estimador de estado convencional, o objetivo principal de um algoritmo multi-nível é simplesmente minimizar uma função custo global com o auxílio de computadores descentralizados. É o caso,

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Introdução:

Devido às grandes dimensões dos modernos Sistemas Elétricos de Potência e ao fato das empresas que os administram operarem de maneira interligada com as empresas vizinhas, surgiu a necessidade do desenvolvimento de novos métodos de Estimação de Estado capazes de reduzirem a ordem do sistema e devolver os resultados desejados em um tempo tal que viabilize a operação em tempo real do sistema interligado. Esses novos métodos devem ainda levar em conta o fato de que cada empresa que constitui o sistema interligado necessita manter sua independência, operando seu próprio Centro de Operações do Sistema (COS). Os algoritmos clássicos de estimação de estado em sistemas de potência ignoravam a existência desse tipo de organização de um grande sistema elétrico. Estes aspectos, mais o desenvolvimento natural em direção a estratégias de controle hierárquico em sistemas elétricos, tem levado ao desenvolvimento de abordagens multi-nível para a estimação de estado. A idéia básica é reduzir a complexidade associada a ordem elevada do "problema integrado", decompondo-o em vários sub-problemas de menor ordem, viabilizando, inclusive, a estimação de estado em sistemas interligados.

Dentro da estrutura básica de um estimador de estado convencional, o objetivo principal de um algoritmo multi-nível é simplesmente minimizar uma função custo global com o auxílio de computadores descentralizados. É o caso,

por exemplo, de se estimar o estado de um sistema interligado. Cada empresa que o constitui possui seu próprio COS e nele, seu próprio estimador de estado. Os dados relacionados com as interligações devem ser enviados a um Centro de Operações centralizado, juntamente com o estado estimado de cada sub-sistema. De posse dessas informações, o COS Central realiza o seu processamento, estimando os ângulos de defasamento entre cada sub-sistema e calcula os fluxos de potência em cada linha de interligação, devolvendo a cada sub-sistema essas informações.

O Brasil, preocupado com as dimensões de seu sistema elétrico, montou em Brasília um centro nacional de controle do sistema, o SINSC, cujo objetivo é coordenar a operação em tempo real do sistema elétrico brasileiro. Esse COS a nível nacional, receberá informações dos COS's regionais (ELETROSUL, FURNAS, ITAIPU, CESP, etc.) e deverá fornecer a cada empresa, os fluxos de potência ativa e reativa nas linhas de intercâmbio e a defasagem angular entre ela e uma determinada empresa tomada como referência. Portanto, torna-se indispensável o desenvolvimento e/ou o estudo de algoritmos para a Estimação de Estado em dois níveis hierárquicos (Estimadores de Estado Hierárquicos - EESPH).

1.2 Revisão Bibliográfica:

As primeiras tentativas de aplicação de técnicas hierárquicas à estimação de estado em sistemas de potência apareceram na literatura quase que juntamente com os primeiros estudos sobre o caso "integrado". A primeira menção a este problema pode ser encontrada em um artigo de Schweppe [1] de 1970, onde são descritos sucintamente duas técnicas para a solução de problemas associados com matrizes-ganho de grandes dimensões. Em ambas as técnicas, a rede é considerada composta por sub-sistemas conectados por linhas

de intercâmbio.

Um dos primeiros algoritmos de EESPH foi desenvolvido por Clements et alii [2]. Este algoritmo adapta-se melhor ao princípio da decomposição, em que um grande sistema de potência é sub-dividido em sistemas menores por critérios específicos. Este algoritmo exige a existência de barras comuns a dois sub-sistemas vizinhos.

Kobayashi e seus colaboradores [3] desenvolveram um algoritmo aplicável, também, ao princípio da decomposição. Contudo, este algoritmo exige um alto nível de troca de informações entre o nível central e os níveis locais (sub-sistemas).

Um grande avanço foi obtido por Van Cutsem et alii [4]. O algoritmo proposto por esses autores, foi desenvolvido de acordo com o princípio da agregação, onde vários sub-sistemas operam interligadamente mantendo, contudo, sua independência individual. Este algoritmo adapta-se muito bem ao caso brasileiro. A troca de informações entre o nível central e os níveis locais é restringida ao mínimo indispensável.

Em 1981, Walach e Handschin [5] propuseram um algoritmo semelhante ao de Clements et alii. A maior diferença está na definição dos sub-sistemas. A rede é sub-dividida em sub-sistemas conectados por linhas de intercâmbio. Cada linha de intercâmbio pertence a ambos os sub-sistemas ao qual ela está conectada. O algoritmo possui apenas um nível hierárquico, exigindo técnicas de processamento paralelo. Adapta-se tanto a agregação quanto a decomposição.

Em 1983 Van Cutsem et alii [6] publicaram um interessante artigo, analisando todos os algoritmos de estimadores de estado hierárquicos desenvolvidos até então.

No mesmo ano, Kurzyn [7] apresentou um algoritmo baseado no princípio da agregação, em dois níveis hierárquicos, cuja organização dos sub-sistemas é a mesma de Van Cutsem. Contudo, Kurzyn calcula os ângulos de

defasamento entre os sub-sistemas (ângulos de coordenação) indiretamente, estimando as aberturas angulares das linhas de intercâmbio.

Existem na literatura diversas abordagens para o problema da estimação hierárquica. Propostas visando o uso de processamento paralelo são bastante frequentes [8,9]. No entanto, o uso de processamento paralelo torna-se muito mais eficiente quando aplicado ao princípio da decomposição e normalmente, destina-se a um arranjo computacional específico.

Lo e Salem [10] desenvolveram um algoritmo baseado no de Van Cutsem [4] mas que utiliza técnicas de programação linear em ambos os níveis.

Um outro algoritmo baseado no de Van Cutsem mas que usa um esquema do tipo desacoplado rápido, dispensando as medidas de fluxo reativo no segundo nível, foi proposto por Lo, Salem, McColl e Moffatt [11]. Este é um algoritmo bastante eficiente, rápido e reduz sobremaneira o intercâmbio de informações entre os sub-sistemas.

Uma das mais recentes publicações sobre estimadores hierárquicos foi feita por Iwamoto et alii [12]. O algoritmo possui dois níveis hierárquicos: no nível superior, calculam-se as tensões nas barras de fronteira; no nível inferior, os estados de cada sub-sistema são calculados, minimizando-se uma função custo que envolve o sistema completo. Para o nível inferior, são utilizadas técnicas do fluxo de potência rápido de segunda ordem, o que permite manter o Jacobiano constante durante todo o processo. Este algoritmo destina-se ao esquema da decomposição.

1.3 - Descrição do Trabalho:

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo comparativo entre os principais algoritmos de estimadores de estado hierárquicos existentes na literatura. Nesta análise é dado particular importância a aspectos tais como

velocidade de convergência, tempo de estimação, memória computacional requerida, intercâmbio de informações, qualidade dos resultados, capacidade de detectar e identificar erros grosseiros e, principalmente, sua aplicabilidade ao caso brasileiro. Para tanto, um sistema realístico, baseado no sistema sul brasileiro, foi montado. Portanto, os algoritmos escolhidos foram selecionados de acordo com sua aplicabilidade ao esquema da agregação, ao invés da estratégia da decomposição. Cada sub-sistema constitui-se num nível local, coordenado por um nível central. Um sub-sistema adicional é formado pelas interligações entre os sub-sistemas. Tendo em vista o exposto acima, foram selecionados três algoritmos para implementação. São eles: o Algoritmo de Van Cutsem e outros [4], o Algoritmo de Kurzyn [7] e o Algoritmo de Lo, Salem, McColl e Moffatt [11].

Objetivando uma melhor apresentação do assunto, este trabalho é dividido em sete capítulos. O primeiro capítulo é uma breve introdução, contendo os objetivos desta dissertação e apresentando uma exaustiva revisão bibliográfica sobre estimadores hierárquicos. Consta ainda desse capítulo uma descrição completa e concisa dessa dissertação.

No segundo capítulo, apresentamos o algoritmo clássico para a estimação de estado, conhecido na literatura como WLS ("weighted least square") utilizado tanto no caso "integrado" como no nível local de vários algoritmos de estimadores hierárquicos. No final do capítulo, é descrito em detalhes a filosofia e as características gerais dos estimadores hierárquicos.

O terceiro capítulo trata justamente dos estimadores hierárquicos. Nesse capítulo, os três algoritmos escolhidos são apresentados tal como seus autores os propuseram. Algumas críticas que aparecem na literatura sobre os três algoritmos são reproduzidas.

O quarto capítulo aborda o processamento de erros grosseiros, parte indispensável a qualquer estimador de estado, seja ele hierárquico ou não.

Inicialmente é descrito o método clássico para detecção e identificação de erros grosseiros em estimadores de estado convencionais. Em seguida, o método é adaptado aos estimadores hierárquicos. O método desenvolvido por Kurzyn [7] para esse fim é apresentado no final do capítulo.

O quinto capítulo diz respeito a simulação computacional propriamente dita. Apresenta os sistemas testes utilizados e mostra como os algoritmos selecionados foram implementados. São apresentados ainda os fluxogramas de todos os programas desenvolvidos.

O sexto capítulo apresenta os resultados obtidos neste trabalho. Os algoritmos são testados e comparados entre si, procurando-se determinar as vantagens e desvantagens de cada um em relação ao caso brasileiro. Aspectos como tempo de execução, velocidade de convergência, memória requerida, precisão, capacidade de processar erros grosseiros e intercâmbio de informações entre os sub-sistemas e o nível central e vice-versa são analisados.

No sétimo e último capítulo expomos nossas conclusões sobre os algoritmos e os resultados por nós obtidos. As deficiências, limitações e qualidades de cada algoritmo são discutidas. Por fim, sugestões visando trabalhos posteriores são apresentadas.

CAPITULO 2

A Estimação de Estado em Sistemas Elétricos de Potência

2.1 - Introdução: Definição e Objetivos

Atualmente, o Estimador de Estado é o coração de um moderno Centro de Controle de um sistema elétrico. Sua função básica é gerar um banco de dados coerente e confiável, sobre o estado do sistema em tempo real, a partir de informações originárias de medições e sinais obtidos em locais remotos ao Centro de Controle. Estas informações chegam ao Centro de Controle do Sistema via linhas de transmissão de dados, sejam elas físicas ou canais de micro-ondas. As telemidas são de dois tipos: telemidas digitais, relacionadas com informações sobre a topologia da rede, e telemidas analógicas, relacionadas com medidas de fluxos ativos e reativos nas linhas de transmissão e medidas de injeção de potência e tensão nas barras do sistema.

Contudo, a transmissão de dados analógicos introduz ruídos, isto é, erros de transmissão causados por interferências do meio externo, perdas nas linhas, ou ainda, mal funcionamento dos dispositivos envolvidos na transmissão e recepção das informações. Estes erros não são identificados com facilidade pelos operadores do sistema. Existem ainda erros relacionados com os próprios instrumentos de medição, sejam eles devidos ao mal funcionamento ou conexão incorreta do aparelho, sejam eles relacionados com sua natureza, qualidade e precisão.

Portanto, compete ao Estimador de Estado obter as melhores estimativas possíveis para as componentes do vetor de estado da rede elétrica a partir de um conjunto de medidas contendo erros (ruídos), introduzidos pelas telemedições. Compete ainda ao Estimador de Estado, tornar o conjunto de medidas coerente entre si, detectar, identificar e eliminar erros grosseiros que porventura estejam presentes no conjunto de telemedidas, podendo completá-lo se necessário.

Um Estimador de Estado deve satisfazer a alguns requisitos, tais como velocidade, precisão, confiabilidade e relativamente baixa exigência de armazenamento de dados.

2.2 - Formulação Matemática

O problema da Estimação de Estado [1] é calcular o vetor de estado x que melhor se adapte ao conjunto de telemedidas z , descrita pelo modelo

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

onde v é o vetor dos erros de medição e h é uma função vetorial não-linear que relaciona o vetor de estado x às telemedidas z .

Naturalmente, v é uma variável aleatória que por hipótese, possui distribuição normal, com média zero e covariância R :

$$E\{v\} = 0 \quad (2.2)$$

$$E\{v \cdot v^T\} = R \quad (2.3)$$

R é, por hipótese, uma matriz diagonal, o que equivale à suposição de que o

erro apresentado por uma determinada medida, não afetará às demais.

O vetor x representa as variáveis de estado de um sistema de potência: o módulo e o ângulo das tensões nas barras do sistema. Sua dimensão é $(2n-1)$ onde n é o número de barras do sistema.

A dimensão de h e z é m , onde m é o número total de telemidas.

Para podermos realizar a Estimação de Estado, uma condição necessária é que m deve ser maior ou igual a $(2n-1)$, isto é, o estimador deverá processar um número de medidas pelo menos igual ao número de variáveis de estado.

Define-se redundância das medidas como sendo a relação entre o número de telemidas e o número de variáveis de estado do sistema:

$$\eta = \frac{m}{(2n-1)}, \quad (2.5)$$

donde se conclui que, para haver estimação,

$$\eta \geq 1.$$

2.3 - Solução

A seguir, vamos apresentar o algoritmo clássico da Estimação de Estado em Sistemas de Potência (EESP). Entretanto, chamamos a atenção para o fato de que existem outros procedimentos baseados em transformações matemáticas apropriadas que procuram uma maior confiabilidade dos resultados e maior estabilidade numérica, visando também, assegurar a detecção, identificação e eliminação de erros grosseiros [14].

O algoritmo clássico da EESP baseia-se na técnica dos mínimos

quadrados.[1] Esta técnica consiste na determinação de estimativas que forneçam o mínimo erro quadrático entre os valores observados e calculados para as quantidades medidas, e se aplica tanto ao alisamento estatístico de dados, quanto à recuperação de informações contaminadas por ruídos, na qual consiste de fato, a EESP. Como as medidas são provenientes de instrumentos com características diferentes, os resíduos são multiplicados por um fator de ponderação, função da qualidade do instrumento, do valor da grandeza medida e também, do valor de plena escala do instrumento de medição.

Seja $\hat{\mathbf{x}}$ o valor de \mathbf{x} que minimize a seguinte função:

$$J(\mathbf{x}) \triangleq \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{R_{i1}} \right) \cdot [z_i - h_i(\mathbf{x})]^2 \quad (2.6)$$

Reescrevendo (6) na forma matricial, obtemos

$$J(\mathbf{x}) \triangleq [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})]^T \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})] \quad (2.7)$$

Para determinar $\hat{\mathbf{x}}$, o valor de \mathbf{x} que minimiza $J(\mathbf{x})$, parte-se da condição necessária para que $\hat{\mathbf{x}}$ seja uma solução ótima de $J(\mathbf{x})$:

$$\left. \frac{\partial J(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right]_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}} = 0 \quad (2.8)$$

Definindo $\mathbf{H}(\mathbf{x})$ como sendo a matriz Jacobiana

$$\mathbf{H}(\mathbf{x}) = \frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{x})}{\partial (\mathbf{x})} \quad (2.9)$$

obtemos de (2.7) e (2.8) que

$$-2.H^T(\mathbf{x}).R^{-1}.[z-h(\mathbf{x})] = 0$$

Desenvolvendo, obtemos

$$H^T(\mathbf{x}).R^{-1}.z = H^T.R^{-1}h(\mathbf{x}) \quad (2.10)$$

que é um sistema de equações não lineares em \mathbf{x} .

Este problema é normalmente resolvido pelo método de Gauss-Newton que pressupõe a linearização de (2.10), implicando na solução iterativa de vários sistemas lineares até a convergência ser obtida.

Desenvolvendo-se $h(\mathbf{x})$ em série de Taylor em torno do ponto \mathbf{x}^k , tem-se:

$$h(\mathbf{x}^{k+1}) = h(\mathbf{x}^k) + H(\mathbf{x}^k).(\mathbf{x}^{k+1} - \mathbf{x}^k) \quad (2.11)$$

que, substituindo em (10), fornece

$$H^T(\mathbf{x}^k).R^{-1}.z = H^T(\mathbf{x}^k).R^{-1}.(h(\mathbf{x}^k) + H(\mathbf{x}^k).(\mathbf{x}^{k+1} - \mathbf{x}^k)),$$

ou ainda, simplificando a notação:

$$H^T.R^{-1}.H.(\mathbf{x}^{k+1} - \mathbf{x}^k) = H^T.R^{-1}.[z-h(\mathbf{x}^k)] \quad (2.12)$$

Fazendo

$$G \triangleq H^T.R^{-1}.H \quad (2.13)$$

e

$$g \stackrel{\Delta}{=} H^T \cdot R^{-1} \cdot [z - h(x^k)] \quad (2.14)$$

obtemos um sistema de equações lineares

$$G \cdot (x^{k+1} - x^k) = g \quad (2.15)$$

que deve ser resolvido em cada iteração até que $(x^{k+1} - x^k)$ convirja para um dado valor de módulo menor que uma dada tolerância ϵ .

Os sistemas de equações lineares implícitos em (2.15) são facilmente resolvidos colocando-se G na forma LDL^T ou LL^T , já que G é sempre simétrica e definida positiva. No primeiro caso, L é uma matriz triangular inferior cujos elementos diagonais são unitários e D , uma matriz diagonal. No segundo, L é uma matriz triangular inferior em que os elementos diagonais não são necessariamente unitários. São utilizadas também, técnicas de esparsidade já que G é uma matriz bastante esparsa.

As duas principais funções satélites da EESP são a observabilidade e o processamento de erros grosseiros.

A observabilidade é condição necessária para a EESP. Informalmente, pode-se dizer que se o conjunto de medidas é suficiente em número ($m \geq 2n-1$) e está bem distribuído geograficamente, o sistema é dito observável e as equações da EESP são solúveis [1].

Usualmente, um sistema elétrico é projetado para ser observável nas condições normais de operação. A não-observabilidade poderá ocorrer como consequência de mudanças não previstas na topologia da rede ou devido a falhas nos instrumentos de medição ou nos sistemas de telecomunicações.

O processamento de erros grosseiros é estudado em um capítulo a parte em nosso trabalho.

2.4 - A Abordagem Hierárquica:

Como já foi dito anteriormente, um Estimador de Estado deve satisfazer a alguns requisitos tais como velocidade, precisão, relativamente baixas exigências de armazenamento de dados e alta capacidade de detectar, identificar e eliminar erros grosseiros nas telemedições. Com o aumento das dimensões dos sistemas elétricos devido à tendência atual da operação centralizada de um sistema interligado, ficou mais difícil cumprir estes requisitos. Isto, juntamente com a evolução natural das estratégias de controle hierarquizados dos modernos centros de controle, levou ao desenvolvimento de Estimadores de Estado Multi-nível ou Hierárquicos. A idéia básica é reduzir a complexidade associada à alta ordem do problema integrado, reduzindo-o a vários sub-problemas de menor ordem, usando computadores descentralizados ou ainda, processamento paralelo.

Basicamente, um sistema elétrico pode estar organizado de duas formas diferentes:

- a) O sistema compreende um certo número de sub-sistemas, cada qual controlado por um Centro de Operações (COS) local e coordenados por um Centro de Controle Supervisório, de nível hierárquico superior. Este é o caso brasileiro. Cada empresa regional (ELETROSUL, FURNAS, CHESF, etc.) possui ou possuirá seu próprio COS, supervisionados pela ELETROBRAS, que já implantou em Brasília seu COS supervisório de todo o sistema interligado brasileiro. Este tipo de organização é denominado de agregação de sub-sistemas.
- b) Um sistema é decomposto em vários sub-sistemas mas é controlado como um todo por um único Centro de Controle. É o que denominamos de decomposição de um sistema.

Para implementar-se um algoritmo hierárquico, o tipo de organização do sistema é fundamental.

Na agregação, um conjunto de computadores espacialmente distribuídos será utilizado, cada um deles monitorando seu próprio sub-sistema. Num segundo nível, um computador central é destinado à coordenação dos sub-sistemas de nível inferior.

Na decomposição, dois tipos de estrutura computacional devem ser consideradas quando da formulação de um algoritmo em dois níveis:

- i) um sistema multi-processador;
- ii) um único computador: neste caso, os vários procedimentos de ambos os níveis são executados simultaneamente, utilizando-se técnicas de processamento paralelo.

Neste trabalho, dedicaremos nossa atenção única e exclusivamente aos Estimadores de Estado Hierárquicos aplicáveis à agregação de sub-sistemas.

Quando da escolha de um determinado algoritmo de Estimação de Estado Hierárquico, há certos requisitos que devem ser analisados. Esses requisitos foram denominados por Van Cutsem [6] de "propriedades essenciais" dos Estimadores Hierárquicos:

- 1 - Aplicações - Um Estimador de Estado Hierárquico pode ser mais ou menos eficiente, dependendo do tipo de organização do sistema em questão. Existem algoritmos que se aplicam tanto ao esquema de agregação quanto ao da decomposição. Outros, foram desenvolvidos para serem aplicados ou à agregação ou à decomposição;
- 2 - Robustez: É a capacidade de convergência a uma solução aceitável, face às características do sistema as mais diversas possíveis (topologia, configuração dos medidores, carga, etc.);
- 3 - Precisão - A solução mais precisa é a obtida pelo Estimador de Estado Integrado (EEI) que, geralmente, é tomado como referência e denominada como "solução ótima" [6];
- 4 - Aplicabilidade ao tipo de organização; Está relacionado ao tipo de

organização (agregação ou decomposição) com o qual o algoritmo melhor se adapte, isto é, apresente melhor desempenho;

5 - Capacidade de processar erros grosseiros: Capacidade do Estimador Hierárquico detectar, identificar e eliminar (ou recuperar) medidas portadoras de erros grosseiros;

6 - Intercâmbio de informações: Está relacionado com o fluxo de informações entre os computadores de cada sub-sistema entre si e com o computador central;

7 - Redução no tempo de CPU: Esta redução é em geral calculada em relação ao tempo gasto pelo EEI;

8 - Análise de observabilidade: Possibilidade de adaptação dos métodos de análise de observabilidade desenvolvidos para o EEI ao EESPH.

A definição das atribuições de cada nível hierárquico é um requisito de ordem prática indispensável à implementação de um EESPH.

Como foi visto no primeiro capítulo deste trabalho, existem na literatura, inúmeros algoritmos para Estimadores de Estado Hierárquicos em Sistemas de Potência. O sistema elétrico brasileiro é o resultado da agregação de vários sub-sistemas. Portanto, os algoritmos escolhidos para implementação e análise devem ser, forçosamente, aplicáveis ao esquema da agregação de sub-sistemas. Eles devem ser robustos e seus resultados devem ser precisos e confiáveis. Devido às grandes distâncias entre os COS das empresas envolvidas, e, sobretudo, devido ao porte de cada sub-sistema envolvido, o intercâmbio de informações deve ser o mínimo possível. Tendo em vista os requisitos expostos acima, escolhemos apenas três dentre tantos algoritmos existentes, para implementação e análise.

No próximo capítulo, descreveremos a organização geral dos Estimadores de Estado Hierárquicos e estudaremos em detalhe os três algoritmos escolhidos: o Algoritmo de Van Cutsem/Howard/Ribbens-Panvella [4], o Algoritmo de Salem/Lo/Moffat/McCoill [11] e o Algoritmo de Kurzyn [7].

CAPÍTULO 3

ESTIMADORES DE ESTADO HIERÁRQUICOS

3.1 - Introdução:

Neste capítulo, analisaremos em detalhes três algoritmos diferentes para Estimadores de Estado em Sistemas de Potência Hierárquicos (EESPH). Os algoritmos aqui apresentados possuem dois níveis hierárquicos:

1^o nível - Nível Local: Compreende a estimação de cada sub-sistema. Qualquer algoritmo de Estimação de Estado pode ser utilizado. A Estimação de Estado de cada sub-sistema é executada simultaneamente e independentemente das demais. Portanto, neste trabalho está-se desprezando o efeito da "janela de tempo", pois os dados enviados dos níveis locais ao nível hierarquicamente superior não foram coletados no mesmo instante de tempo. Cada sub-sistema possui sua própria barra de referência.

2^o nível - Nível Central ou de Coordenação: Utiliza dados provenientes das linhas de intercâmbio e das barras de fronteira de cada sub-sistema e determina a defasagem angular entre suas barras de referência e a barra de folga de um determinado sub-sistema, tomada como referência. Além disso, o nível central pode reestimar o estado (v_i e θ_i) das barras de fronteira de cada sub-sistema.

Todos os algoritmos aqui apresentados tratam o nível local da mesma forma. As mudanças ocorrem no nível de coordenação, como veremos a seguir.

3.2 - O Esquema Geral de Organização:

Consideremos um sistema elétrico constituído por (ou sub-dividido em) k sub-sistemas ou áreas A_1, A_2, \dots, A_k . Sendo S o conjunto de todas as barras do sistema, temos que

$$\bigcup_{i=1}^k S_i = S \quad (3.1)$$

e

$$S_i \cap S_j = \emptyset, \quad \begin{array}{l} i \neq j \\ i, j = 1, k \end{array} \quad (3.2)$$

Os sub-sistemas estão interligados entre si por linhas de intercâmbio (linhas de transmissão ou transformadores). As barras às quais estas linhas estão conectadas pertencem ao sub-sistema e são denominadas de barras de fronteira. Seu conjunto é definido como S_c .

O conjunto das barras de fronteira constitui um pseudo sub-sistema A_{k+1} , o sub-sistema de interligação. Esse sub-sistema possui barras comuns com todos os outros k sub-sistemas.

Sendo S_c^i o conjunto de todas as barras de fronteira pertencentes ao sub-sistema A_i , temos que

$$S_c^i = S_c \cap S_i \quad (3.3)$$

Para cada sub-sistema, consideremos as seguintes grandezas:

* n_1 : número de barras do sub-sistema A_1 ;

* n_c^1 : número de barras de fronteira do sub-sistema A_1 ;

* n_c : número total de barras de fronteira;

$$n_c = \sum_{i=1}^n n_c^i \quad (3.4)$$

* $\mathbf{x}_c^i = [[\theta_c^i]^T, [v_c^i]^T]^T$: vetor das variáveis de estado das barras de fronteira do sub-sistema A_i ;

* $\mathbf{x}_r^i = [[\theta_r^i]^T, [v_r^i]^T]^T$: vetor das variáveis de estado das barras internas do sub-sistema A_i .

Define-se

$$\mathbf{x}_i = [[\mathbf{x}_c^i]^T, [\mathbf{x}_r^i]^T]^T \quad (3.5)$$

Ao sub-sistema de interligação A_{k+1} , o vetor \mathbf{x}_c das variáveis de estado de coordenação é definido como

$$\mathbf{x}_c = [[\mathbf{x}_c^1]^T, [\mathbf{x}_c^2]^T, \dots, [\mathbf{x}_c^k]^T, \mathbf{u}]^T \quad (3.6)$$

\mathbf{u} é um vetor de dimensão $(k-1)$, representando a defasagem angular entre os vários subsistemas:

$$\mathbf{u} = [u_2, u_3, \dots, u_k]^T \quad (3.7)$$

\mathbf{u} é denominado vetor dos ângulos de coordenação onde u_1 representa a fase da

barra de folga do sub-sistema A_1 , tomada como referência:

$$u_1 = 0$$

u_1 é a fase da barra de folga do sub-sistema A_1 em relação à barra de folga do sub-sistema A_1 .

O vetor z , de dimensão m , representando o conjunto de medidas de todo o sistema, é particionado da seguinte forma:

$$z = [z_1^T, z_2^T, \dots, z_k^T, z_u^T]^T \quad (3.8)$$

onde z_1 é o vetor do conjunto de medições do sub-sistema A_1 e z_u é o vetor do conjunto de medições do sub-sistema de interligação A_{k+1} , isto é:

z_1 : inclui medidas de injeções e fluxos de potência ativa e reativa, medidas de tensão e corrente, etc. no sub-sistema A_1 ;

z_u : inclui apenas as medidas de fluxo ativo e/ou reativo nas linhas de intercâmbio.

3.3 - O Nível Local dos Estimadores Hierárquicos:

Para cada sub-sistema, temos:

$$z_1 = h(x_1) + v_1 \quad (3.9)$$

Pela técnica dos mínimos quadrados, a função objetivo a ser minimizada é

$$J_1(\mathbf{x}_1) = [\mathbf{z}_1 - \mathbf{h}_1(\mathbf{x}_1)]^T \cdot \mathbf{R}_1^{-1} \cdot [\mathbf{z}_1 - \mathbf{h}_1(\mathbf{x}_1)] \quad (3.10)$$

onde

$$\mathbf{R}_1 = E\{\mathbf{v}_1 \cdot \mathbf{v}_1^T\} \quad (3.11)$$

Fazendo

$$\left. \frac{\partial J_1(\mathbf{x}_1)}{\partial(\mathbf{x}_1)} \right]_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}} = 0 \quad (3.12)$$

e

$$\frac{\partial \mathbf{h}_1(\mathbf{x}_1)}{\partial(\mathbf{x}_1)} = \mathbf{H}_1(\mathbf{x}_1) \quad (3.13)$$

e substituindo (3.10) e (3.13) em (3.12) obtemos

$$\mathbf{H}_1^T(\hat{\mathbf{x}}_1) \cdot \mathbf{R}_1^{-1} \cdot [\mathbf{z}_1 - \mathbf{h}_1(\hat{\mathbf{x}}_1)] = 0 \quad (3.14)$$

Linearizando (3.14), chega-se a

$$\mathbf{x}_1^{(1+1)} = \hat{\mathbf{x}}_1^{(1)} + [\mathbf{H}_1^T(\hat{\mathbf{x}}_1^{(1)}) \cdot \mathbf{R}_1^{-1} \cdot \mathbf{H}_1^T(\hat{\mathbf{x}}_1^{(1)})]^{-1} \cdot \mathbf{H}_1^T(\hat{\mathbf{x}}_1^{(1)}) \cdot \mathbf{R}_1^{-1} \cdot [\mathbf{z}_1 - \mathbf{h}_1(\hat{\mathbf{x}}_1^{(1)})] \quad (3.15)$$

onde i é o número da iteração.

Por esta equação, observamos que cada sub-sistema utiliza apenas seus próprios dados e medidas, centralizadas em seu próprio COS.

Os ângulos de fase são calculados tendo a barra de folga do próprio sub-sistema como referência.

O resultado obtido é:

$$\hat{\mathbf{x}}_i = [[\hat{\mathbf{x}}_c]^T, [\hat{\mathbf{x}}_r^i]^T]^T \quad (3.16)$$

Uma questão importante levantada por Van Cutsem [4], é a determinação de quão sub-ótimo é o resultado obtido pela estimação local. A estimação local consiste em minimizar k critérios quadráticos

$$\min_{\mathbf{x}} J_i(\mathbf{x}_i) \Rightarrow \left. \frac{\partial J_i(\mathbf{x}_i)}{\partial \mathbf{x}_i} \right|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}} = 0, \quad (3.17)$$

enquanto que a estimação integrada consiste em minimizar o critério quadrático global

$$\min_{\mathbf{x}} J(\mathbf{x}) \Rightarrow \left. \frac{\partial J(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}} = 0 \quad (3.18)$$

Analisando as equações acima, Van Cutsem conclui que os estados \mathbf{x}_i estimados pelos dois métodos não coincidem. No caso da estimação integrada, as medições feitas nas interligações relacionam os sub-vetores \mathbf{x}_i entre si. No caso da estimação local, estes sub-vetores são estimados independentemente uns dos outros. As informações contidas no vetor \mathbf{z}_u não são consideradas na estimação local.

Entretanto, como apontam Lo, Salem e outros [11], cada sub-sistema não pode ser considerado completamente independente. Os fluxos de potência existentes nas linhas de intercâmbio afetam as injeções de potência nas barras de fronteira. Ainda segundo Lo e seus colaboradores, a independência entre

os estimadores locais pode ser simulada por uma das seguintes maneiras:

(a) Calculando as injeções equivalentes em cada barra de fronteira pela aplicação da Lei de Kirchhoff, considerando todos os fluxos de potência nas linhas de intercâmbio. Isto significa que as injeções nas barras de fronteira e os fluxos de potência nas linhas de intercâmbio conectadas às barras de fronteira são incluídas na injeção equivalente.

(b) Desprezando os fluxos de potência nas linhas de intercâmbio. Isto significa que o valor das injeções de potência nas barras de fronteira empregado na estimação local é o mesmo utilizado na estimação integrada.

(c) Desprezando as injeções em todas as barras de fronteira. Isto significa que todas as injeções são consideradas zero.

Entretanto, o que os autores sugerem no item (b) é uma completa violação das Leis de Kirchhoff. Se despreza-se os fluxos nas linhas de intercâmbio, mantendo inalterado o valor das injeções, está-se introduzindo um erro grosseiro. Os fluxos de potência saindo ou entrando na barra de fronteira são simplesmente eliminados, alterando o balanço de potência na barra. A potência injetada medida não mais corresponderá ao valor realmente injetado na barra.

A afirmação em (c) também não é verdadeira. O que deve ser feito, na realidade, é desprezar-se completamente as medidas de fluxo de potência entrando ou saindo das barras de fronteira, juntamente com qualquer medida de injeções existente na barra, para não incorrer-se no mesmo erro apontado no parágrafo anterior. As injeções nas barras de fronteira não são zero, mas sim, ignoradas.

Kurzyn [7] chama a atenção para o fato dessas "injeções" calculadas possuírem erros maiores que as injeções verdadeiras. Kurzyn salienta ainda que, quando não dispomos de todas as medidas necessárias para a determinação das injeções calculadas, as outras medidas existentes na barra

deverão ser desprezadas, o que poderá afetar a observabilidade do sub-sistema em questão.

3.4 - O Algoritmo de Van Cutsem, Howard e Ribbens-Pavella [4]

Como já foi visto, o vetor $\hat{\mathbf{x}}_i$ é estimado no nível local, podendo ser particionado como

$$\hat{\mathbf{x}}_i = [[\hat{\mathbf{x}}_c^1]^T, [\hat{\mathbf{x}}_r^1]^T]^T \quad (3.19)$$

No algoritmo de Van Cutsem e seus colaboradores, o objetivo do nível de coordenação é re-estimar \mathbf{x}_c e estimar \mathbf{u} , onde \mathbf{x}_c é dado por:

$$\mathbf{x}_c = [\mathbf{x}_c^1]^T, [\mathbf{x}_c^2]^T, \dots, [\mathbf{x}_c^k]^T \quad (3.20)$$

onde \mathbf{x}_c é o vetor dos estados em todas as barras de fronteira.

Deste modo, Van Cutsem define o vetor de estado \mathbf{x}_s a ser estimado no nível de coordenação como

$$\mathbf{x}_s = [\mathbf{u}^T, \mathbf{x}_c^T]^T \quad (3.21)$$

Portanto, o objetivo principal do nível central no Algoritmo de Van Cutsem é estimar o vetor dos ângulos de coordenação \mathbf{u} e ainda, re-estimar os estados nas barras de fronteira, representados pelo vetor \mathbf{x}_c . Para tanto, Van Cutsem utiliza-se não só das telemidas de fluxo nas linhas de intercâmbio, contidas no vetor \mathbf{z}_u , mas cria um vetor de "pseudo-medidas" $\hat{\mathbf{x}}_c$, dos estados estimados em todas as barras de fronteira nos níveis locais

Dessa forma, é definido um vetor de "medidas" como sendo

$$\mathbf{z}_s = [\mathbf{z}_u^T, \hat{\mathbf{x}}_c^T]^T \quad (3.22)$$

Da mesma forma que no primeiro nível,

$$\mathbf{z}_s = \mathbf{h}_s(\mathbf{x}_s) + \mathbf{v}_s \quad (3.23)$$

Observando as expressões (3.21), (3.22) e (3.23), chega-se a

$$\begin{bmatrix} \mathbf{z}_u \\ \hat{\mathbf{x}}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_u(\mathbf{u}, \mathbf{x}_c) \\ \mathbf{x}_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{v}_u \\ \mathbf{v}_c \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

onde

$$E\{\mathbf{v}_u\} = \mathbf{0} \quad (3.25)$$

e

$$E\{\mathbf{v}_u \cdot \mathbf{v}_u^T\} = \mathbf{R}_u = \text{diag}(\sigma_{u_i}^2) \quad (3.26)$$

Com relação às pseudo-medidas, considera-se que

$$E\{\mathbf{v}_c\} = \mathbf{0} \quad (3.27)$$

e

$$E\{\mathbf{v}_c \cdot \mathbf{v}_c^T\} = \mathbf{R}_c \quad (3.28)$$

onde R_c é a matriz de covariância dos erros de estimação dos estados nas barras de fronteira. Para obter-se essa matriz, é necessário que ao final da estimação no nível local, calcule-se os elementos diagonais da "matriz de informação" Σ , correspondente às barras de fronteira. Estes elementos devem ser transmitidos ao nível superior juntamente com os valores do vetor \hat{x}_c . Van Cutsem prova com facilidade [4] que Σ_1 é a matriz das covariâncias dos erros de estimação.

Como é usual, assume-se que a i -ésima estimação local é ótima e satisfaz à condição

$$\min_{\hat{x}_1} J = \min_{x_1} [z_1 - h_1(x_1)]^T \cdot R_1^{-1} \cdot [z_1 - h_1(x)] \quad (3.29)$$

ou à condição derivada

$$H_1^T(\hat{x}_1) \cdot R_1^{-1} \cdot [z_1 - h_1(\hat{x}_1)] = 0 \quad (3.30)$$

Como o estado estimado \hat{x}_1 é próximo de seu valor verdadeiro x_1 , pode-se linearizar a equação (3.30) em torno de x_1 obtendo que

$$\varepsilon_1 = x_1 - \hat{x}_1 = -\Sigma_1 \cdot H_1^T \cdot R_1^{-1} \cdot v_1 \quad (3.31)$$

onde ε_1 são os erros de estimação e

$$v_1 = z_1 - h_1(x_1) \quad (3.32)$$

ε_1 possui distribuição normal com média nula e covariância Σ_1 .

Observem que quando fazemos

$$R_c = \text{diag} \left(\sum_{i \in S_c}^1 \right) \quad (3.33)$$

onde,

$$\underline{\Sigma}_i = [H_i^T R_i^{-1} H_i]^{-1} \quad (3.34)$$

Nota-se que o cálculo de R_c implica numa inversão de matriz, um processo que consome um tempo precioso para um programa em tempo real.

A matriz Σ depende essencialmente de três fatores:

- (i) a configuração dos medidores, isto é, o tipo e a localização dos medidores que intervêm na matriz Jacobiana local H_i . Ela só sofrerá modificações caso medidores sejam conectados/desconectados da rede ou ocorram falhas nos aparelhos ou sistemas de telecomunicações;
- (ii) os parâmetros da rede;
- (iii) o vetor de estado \hat{x}_1 . (Contudo, testes demonstram que $\underline{\Sigma}_i$ é pouco sensível aos valores desse vetor, ao menos enquanto eles estiverem próximos de seus valores nominais).

Van Cutsem afirma que seu algoritmo é bastante sensível aos valores atribuídos a R_c . Contudo, pode-se calcular R_c para as condições normais de operação do sistema e mantê-la constante. Caso ocorra alguma alteração importante na rede, recalcula-se $\underline{\Sigma}_i$ e R_c em um processo "off-line", retransmitindo-se em seguida ao nível central.

O critério de minimização é definido como

$$J_s(x_s) = [z_s - h_s(x_s)]^T R_s^{-1} [z_s - h_s(x_s)]^T \quad (3.35)$$

onde

$$\mathbf{R}_s = [\mathbf{R}_u^T, \mathbf{R}_c^T]^T \quad (3.36)$$

A condição necessária para minimizar-se J_s , a soma dos quadrados dos resíduos ponderados do nível central é que

$$\left. \frac{\partial J_s(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}_s} \right|_{\mathbf{x}_s = \hat{\mathbf{x}}_s} = 0 \quad (3.37)$$

isto é,

$$-2 \cdot \mathbf{H}_s \cdot \mathbf{R}_s^{-1} \cdot [\mathbf{z}_s - \mathbf{h}_s(\hat{\mathbf{x}}_s)] = 0 \quad (3.38)$$

onde

$$\mathbf{H}_s = \frac{\partial \mathbf{h}_s(\mathbf{x}_s)}{\partial \mathbf{x}_s} \quad (3.39)$$

é a matriz Jacobiana do segundo nível. \mathbf{H}_s pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\mathbf{H}_s = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{h}_u}{\partial \mathbf{u}} & \frac{\partial \mathbf{h}_u}{\partial \mathbf{x}_c} \\ \frac{\partial \mathbf{x}_c}{\partial \mathbf{u}} & \frac{\partial \mathbf{x}_c}{\partial \mathbf{x}_c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_u & \mathbf{H}_c \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

onde I representa a matriz identidade.

Após a linearização da equação (3.38), tem-se que

$$\mathbf{x}_s^{(1+1)} = \mathbf{x}_s^{(1)} + \mathbf{G}_s^{-1(1)} \cdot \mathbf{g}_s^{(1)} \quad (3.41)$$

onde

$$\mathbf{G}_s^{(1)} = \mathbf{H}_s^T(1) \cdot \mathbf{R}_s^{-1} \cdot \mathbf{H}_s(1) \quad (3.42)$$

e

$$\mathbf{g}_s^{(1)} = \mathbf{H}_s^T(1) \cdot \mathbf{R}_s^{-1} \cdot [\mathbf{z}_s - \mathbf{h}_s(\mathbf{x}_s^{(1)})] \quad (3.43)$$

Neste trabalho, o valor inicial de \mathbf{u} é considerado igual a zero, enquanto que toma-se $\hat{\mathbf{x}}_c$ como valor inicial para \mathbf{x}_c . Ao final deste processo, os vetores estimados $\hat{\mathbf{u}}$ e $\hat{\mathbf{x}}_c$ são obtidos e seus componentes transmitidos de volta a seus respectivos sub-sistemas. Seja ϕ_1 o vetor formado pelos ângulos de fase das barras do sub-sistema A_1 com relação à referência global. O vetor de estimativas para ϕ_1 , $\hat{\phi}_1$ pode ser calculado da seguinte forma [11]:

$$\hat{\phi}_1 = \begin{bmatrix} \hat{\theta}_1 \\ \hat{\theta}_1^r \\ \hat{\theta}_1 \\ \hat{\theta}_c \end{bmatrix} + \hat{\mathbf{u}}_1 \cdot \mathbf{E} \quad (3.44)$$

onde \mathbf{E} é o vetor unitário, isto é,

$$\mathbf{E} = [1, 1, \dots, 1]^T \quad (3.45)$$

A forma final do vetor de estado \mathbf{x} é:

$$\hat{\mathbf{x}}_i = [\hat{\phi}_i^T, \hat{\mathbf{v}}_i^T]^T \quad (3.46)$$

O Algoritmo de Van Cutsem é bastante sensível a redundância do vetor de medidas \mathbf{z}_u . De fato, dois diferentes tipos de redundâncias são definidos [4]:

(i) A redundância global

$$\eta_s = \frac{2.n_c + m_u}{2.n_c + (k-1)} \quad (3.47)$$

onde

m_u : número total de medidas de fluxos ativos e reativos nas linhas de intercâmbio;

$2.n_c$: número de componentes do vetor $\hat{\mathbf{x}}_c$.

(ii) A redundância com relação ao vetor \mathbf{u} :

$$\eta_u = \frac{m_u}{(k-1)} \quad (3.48)$$

Com relação a m_u , três casos podem ocorrer:

(i) $m_u < k-1$: a estimação não é possível, o problema não tem solução.

(ii) $m_u = k-1$: é o caso determinístico.

(iii) $m_u > k-1$: é a condição necessária para a estimação.

O máximo valor de η_s vale

$$\eta_s = \frac{2.n_c + 4.n_{li}}{2.n_c + (k-1)} \quad (3.49)$$

3.5 - O Algoritmo de Salem, Moffatt, Lo e McColl [11]

No Algoritmo de Van Cutsem, os objetivos do nível central são estimar o ângulo de fase da barra de folga de cada sub-sistema com relação à barra de folga do sistema global (o vetor dos ângulos de coordenação u) e re-estimar as tensões complexas nas barras de fronteira (vetor \hat{x}_c). O Algoritmo utiliza também todas as medidas de fluxo ativo e reativo no nível central.

Baseando-se em estudos de simulação, Lo e seus colaboradores afirmam que as tensões complexas estimadas em todas as barras de fronteira obtidas na estimação local estão bem próximas de seu valor estimado mediante a estimação integrada. Segundo os autores, esta condição se aplica independentemente do tamanho do sistema, carregamento ou número de linhas de intercâmbio. Portanto, concluem Salem e seus colaboradores, a re-estimação de \hat{x}_c no nível central pouco afetará o resultado final. O algoritmo proposto visa justamente a redução da memória computacional e do intercâmbio de informações exigidos pelo estimador, bem como aumentar sua velocidade. Ele parte da suposição de que as tensões complexas estimadas nas barras de fronteira no nível local \hat{x}_c são exatas e não precisam ser re-estimadas no nível central. Nesse caso, o número de medidas a serem manipuladas reduz-se drasticamente. A função do nível central fica assim reduzida apenas à estimação do vetor u . Neste caso, as medidas de fluxo reativo nas linhas de intercâmbio não são

utilizadas. Isto reduz substancialmente a transmissão de informações.

Com estas simplificações, a equação não-linear que relaciona o vetor de medidas de fluxo ativo e o vetor de estado u fica

$$z_s^a = h_s^a(\hat{x}_c, u) + v_s \quad (3.50)$$

onde \hat{x}_c nesse caso, é determinístico e não representa variáveis de estado.

Aplicando a técnica dos mínimos quadrados ponderados, Lo e seus colaboradores chegam a seguinte equação:

$$u^{(1+1)} = u^{(1)} + [G_a]_{(1)}^{-1} \cdot [H_s^a]^T \cdot [R_s^a]^{-1} \cdot [z_s^a - h_s^a(\hat{x}_c, u^{(1)})] \quad (3.51)$$

onde

$$G_a = [H_s^a]^T \cdot [R_s^a]^{-1} \cdot [H_s^a] \quad (3.52)$$

e

$$H_s = \frac{\partial h_s^a(\hat{x}_c, u)}{\partial u} \quad (3.53)$$

O vetor \hat{x}_c é mantido constante durante todo o processo iterativo.

Ao final da estimação central, o vetor dos ângulos de coordenação u é obtido e cada um de seus componentes u_i é enviado a seu respectivo sub-sistema.

Todos os ângulos de fase do sub-sistema i podem agora ser referenciados à barra de referência global, adicionando-se ao subvetor θ_{-1} o componente do vetor u correspondente:

$$\hat{\phi}_1 = \hat{\theta}_1 + \hat{u}_1 \cdot E \quad (3.54)$$

onde o vetor E é definido como em (3.45).

A forma final do vetor de estado x fica:

$$x_1 = [\hat{\phi}_1^T, v_1^T]^T \quad (3.55)$$

3.6 - O Algoritmo de Kurzyn [7]

Como no Algoritmo de Salem, o Algoritmo de Kurzyn calcula apenas o vetor u de ângulos de coordenação u . Contudo, a maneira como esse vetor é estimado difere completamente da forma empregada nos dois algoritmos anteriores.

Além das grandezas já definidas anteriormente, sejam l_i o número de linhas do sub-sistema A_i e l o número total de linhas. Sejam ainda t_j o número de linhas de intercâmbio monitoradas na j -ésima interconexão entre dois sub-sistemas e c o número total de interconexões entre sub-sistemas vizinhos. Então:

$$\sum_{i=1}^k l_i + \sum_{j=1}^c t_j = l \quad (3.56)$$

$$c \leq n_c < n$$

$$c \geq k-1$$

Neste algoritmo, a barra de folga do sub-sistema A_1 é sempre a

referência. Portanto,

$$u_1 = 0$$

O vetor u fica assim definido:

$$u = [u^{2/1}, u^{3/1}, \dots, u^{k/1}]^T \quad (3.57)$$

onde $u^{i/1}$ é o ângulo de defasamento entre a barra de folga do sub-sistema i e o sub-sistema 1.

Um outro vetor, de dimensão t_j , representando as aberturas angulares das linhas de intercâmbio, é definido como:

$$\underline{\delta}^{i/i-1} = [\delta_1^{i/i-1}, \delta_2^{i/i-1}, \dots, \delta_p^{i/i-1}, \dots, \delta_{t_j}^{i/i-1}] \quad (3.58)$$

onde $\delta_p^{i/i-1}$ é a abertura angular da p -ésima linha de intercâmbio entre os sub-sistemas i e $i-1$, com relação ao $(i-1)$ ésimo sub-sistema. Existem ao todo, c vetores $\underline{\delta}$. Cada interconexão deverá ter pelo menos, uma linha de intercâmbio monitorada.

O Algoritmo é subdividido em três etapas:

1. Estimção dos c vetores de aberturas angulares $\underline{\delta}^{i/i-1}$.

Cada componente dos vetores $\underline{\delta}^{i/i-1}$ é calculados separadamente, para cada linha de intercâmbio monitorada, utilizando o seguinte algoritmo [7]

$$\delta_{(i+1)} = \delta_{(i)} + [H^T(\delta_{(i)}) \cdot R^{-1} \cdot H(\delta_{(i)})]^{-1} \cdot H^T(\delta_{(i)}) \cdot R^{-1} \cdot [y - h(\delta_{(i)})] \quad (3.59)$$

onde

y : vetor das medidas de fluxo ativo e reativo de uma determinada linha de intercâmbio (4 x 1);

δ : abertura angular de uma determinada linha de intercâmbio;

$$\delta_{r,s}^{i/i-1} = \phi_r^i - \phi_s^{i-1} \quad (3.60)$$

onde a barra r encontra-se no sub-sistema A_i e a barra s no sub-sistema A_{i-1} ;

$h(*)$: é uma função vetorial (4 x 1) não-linear que relaciona as medidas contidas em y com a abertura angular δ ;

$H(\delta) = \partial h(\delta)/\partial \delta$: é o vetor Jacobiano (4 x 1);

R : matriz das covariâncias dos erros de medição das medidas de fluxo de potência nas linhas de intercâmbio;

i : contador de iterações.

Quando dispomos de apenas uma medida de fluxo, a equação (3.59) fica como

$$\delta_{(i+1)} = \delta_{(i)} + H^{-1}(\delta_{(i)})[y - h(\delta_{(i)})] \quad (3.61)$$

O processo iterativo começa com $\delta = 0$. Os valores das tensões complexas nas barras de fronteira estimadas no primeiro nível são necessários ao cálculo de δ e devem ser transmitidas do nível local ao estimador central. No estimador central, esses valores são tratados como determinísticos e permanecem

constantes durante todo o processo iterativo.

2. Cálculo do ângulo de coordenação de dois sub-sistemas vizinhos com relação ao sub-sistema A_1 .

(i) Estimção do ângulo de coordenação $u^{2/1}$. Isto é feito utilizando-se o vetor estimado $\hat{\delta}$ e valores apropriados dos ângulos de fase das tensões nas barras de fronteira. Havendo t linhas de intercâmbio entre os dois sub-sistemas, então a estimção de $u^{2/1}$ se processará em $t+1$ passos. Uma estimção para $u^{2/1}$ é calculada para cada linha de intercâmbio separadamente, utilizando a expressão:

$$\hat{u}^{2/1} = \hat{\theta}^1 + \hat{\delta}^{2/1} - \hat{\theta}^2 \quad (3.62)$$

onde $\hat{\theta}^1$ e $\hat{\theta}^2$ são estimativas dos ângulos de fase das tensões nas barras de fronteira do primeiro e do segundo sub-sistema respectivamente, obtidas no nível local.

A estimativa final para $u^{2/1}$ é obtida como uma média aritmética simples entre os valores calculados pela expressão (3.62) [11]:

$$\hat{u} = \sum_{i=1}^t \hat{u}^{2/1} \cdot t^{-1} \quad (3.63)$$

(ii) Cálculo de todos os ângulos de fase das tensões nas barras de fronteira do segundo sub-sistema:

$$\hat{\phi}^j = \hat{u}^{2/1} + \hat{\theta}^j \quad (3.64)$$

onde $\hat{\phi}^j$ é a estimativa do ângulo de fase da tensão da j -ésima barra de

fronteira do segundo sub-sistema em relação à barra de folga do primeiro.

(iii) Quando o cálculo acima estiver concluído, o novo sub-sistema ampliado torna-se o sub-sistema base, isto é, torna-se o sub-sistema A_1 .

3. Estimação dos ângulos de coordenação dos sub-sistemas restantes.

O Algoritmo é repetido a partir do passo 2, para os $k-2$ sub-sistemas restantes.

Kurzyn afirma que os erros de estimação das aberturas angulares das linhas de intercâmbio dependem dos seguintes fatores:

- número e tipo das medidas de fluxo nas linhas;
- erros de estimação das tensões complexas nas barras de fronteira;
- erros de medição dos fluxos nas linhas de intercâmbio;

Além disso, o autor indica que os erros de estimação dos ângulos de coordenação dependem dos seguintes fatores:

- erros de estimação das aberturas angulares;
- erros de estimação dos ângulos de fase nos sub-sistemas;
- número de linhas de intercâmbio monitoradas por interconexão;
- a ordem de numeração dos sub-sistemas;
- a estrutura do sistema integrado.

3.7 - Comentários adicionais:

A. Tanto no Algoritmo de Lo quanto no Algoritmo de Kurzyn, \hat{x}_c é considerado perfeitamente exato e apenas u é estimado no nível central. Contudo, Van Cutsem [7] discorda dessa aproximação pois segundo ele, conduz a resultados imprecisos para os fluxos de potência ativa e reativa estimados em linhas curtas e transformadores com alta relação de transformação. Van Cutsem

questiona também a maneira como Kurzyn calcula \hat{u} . ("Como o uso de uma média aritmética pode ser justificado quando seus termos possuem precisões diferentes?"). Ele chama ainda a atenção para o fato dos erros de estimação serem cumulativos, podendo assim, distorcerem completamente os resultados, principalmente quando houverem muitos sub-sistemas. Kurzyn, por sua vez, justifica a equação (3.63) alegando que as "medições" utilizadas possuem aproximadamente o mesmo erro.

B. Lo, Salem, McColl e Moffat sugerem o uso de algoritmos desacoplado rápido, tanto para a estimação integrada [13] quanto para a estimação local [11]. Os vetores z e x são desacoplados em suas partes ativa e reativa, gerando os vetores z^a , z^r , θ e v respectivamente. As matrizes H^a , H^r , G^a e G^r são calculadas e fatoradas uma única vez, no início da primeira iteração e mantidas constantes até o final do processo. Elas devem ser recalculadas apenas quando alguma alteração importante ocorrer na topologia da rede ou na configuração dos medidores. Os autores fazem ainda, algumas modificações no Algoritmo de Van Cutsem [11], transformando-o num Algoritmo Desacoplado Rápido. Com essas modificações, a equação (3.41) transforma-se em três equações desacopladas:

$$\underline{u}^{(1+1)} = \underline{u}^{(1)} + [G_u^a]^{-1} \cdot [H_u^a]^T \cdot [R_u^a]^{-1} \cdot [z_u^a - h_u^a(\hat{u}^{(1)})] \quad (3.65)$$

\hat{x}_c é mantido constante durante todo o processo iterativo. Obtida a convergência, procede-se ao cálculo de $\underline{\theta}_c$ e V_c :

$$\underline{\theta}_c^{(p+1)} = \underline{\theta}_c^{(p)} + [G_c^a]^{-1} \cdot [H_c^a]^T \cdot [R_c^a]^{-1} \cdot [z_s^a - h_s^a(\hat{\theta}_c^{(p)})] \quad (3.66)$$

$$\mathbf{v}_c^{(q+1)} = \mathbf{v}_c^{(q)} + [\mathbf{G}_c^r]^{-1} \cdot [\mathbf{H}_c^r]^T \cdot [\mathbf{R}_c^r]^{-1} \cdot [\mathbf{z}_s^r - \mathbf{h}_s^r(\mathbf{v}_c^{(q)})] \quad (3.67)$$

$\hat{\mathbf{u}}$ é mantido constante durante todo o processo iterativo.

C. Como o Algoritmo de Van Cutsem pode apresentar problemas devido à baixa redundância das medidas disponíveis, principalmente quando erros grosseiros estiverem associados à essas medidas, Salem e seus colaboradores [11] sugerem a introdução de pseudo-medidas adicionais. Essas pseudo-medidas adicionais seriam tensões e ângulos em barras internas vizinhas às barras de fronteira de cada sub-sistema e medidas de fluxo de potência em linhas selecionadas associadas a essas barras internas. Isso implica na transmissão ao nível central, de dois vetores adicionais:

\mathbf{z}_{nu} : constituído de todas as medições de fluxo de potência ativa e reativa em linhas internas selecionadas de cada sub-sistema, conectadas às barras de fronteira;

$\hat{\mathbf{x}}_{nc}$: constituído das tensões complexas estimadas nas barras relacionadas com o vetor \mathbf{z}_{nu} .

3.8 - Considerações Finais:

Neste capítulo foi apresentado os três algoritmos em estudo, tal como seus respectivos autores os propuzeram. Vale salientar que todos eles possuem dois níveis hierárquicos sendo o primeiro nível, representado pelos níveis locais, tratado da mesma forma. As diferenças fundamentais entre os algoritmos ocorrem no nível de coordenação. O Algoritmo de Van Cutsem é o mais completo dos três. Ele estima os ângulos de coordenação e re-estima os estados

em todas as barras de fronteira do sub-sistema de interligação. Para tanto, o autor se utiliza das medidas de fluxo ativo e reativo nas linhas de intercâmbio e dos estados estimados nos níveis locais nas barras de fronteira, tratados como "pseudo-medidas". Lo e seus colaboradores desenvolveram um algoritmo desacoplado em que apenas as medidas de fluxo ativo são utilizadas e apenas os ângulos de coordenação são estimados. Kurzyn estima os ângulos de coordenação indiretamente. Seu algoritmo estima, na verdade, as aberturas angulares das linhas de intercâmbio e através de relações trigonométricas, calcula os ângulos de coordenação. Ele se utiliza de todas as telemedidas disponíveis (ativas e/ou reativas).

É importante ressaltar ainda que estes algoritmos permitem o uso de qualquer estimador de estado nos níveis locais, dando total independência aos sub-sistemas.

CAPÍTULO 4

PROCESSAMENTO DE ERROS GROSSEIROS

4.1 - Introdução:

É praticamente inevitável que as telemidas enviadas ao Centro de Controle do Sistema Elétrico sejam portadoras de ruídos e que algumas delas possivelmente, contenham erros grosseiros. Um algoritmo de Estimação de Estado é projetado para "filtrar" o ruído aleatório do qual as medidas são portadoras e detectar, identificar e eliminar as telemidas portadoras de erros grosseiros.

Estudos visando a detecção e a identificação de erros grosseiros começaram a ser efetuados ainda no início da década de 70 por inúmeros autores [15],[16]. Em 1975, Handschin, Schwepr e outros [17] apresentaram um resumo dos conhecimentos adquiridos até então, propondo inclusive, um método para a identificação de múltiplas medidas errôneas.

O caso mais simples de processamento de erros grosseiros é o da ocorrência de uma só medida errônea. A detecção da presença dessa medida é feita por meio de testes estatísticos. O processo de identificação mais frequentemente utilizado classifica como errônea a medida cujo resíduo normalizado seja o de maior magnitude.

As situações mais realistas e abrangentes não são entretanto, as relativas a Erros Grosseiros Simples; ao contrário, dizem respeito a ocorrência de múltiplas medidas errôneas, interativas ou não. No caso de erros

grosseiros múltiplos não interativos, o emprego de uma generalização do método descrito no parágrafo anterior pode ser suficiente para identificar corretamente as medidas portadoras de erros grosseiros. No caso de erros grosseiros múltiplos interativos, Milli, Van Cutsem e outros [18] mostraram que essa generalização conduz a resultados insatisfatórios. Isso ocorre porque os resíduos de estimação são combinações lineares dos erros de medição; por conseguinte, não há necessariamente uma correspondência biunívoca entre os resíduos normalizados de maior magnitude e os maiores erros de medição.

Neste trabalho, nos preocuparemos apenas com o processamento de erros grosseiros múltiplos não-interativos.

4.2 - A Detecção de Erros Grosseiros em Estimadores de Estado Integrados:

A detecção de erros grosseiros pode ser vista como um problema de teste de hipóteses, com duas hipóteses H_0 e H_1 onde

H_0 : não existem erros grosseiros;

H_1 : H_0 não é verdadeira.

Existem vários métodos para testar essas hipóteses. O mais utilizado é o Teste $J(\hat{\mathbf{x}})$ [17].

O valor de $J(\hat{\mathbf{x}})$, calculado após a estimação ter convergido, deverá ficar abaixo de certos limites, se não existirem erros grosseiros entre as medidas. Caso contrário, o valor de $J(\hat{\mathbf{x}})$ será maior que o esperado. A questão é: qual o valor de $J(\hat{\mathbf{x}})$ que indica a presença de erros grosseiros?

Considerando a hipótese de que os erros de medição \mathbf{v} são variáveis aleatórias normalmente distribuídas, pode ser demonstrado que $J(\hat{\mathbf{x}})$ possui uma distribuição do tipo qui-quadrado com g graus de liberdade, denotada por

χ_g^2 [17]. No caso dos sistemas elétricos,

$$g = m - (2.n - 1) \quad (4.1)$$

onde m é o número de medidas e n o número de variáveis de estado. No caso de $g > 30$, a distribuição χ_g^2 pode ser aproximada por uma distribuição normal com média g e variância $2g$ [17].

Uma medida é considerada espúrea, isto é, portadora de erro grosseiro, quando contaminada com erros de magnitude pelo menos igual a três desvios padrões do medidor correspondente.

Se for fixado um limiar λ_J para $J(\hat{\mathbf{x}})$ é possível declarar que existem erros grosseiros se $J(\hat{\mathbf{x}}) > \lambda_J$, pode-se propor a seguinte regra de decisão sobre a aceitação da hipótese H_0 :

$$\begin{aligned} \text{Aceita-se } H_0 & \text{ se } J(\hat{\mathbf{x}}) \leq \lambda_J \\ \text{Rejeita-se } H_0 & \text{ se } J(\hat{\mathbf{x}}) > \lambda_J. \end{aligned}$$

Associado ao problema da definição do limiar está a questão de se quantificar a probabilidade de aceitarmos H_1 (rejeitarmos H_0) quando H_0 é verdadeira. A esta probabilidade chamamos de "probabilidade de falso alarme" [18] e a designamos pela letra α . Se escolhermos λ_J muito pequeno, poderemos ter muitos falsos alarmes, isto é, o teste indicará a presença de erros grosseiros que de fato não existem. Se escolhermos λ_J muito grande, poderemos ter todas medidas declaradas como boas, quando de fato, existem erros grosseiros.

A definição formal de λ_J pode ser realizada através da seguinte relação:

$$P (J(\hat{\mathbf{x}}) > \lambda_J \mid J(\hat{\mathbf{x}}) \text{ é } \chi_g^2) = \alpha \quad (4.2)$$

onde $P(a/b)$ é a probabilidade condicional de ocorrência do evento a dado que o evento b é verdadeiro.

A probabilidade α é normalmente pré-fixada como sendo 1%, 2%, 5% ou 10% [18]. Se a aplicação de (4.2) concluir pela aceitação da hipótese H_0 , o processo está encerrado e a estimação de estado completada. Se H_1 for a hipótese aceita, o processo deve continuar. Há erros grosseiros presentes que devem ser identificados e eliminados.

4.3 - A Identificação e a Eliminação de Erros Grosseiros em Estimadores de Estado Integrados:

4.3.1 - Métodos de Identificação de erros grosseiros:

O problema da identificação de erros grosseiros consiste em se determinar qual das medidas é errônea. Existem vários algoritmos destinados à identificação e à eliminação de erros grosseiros múltiplos [22]. Os algoritmos mais simples, eliminam uma única medida por vez. Quando houver mais de uma medida errônea, esses algoritmos identificam e eliminam uma delas, retomando em seguida, a estimação de estado, utilizando as demais medidas. Havendo outras medidas errôneas, o teste de detecção será positivo e novamente se procederá à identificação e à eliminação de uma nova medida. O processo será repetido até que todas as medidas incorretas tenham sido eliminadas. Este processo é o utilizado neste trabalho.

O método mais difundido para a identificação de erros grosseiros baseia-se num teste de hipótese de normalidade aplicada sobre os resíduos r_i normalizados [17], que será descrito a seguir .

Seja o valor dos resíduos de estimação

$$\mathbf{r} = \mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}) \quad (4.3)$$

e seja

$\Sigma_{\mathbf{r}}$ a matriz das covariâncias dos resíduos de estimação e Σ_{ii} o seu i -ésimo elemento diagonal e

$$r_i = z_i - h_i(\hat{\mathbf{x}}) \quad (4.4)$$

o resíduo da medida i . Então,

$$r_{iN} = \frac{r_i}{(\Sigma_{ii})^{-1/2}} \quad (4.5)$$

é o resíduo normalizado correspondente e

$$r_{iP} = r_i \cdot (R_{ii})^{-1/2} \quad (4.6)$$

é definido como o resíduo ponderado para cada medida i .

De [17] sabemos que

$$\Sigma_{\mathbf{r}} = \mathbf{R} - \mathbf{H} \cdot \Sigma_{\mathbf{x}} \cdot \mathbf{H}^T \quad (4.7)$$

onde

$$\Sigma_{\mathbf{x}} = [\mathbf{H}^T \cdot \mathbf{R}^{-1} \cdot \mathbf{H}]^{-1} \quad (4.8)$$

Existem na literatura, diversas regras de identificação das medidas portadoras de erros grosseiros [22]. A metodologia utilizada neste trabalho é descrita a seguir.

Tendo sido detectada a presença de erros grosseiros e calculado todos os resíduos normalizados, a regra de identificação utilizada neste trabalho diz que a medida ao qual corresponda o maior resíduo normalizado (em módulo) é a medida portadora de erro grosseiro [17]. Alguns autores utilizam os resíduos ponderados [13]. Neste trabalho, foi utilizado ambos. Uma vez identificada a medida errônea, ela é eliminada e recomeça-se a estimação, aplicando-se novamente todas os testes de detecção e identificação, até que todas as medidas incorretas tenham sido eliminadas.

Para obtermos $\underline{\Sigma}_r$ é necessário inverter-se a matriz $[H^T \cdot R^{-1} \cdot H]$, denominada de matriz ganho G ou ainda, como matriz de informação A.. Como a matriz G é simétrica e esparsa, ela é posta na forma LDL^T ou LL^T . Broussole [19] mostra que o cálculo explícito da inversa $\underline{\Sigma}_x$ não é necessário. Os únicos elementos indispensáveis são os utilizados no cálculo de um elemento da diagonal principal de $\underline{\Sigma}_x$, isto é, os elementos correspondentes aos elementos não nulos da matriz G, antes da inversão. Para tanto, Broussole utiliza o método da "matriz esparsa inversa", desenvolvido para o cálculo de correntes de curto-circuito [23].

4.3.2 - Técnica da Matriz Esparsa Inversa para o Cálculo dos Elementos Diagonais de $\underline{\Sigma}_x$ [19]:

Dado uma matriz esparsa e simétrica A cuja inversa Z precisamos calcular:

$$A \cdot Z = I \quad (4.9)$$

onde I é a matriz identidade. A é fatorada na forma LDL^T de modo que

$$L.D.L^T.Z = I \quad (4.10)$$

A expressão (4.10) pode ser re-escrita como

$$L^T.Z = D^{-1}.L^{-1}$$

Fazendo

$$T = I - L^T \quad (4.11)$$

temos que

$$Z = D^{-1}.L^{-1} + T.Z \quad (4.12)$$

Como A é simétrica, Z também o será. Portanto, basta calcularmos o triângulo superior de Z . L é uma matriz triangular inferior com elementos diagonais unitários. Sua inversa terá as mesmas propriedades. Então, os elementos diagonais de $D^{-1}.L^{-1}$ são iguais aos de D^{-1} e

$$Z_s = D^{-1} + T.Z \quad (4.13)$$

Devido a forma peculiar de T (matriz triangular superior com diagonal nula) o cálculo de cada elemento de uma linha k de Z_s requer apenas elementos das próximas linhas de Z_s . Desse modo, Z_s pode ser calculada utilizando-se a fórmula recursiva [19]

$$z_{i,j} = \sum_k t_{i,k} \cdot z_{k,j} \quad \begin{array}{l} j > i \\ k > i \end{array} \quad (4.14)$$

$$z_{i,i} = (d_{i,i})^{-1} + \sum_k t_{i,k} \cdot z_{k,i} \quad k > i \quad (4.15)$$

A eliminação de uma medida errônea do vetor z implica em alterá-lo, e conseqüentemente exigirá a reconstrução e uma nova fatoração da matriz G , utilizada para calcular x iterativamente.

4.3.3 - Recuperação de medidas portadoras de erros grosseiros:

Uma alternativa à eliminação de medidas portadoras de erros grosseiros é recuperá-las, isto é, substituí-las por valores estimados a partir de medidas redundantes com as medidas espúrias. Evita-se assim, produzir alterações em G . O método da recuperação de medidas consiste em gerar pseudo-medidas para substituírem as medidas z_i portadoras de erros grosseiros através da seguinte equação [26],[27]

$$z_i^N = z_i - \frac{R_{ii} \cdot r_i}{(\Sigma_{ii})_r} \quad (4.16)$$

onde z_i^N é a pseudo-medida desejada.

4.4 - O Processamento de Erros Grosseiros em Estimadores Hierárquicos:

4.4.1 - O Processamento de Erros Grosseiros nos Algoritmos de Van Cutsem e Lo:

O processamento de erros grosseiros em Estimadores Hierárquicos é

similar ao caso integrado. Ele consiste em duas etapas principais. A primeira etapa é detectar e identificar todas as medidas errôneas ao fim da estimação local em cada sub-sistema. Neste trabalho, o teste $J_1(\hat{\mathbf{x}})$ é utilizado para a detecção, sendo a identificação baseada no uso dos resíduos ponderados ou normalizados. As medidas errôneas locais são recuperadas e submetidas a uma nova estimação. Ao final do processo, $\hat{\mathbf{x}}_1$ está depurado e pode ser transmitido ao nível central.

A segunda etapa ocorre no nível central. A detecção-identificação é feita pelo teste $J(\hat{\mathbf{x}})$ -teste $\hat{\mathbf{r}}_p$. Os valores característicos de $J_s(\hat{\mathbf{x}})$ e \mathbf{r}_p dizem respeito ao vetor \mathbf{z}_u , das medidas de fluxo de potência, utilizadas no nível central. No caso do Algoritmo de Van Cutsem, podemos considerar que o vetor $\hat{\mathbf{x}}_c$ esteja isento de erros grosseiros, já que ele foi depurado nos níveis locais e, sendo constituído de dados digitais, os erros de transmissão são bastante improváveis.

4.4.2 - O Processamento de Erros Grosseiros no Algoritmo de Kurzyn:

Kurzyn [7], em seu algoritmo, propõe um método próprio para o processamento de erros grosseiros. Seu algoritmo estima a abertura angular de cada linha de intercâmbio individualmente. Se aplicássemos o teste $J(\hat{\mathbf{x}})$ para cada linha, teríamos apenas um grau de liberdade se apenas duas medidas de fluxo fossem disponíveis:

$$g = m - 2.n + 1 = 2 - 2 + 1 = 1$$

Isso implica em grandes dificuldades quando erros grosseiros estão presentes nas medidas de fluxo das linha de intercâmbio. O método proposto por Kurzyn é sub-dividido em seis passos:

- (1) Os ângulos de fase estimados entre dois sub-sistemas vizinhos, calculados segundo a equação (3.62) são ordenados em uma lista, de acordo com suas magnitudes:
- (2) Ângulos cujos valores excedam um determinado critério de normalidade, correspondem a linhas de intercâmbio suspeitas de possuírem erros grosseiros. Esses valores suspeitos estão situados no início ou no final da lista ordenada dos ângulos de coordenação;
- (3) Re-estimam-se as aberturas angulares das linhas suspeitas usando-se a equação (3.61) para cada uma das medidas de fluxo de potência;
- (4) Com os ângulos calculados em (3), o procedimento expresso na equação (3.62) é repetido;
- (5) Todos os ângulos de coordenação são reordenados novamente;
- (6) Ângulos excessivamente grandes ou pequenos correspondem às medidas portadoras de erros grosseiros.

Esse processo de identificação e eliminação de erros grosseiros apresenta alguns problemas de ordem prática. Qual seria esse critério de normalidade para o qual as telemedidas provenientes de uma determinada linha de intercâmbio sejam consideradas suspeitas? Neste trabalho, foi utilizado o seguinte critério: são consideradas suspeitas de possuírem medidas portadoras de erros grosseiros as linhas de intercâmbio cujos ângulos de coordenação possuem um valor 25% superior/inferior ao valor imediatamente acima/abaixo na lista ordenada de todos os ângulos de coordenação estimados. Este critério é bastante frágil. O teste poderia ser feito com os dois ou três valores iniciais ou finais da lista, pois as duas primeiras ou últimas linhas da lista poderiam conter medidas portadoras de erros grosseiros. Se houverem apenas duas linhas de intercâmbio em uma determinada interligação, como saber qual delas possui uma ou mais medidas portadoras de erros grosseiros? Neste caso, a identificação não é possível. Testes demonstraram também que a recuperação das

medidas portadoras de erros grosseiros não traz qualquer ganho na precisão ou na qualidade dos resultados sendo inócua sua realização.

4.5 - Considerações Finais:

Este capítulo abordou as técnicas de detecção, identificação e eliminação de medidas portadoras de erros grosseiros utilizadas neste trabalho. Essas técnicas, desenvolvidas para estimadores de estado integrados, adaptam-se facilmente aos estimadores hierárquicos. A detecção é feita pelo teste $J(\hat{x})$ e a identificação pelo critério do maior resíduo normalizado ou ponderado. O Algoritmo de Kurzyn apresenta alguns problemas. Neste trabalho, apenas implementou-se o que o autor propôs. Não houve a preocupação de testarem-se novos métodos de processamento de erros grosseiros para seu algoritmo, ou mesmo, para os demais algoritmos implementados.

Existem outros métodos para o processamento de erros grosseiros não descritos neste trabalho que poderiam ser adaptados aos estimadores hierárquicos [23]. No último capítulo deste trabalho, este assunto é abordado mais detalhadamente.

CAPÍTULO 5

A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

5.1 - Introdução:

Este capítulo apresenta os sistemas testes utilizados neste trabalho e tece algumas considerações a cerca da implementação computacional dos três algoritmos selecionados.

É através da simulação computacional que um determinado algoritmo pode ser validado e também que pode ser verificado, do ponto de vista prático, se ele é viável ou não. Este trabalho lida com programas destinados ao uso na operação em tempo real de sistemas elétricos. O tempo de execução, portanto, é um fator limitante para o emprego de determinado algoritmo. Além disso, é necessário saber se o algoritmo implementado fornece dados confiáveis e precisos e se ele é eficiente computacionalmente ou não. Para tanto, a escolha dos sistemas testes é fundamental. Os sistemas devem ser os mais genéricos possíveis, evitando-se particularidades que possam afetar os resultados de alguma forma. Testes com sistemas elétricos reais ou realísticos dão um sentido mais prático ao trabalho. Neste trabalho, foram escolhidos dois sistemas testes: o bem conhecido IEEE 30 barras e um sistema realístico, construído a partir do Sistema Interligado do Sul-Sudeste do Brasil [21]. Os diagramas unifilares dos sistemas utilizados, bem como suas condições de operação, planos de medição, parâmetros e características de cada sub-sistema são apresentados nos Apêndices A e B deste trabalho.

5.2 - Os sistemas simulados:

A estimação hierárquica implica na existência de um grande sistema elétrico que possa ser particionado em vários sub-sistemas ou então na existência de vários sub-sistemas operando interligadamente, formando um grande sistema elétrico. Por motivos de ordem prática, optou-se por escolher dois sistemas elétricos que pudessem ser subdivididos em vários sub-sistemas a fim de validar os algoritmos implementados.

O primeiro sistema, o IEEE - 30 barras, que doravante será denominado como Sistema I, foi a base para os testes durante a implementação dos três algoritmos. Devido ao seu tamanho, ele foi subdividido em apenas três sub-sistemas, como pode ser visto na figura A.1 do Apêndice A. As telemidas foram alocadas de modo a garantir a observabilidade de cada sub-sistema.

O segundo sub-sistema, doravante designado como Sistema II, é constituído de 91 barras e 136 linhas e foi construído a partir do sistema interligado de 230kV/500kV do Sul-Sudeste do Brasil (figura A.2). Ele foi subdividido em cinco sub-sistemas. Da mesma forma, as telemidas foram alocadas de modo a garantir a observabilidade de cada um dos sub-sistemas.

Não houve qualquer critério que orientasse a divisão dos sistemas, a não ser o de que cada sub-sistema fosse o mais malhado possível, evitando-se assim sub-sistemas radiais. Não houve também escolha premeditada de quais seriam as linhas de intercâmbio. Dessa forma, transformadores ou linhas curtas acabaram assumindo o papel de linhas de intercâmbio em vários sub-sistemas. As barras que compõem cada sub-sistema, bem como as linhas de intercâmbio e suas características encontram-se no Apêndice B.

As condições de operação do Sistema I são as mesmas sugeridas pelos proponentes deste sistema teste [24]. As do Sistema II procuram representar uma situação real.

5.3 - Os Algoritmos:

5.3.1 - Considerações sobre os níveis locais:

Todos os algoritmos simulados possuem dois níveis hierárquicos. O primeiro nível é o nível local e corresponde à estimação de estado em cada sub-sistema. Neste nível, utilizou-se um estimador de estado convencional, baseado no critério dos mínimos quadrados ponderados (WLS) já existente, cujo programa computacional será referido como SESPAP. SESPAP é um programa escrito em FORTRAN IV-H e utiliza técnicas de esparsidade [25]. A matriz ganho G (também conhecida como matriz de informação) é ordenada simbolicamente pelo método do mínimo grau (Tinney II). As rotinas de ordenação simbólica, fatoração simbólica, fatoração numérica e substituição reversa utilizadas por SESPAP são descritas em [25]. A subrotina INSZRS, que insere zeros nos locais onde haverá enchimento na matriz G devido à fatoração foi desenvolvida por Simões Costa e Salgado [28]. Um fluxograma simplificado do programa SESPAP pode ser visto na figura 5.1.

Com o objetivo de simplificar o trabalho de particionamento dos sistemas teste em sub-sistemas, desenvolveu-se um programa denominado GERSUB. A partir de informações sobre as barras que compõem cada sub-sistema, o programa GERSUB procede a subdivisão do sistema global fornecido em sub-sistemas, classificando e separando os dados relativos a cada um deles e os dados relativos à área de interligação. Os dados de saída do GERSUB são em seguida utilizados pelo programa SESPAP e pelos estimadores hierárquicos. As medidas de fluxo de potência ativa e reativa nas linhas de intercâmbio são transformadas em medidas de injeções nas barras de fronteira em que cada linha está conectada. Neste particular, duas situações devem ser consideradas e previstas pelo programa GERSUB:

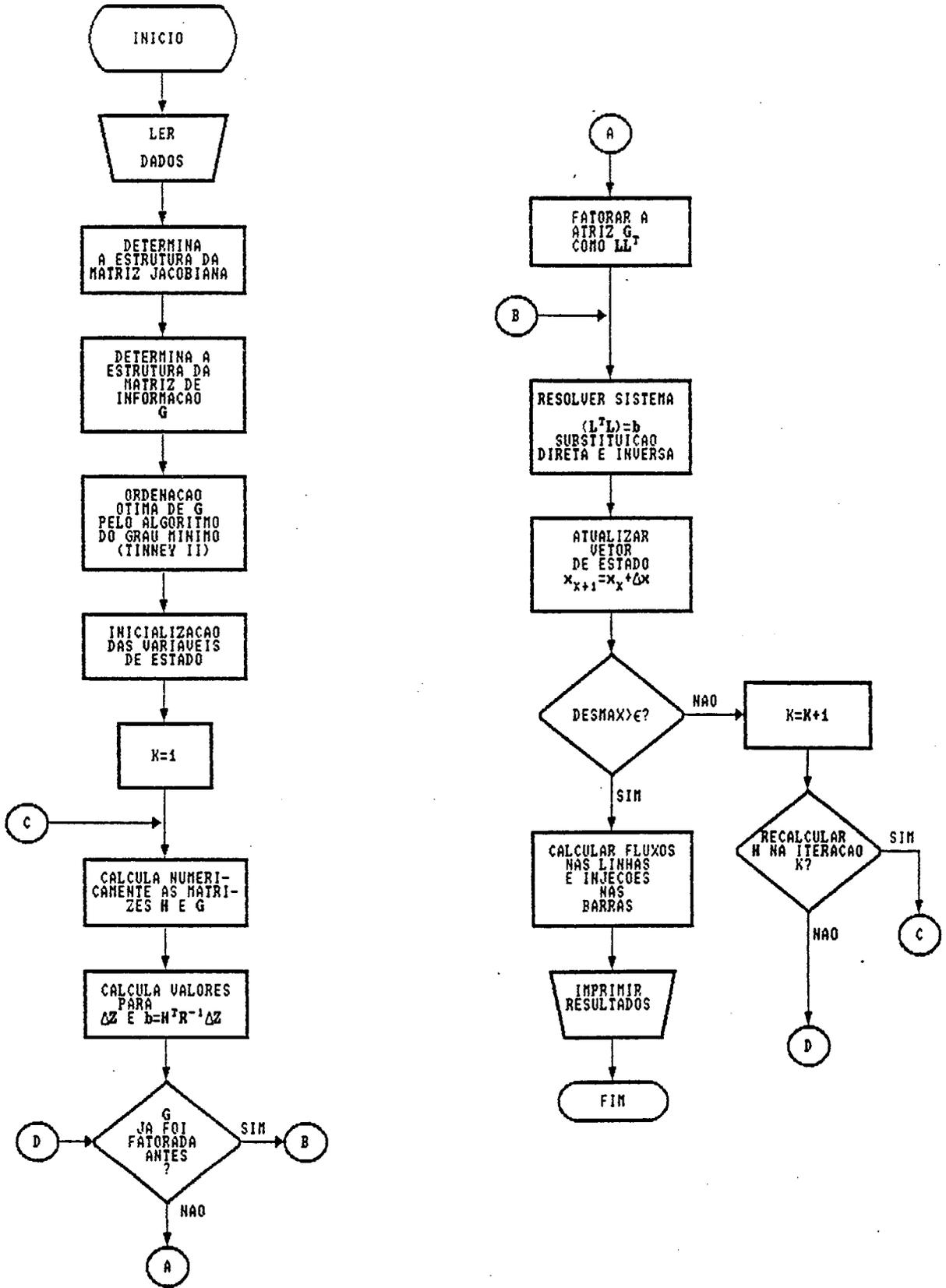


FIGURA 5.1 - FLUXOGRAMA DO PROGRAMA SESPAR

(1) - já existem medidas de injeção ativa e reativa na barra de fronteira a que a linha está conectada: as medidas de fluxo ativo e reativo são adicionadas às medidas de injeções, segundo as convenções de soma de potências determinadas pela Lei de Kirchhoff;

(2) - não existem medidas de injeção na barra de fronteira ao qual a linha está conectada. Nesse caso, os valores de injeções de potência devido ao fluxo de intercâmbio não são constituídos em medidas de injeção. Se isto fosse feito, estariam sendo introduzidos erros grosseiros já que o valor das potências ativa e reativa realmente injetadas na barra não é conhecido.

Algumas modificações tiveram que ser feitas no programa SESPAP. Informações adicionais sobre quais barras dos sub-sistemas são barras de fronteira devem ser fornecidas ao programa, já que o estado estimado nessas barras deve ser fornecido ao nível central de todos os algoritmos aqui implementados. Também foi acrescentado ao programa uma rotina para o cálculo dos elementos diagonais da matriz de covariância dos erros de estimação. Estes elementos são utilizados como fator de ponderação das pseudo-medidas correspondentes ao estado estimado nas barras de fronteira de cada sub-sistema exigidas pelo Algoritmo de Van Cutsem. O método da matriz esparsa inversa sugerido por Broussolle em [19] e revisto na Seção 4.3 foi utilizado. Algumas alterações tiveram que ser feitas em função de que em [19], a matriz G é suposta armazenada na forma LDL^T , ao passo que as rotinas acessadas por SESPAP, a armazenam na forma LL^T .

Seja

$$G = H^T \cdot R^{-1} \cdot H \quad (5.1)$$

armazenada na forma LL^T :

$$G = LL^T \quad (5.2)$$

Seja ainda,

$$G \cdot \underline{\Sigma}_x = | \quad (5.3)$$

onde $|$ é a matriz identidade e

$$D_L = \text{diag}(l_{11}, l_{22}, \dots, l_{nn}) \quad (5.4)$$

Então,

$$L \cdot L^T \cdot \underline{\Sigma}_x = | \quad (5.5)$$

Fazendo

$$T = D_L - L^T \quad (5.6)$$

implicando em que

$$L^T = D_L - T \quad (5.7)$$

Substituindo (5.7) em (5.5) e rearranjando, obtém-se que

$$\underline{\Sigma}_x = D_L^{-1} \cdot L^{-1} + D_L^{-1} \cdot T \cdot \underline{\Sigma}_x \quad (5.8)$$

Como G é simétrica, $\underline{\Sigma}_x$ também o será. Portanto, é suficiente calcularmos a parte superior de $\underline{\Sigma}_x$, $\underline{\Sigma}_x^s$. Vale notar ainda que

$$\text{diag}(D_L^{-1} \cdot L^{-1}) = (D_L^{-1})^2 \quad (5.9)$$

Logo,

$$\underline{\Sigma}_x^s = (D_L^{-1})^2 + D_L^{-1} \cdot T \cdot \underline{\Sigma}_x \quad (5.10)$$

Devido à forma peculiar de T, o cálculo dos elementos da linha k de $\underline{\Sigma}_x^s$ requer apenas a utilização dos elementos das linhas acima da linha k, segundo a equação

$$[\underline{\Sigma}_x^s]_{i,j} = d_{i,i}^{-1} \cdot \sum_k (t_{i,k} \cdot [\underline{\Sigma}_x]_{k,j}) \quad \text{para } j > i \quad (5.11)$$

$k > i$

$$[\underline{\Sigma}_x^s]_{k,i} = (d_{i,i}^{-1})^2 + (d_{i,i}^{-1}) \cdot \sum_k (t_{i,k} \cdot [\underline{\Sigma}_x]_{k,i}) \quad \text{para } k > i \quad (5.12)$$

São calculados apenas os elementos $[\underline{\Sigma}_x]_{i,j}$ correspondentes a elementos $L_{i,j}$ diferentes de zero. Apenas os elementos diagonais de $\underline{\Sigma}_x$ correspondentes às barras de fronteira são calculados e enviados ao nível central.

Escolhido o plano de medição para o sistema integrado, as telemedidas são geradas pelo programa INPNML. Utilizando-se da saída de um fluxo de carga e de uma rotina de geração de números aleatórios, o programa cria um conjunto de medidas portadoras de ruídos, simulando uma situação real. O programa GERSUB é quem separa as telemedidas referentes a cada sub-sistema e as relativas às linhas de intercâmbio, colocando-as em arquivos separados, juntamente com os dados do sub-sistema correspondente. Desta forma, os dados dos sub-sistemas estão prontos para serem lidos pelo programa SESPAP e pelo programa que efetua a função de nível central do estimador hierárquico

escolhido. O diagrama de blocos mostrando as etapas do processo de simulação pode ser visto na figura 5.2.

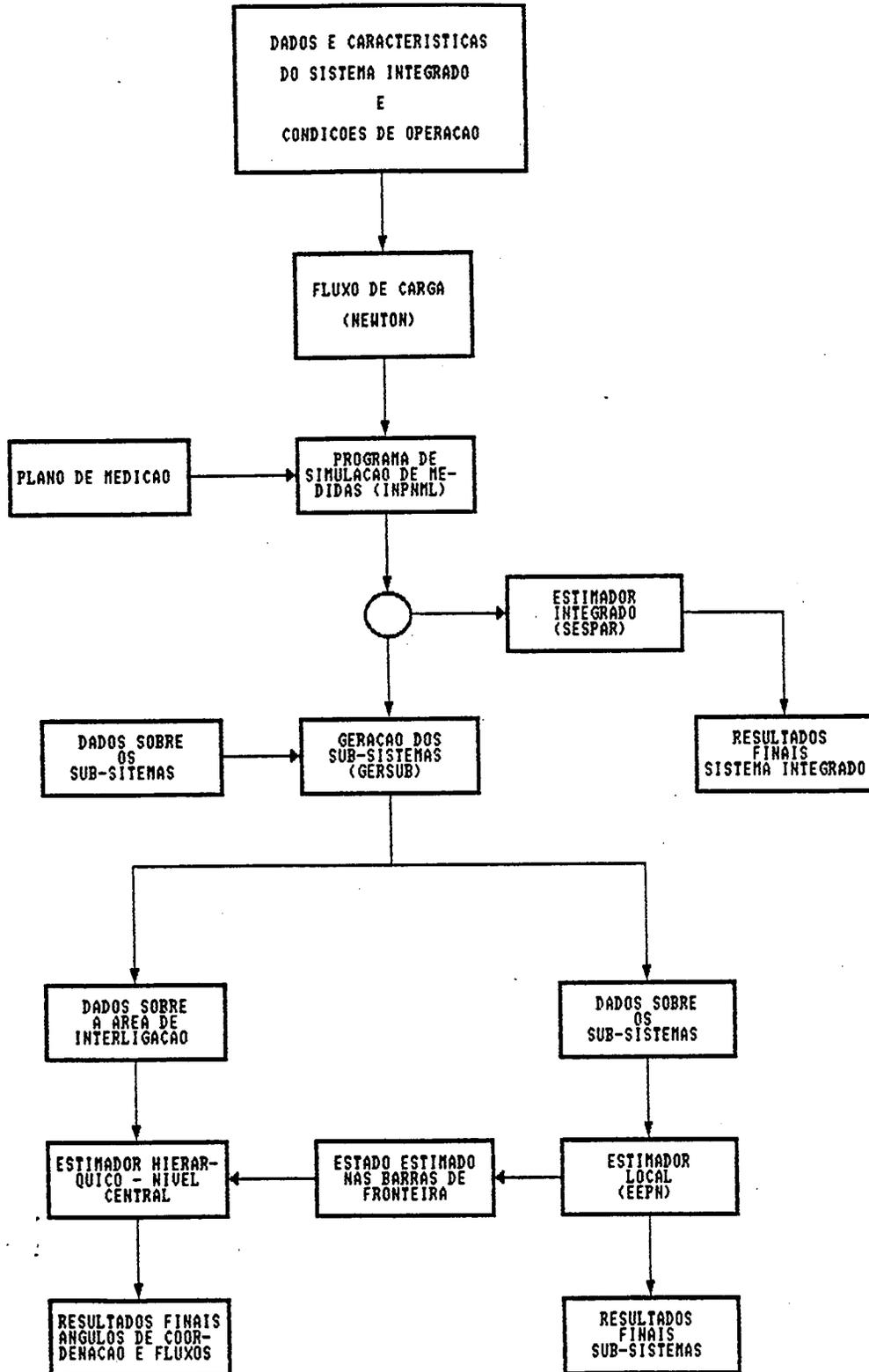


FIGURA 5.2 - DIAGRAMA GERAL

5.3.2 - Considerações sobre o Algoritmo de Van Cutsem [4]:

Na implementação deste algoritmo, foi utilizado o compilador FORTRAN VS/2. O programa, que corresponde ao nível central de um estimador hierárquico, foi denominado de EESNH1 e seu fluxograma pode ser visto na figura 5.3. Em sua elaboração, foram utilizadas técnicas de armazenamento compacto, explorando ao máximo a esparsidade das matrizes H e G. Na resolução do sistema de equações lineares foram utilizadas as mesmas rotinas de [25], utilizadas no programa SESPAP.

A fim de simplificar a construção de H, garantindo uma maior eficiência em seu armazenamento, facilitando a construção de G e portando, tornando o programa EESNH1 muito mais rápido, adotou-se a exigência de que sejam realizadas tanto medidas de fluxo ativo quanto de fluxo reativo em ambas as extremidades de todas as linhas de intercâmbio. Essa exigência foi considerada bastante razoável do ponto de vista prático, uma vez que os programas aqui desenvolvidos destinam-se a utilização na agregação de sub-sistemas, onde cada um deles constitui-se numa empresa diferente. Dada a necessidade de as empresas monitorarem independentemente os intercâmbios de potência, para verificações do cumprimento dos contratos de intercâmbio, é razoável se supor que cada empresa realizará suas próprias medições.

Relembrando, a matriz Jacobiana para o método de Van Cutsem é dada por

$$H = \frac{\partial h_s(u, x_c)}{\partial x_s} \quad (5.13)$$

onde h_s é uma função não-linear que relaciona os vetores u e x_c com o vetor de telemidas z_s . Nesse caso, como apenas telemidas de fluxo são

disponíveis, h representa os fluxos de potência ativa e reativa nas linhas de

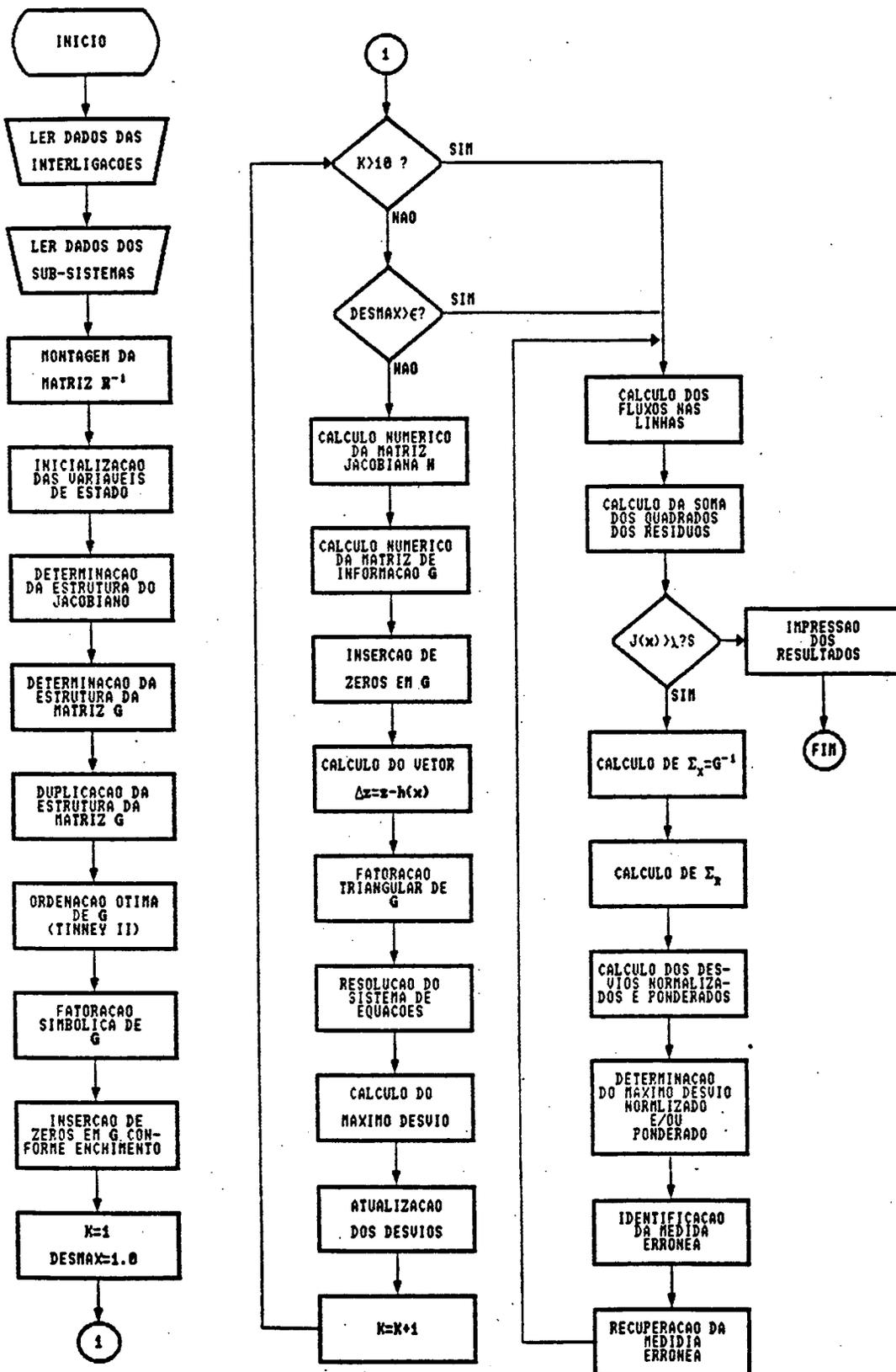


FIGURA 5.3 - FLUXOGRAMA DO PROGRAMA EESNH1

intercâmbio. Existe ainda a parte de h que relaciona x_c com \hat{x}_c que é linear, sendo sua derivada em relação a x_s dada pela matriz identidade. Desta forma, h_s pode ser particionada como

$$h_s = [h_u^T, x_c^T]^T \quad (5.14)$$

onde,

$$h_u(u, x_c) = [T(u, x_c)^T, U(u, x_c)^T]^T \quad (5.15)$$

Os sub-vetores T e U são os fluxos ativos e reativos nas linhas de intercâmbio.

Seja a linha l conectando as barras r e s , pertencentes aos sub-sistemas i e j respectivamente, conforme a figura 5.3:

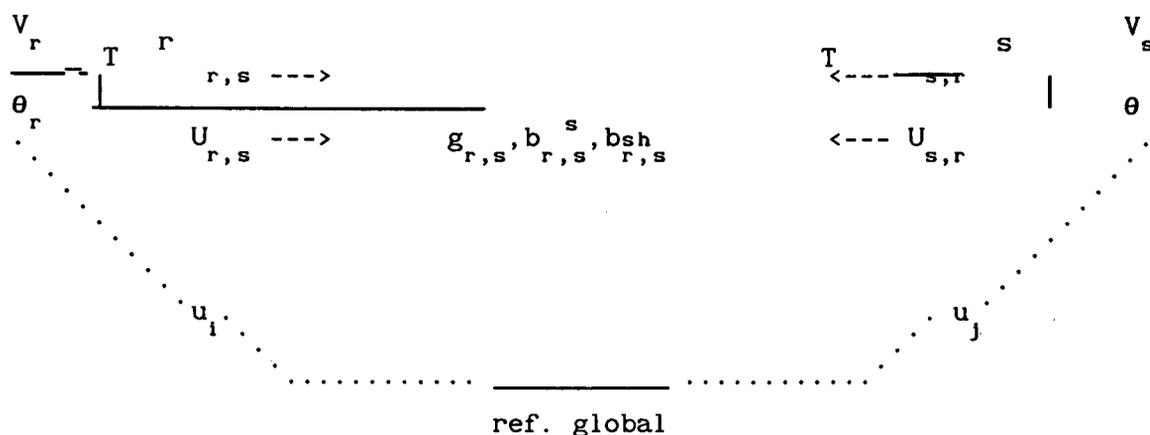


FIGURA 5.4 - LINHA DE INTERCAMBIO ENTRE DOIS SUB-SISTEMAS

Segundo [21], o fluxo ativo $T_{r,s}$ em uma linha de transmissão vale

$$T_{r,s} = V_r^2 \cdot g_{rs} - V_r \cdot V_s \cdot g_{rs} \cdot \cos \phi_{rs} - V_r \cdot V_s \cdot b_{rs} \cdot \sin \phi_{rs} \quad (5.16)$$

e o fluxo reativo $U_{r,s}$

$$U_{r,s} = -V_r^2 \cdot (b_{rs} + b_{rs}^{sh}) + V_r \cdot V_s \cdot b_{rs} \cdot \cos \phi_{rs} - V_r \cdot V_s \cdot b_{rs} \cdot \sin \phi_{rs} \quad (5.17)$$

onde

$$\phi_{rs} = \phi_r - \phi_s = (\theta_r + u_i) - (\theta_s + u_j) \quad (5.18)$$

As expressões para $T_{s,r}$ e $U_{s,r}$ são análogas às expressões acima e não precisam ser reescritas.

Ainda com o objetivo de facilitar a construção e otimizar o armazenamento de H, os vetores z_u e \hat{x}_c foram assim particionados:

$$z_u = [M_r^{1T}, M_r^{2T}, \dots, M_r^{iT}, \dots, M_r^{kT}, M_u^{1T}, M_u^{2T}, \dots, M_u^{iT}, \dots, M_u^{kT}]^T \quad (5.19)$$

onde os sub-vetores M_r^i e M_u^i representam as medidas de fluxo ativo e reativo respectivamente nas linhas de intercâmbio que saem do sub-sistema i, medidas na extremidade pertencente a i e k é o número total de sub-sistemas-

Por sua vez, o vetor \hat{x}_c é particionado como

$$\hat{x}_c = [\hat{\theta}_c^T, \hat{V}_c^T]^T \quad (5.20)$$

com

$$\hat{\theta}_c = [\hat{\theta}_c^{1T}, \hat{\theta}_c^{2T}, \dots, \hat{\theta}_c^{iT}, \dots, \hat{\theta}_c^{kT}]^T \quad (5.21)$$

e

$$\hat{V}_c = [\hat{V}_c^{1T}, \hat{V}_c^{2T}, \dots, \hat{V}_c^{1T}, \dots, \hat{V}_c^{kT}]^T \quad (5.22)$$

Considerando o exposto acima, a matriz Jacobiana H, pode ser re-escrita da seguinte forma:

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial T}{\partial u} & \frac{\partial T}{\partial \theta_c} & \frac{\partial T}{\partial v_c} \\ \frac{\partial U}{\partial u} & \frac{\partial U}{\partial \theta_c} & \frac{\partial U}{\partial v_c} \\ 0 & | & 0 \\ 0 & 0 & | \end{bmatrix} \quad (5.23)$$

Estruturalmente, H possui a seguinte forma:

$$H^e = \begin{bmatrix} E_u & E & E \\ E_u & E & E \\ 0 & | & 0 \\ 0 & 0 & | \end{bmatrix} \quad (5.24)$$

onde o superescrito e em H indica que se está fazendo referência à estrutura de uma determinada matriz, isto é, estamos nos referindo ao seu "patern" de não zeros. O símbolo | representa a matriz identidade.

As sub-matrizes E_u representam as derivadas parciais de T e U em relação a u. Sendo m_T e m_u o número total de medidas de fluxo ativo e reativo

respectivamente, sua dimensão é $m_T \times k$ (ou $m_U \times k$, já que está-se assumindo que $m_T = m_U$).

As sub-matrizes E representam as derivadas parciais de T e U em relação a θ_c ou V_c . Sendo n_b o número total de barras de fronteira, sua dimensão é $m_T \times n_b$.

Logo, a dimensão da matriz Jacobiana é $[4.m_T \times (k + 2.n_b - 1)]$, pois a coluna correspondente a u_1 não é considerada ($u_1 = 0$).

Portanto, basta determinar-se a estrutura das sub-matrizes E_u e E que se obtêm a estrutura de H . Como a parte inferior de H é constituída por blocos nulos ou por blocos constituídos pela matriz identidade, a dimensão real de H é $[2.m_T \times (k + 2.n_b - 1)]$.

A estrutura de G é obtida a partir da estrutura de H .

$$G^e = [[H^e]^T \cdot [H^e]] \quad (5.25)$$

Fazendo o produto indicado em (5.25), obtêm-se:

$$G^e = \begin{bmatrix} E_u^T E_u & E_u^T E & E_u^T E \\ E^T E_u & E^T E + | & EE^T \\ E^T E_u & E^T E & E^T E + | \end{bmatrix} \quad (5.26)$$

Pode ser facilmente mostrado que a estrutura da matriz $E^T E$ é a mesma que a da matriz E , o mesmo ocorrendo com $[E^T E + |]$. Têm-se ainda que, estruturalmente, as matrizes $[E^T E_u]$ e E_u são idênticas.

A estrutura da matriz $[E_u^T E_u]$ representa o grafo das interligações entre os sub-sistemas, isto é, se o sub-sistema i está interligado com o sub-sistema j , então existe o elemento $[E_u^T E_u]_{i,j}$; caso contrário, esse

elemento é nulo.

Com a introdução dessas simplificações, a estrutura da matriz G fica como:

$$G^e = \begin{bmatrix} E_u^T E_u & E_u^T & E_u^T \\ E_u & E & E^T \\ E_u & E & E \end{bmatrix} \quad (5.27)$$

Como a matriz G é simétrica, apenas seu triângulo inferior é armazenado. Sua dimensão é $\{[(k-1) + 2.m_T] \times [(k-1) + 2.m_T]\}$.

5.3.3 - Considerações sobre o Algoritmo de Lo [11]:

Pode-se dizer que este algoritmo é uma simplificação do Algoritmo de Van Cutsem. O programa foi escrito em FORTRAN VS/2 e denominado de EESNH2. Seu fluxograma pode ser visto na figura 5.5.

Como o algoritmo não utiliza as telemidas de fluxo reativo e o vetor \hat{x}_c , contendo os estados estimados pelos níveis locais em todas as barras de fronteira é tratado como uma constante, as estruturas das matrizes H e G tornam-se bastante simplificada.

Da mesma forma que no algoritmo anterior, o vetor z_u é armazenado de modo que as telemidas estejam dispostas segundo a ordem crescente do número do sub-sistema, isto é,

$$z_u = [M_T^1, M_T^2, \dots, M_T^k]^T \quad (5.28)$$

onde M_T^1 representa todas as telemidas de fluxo ativo nas linhas de

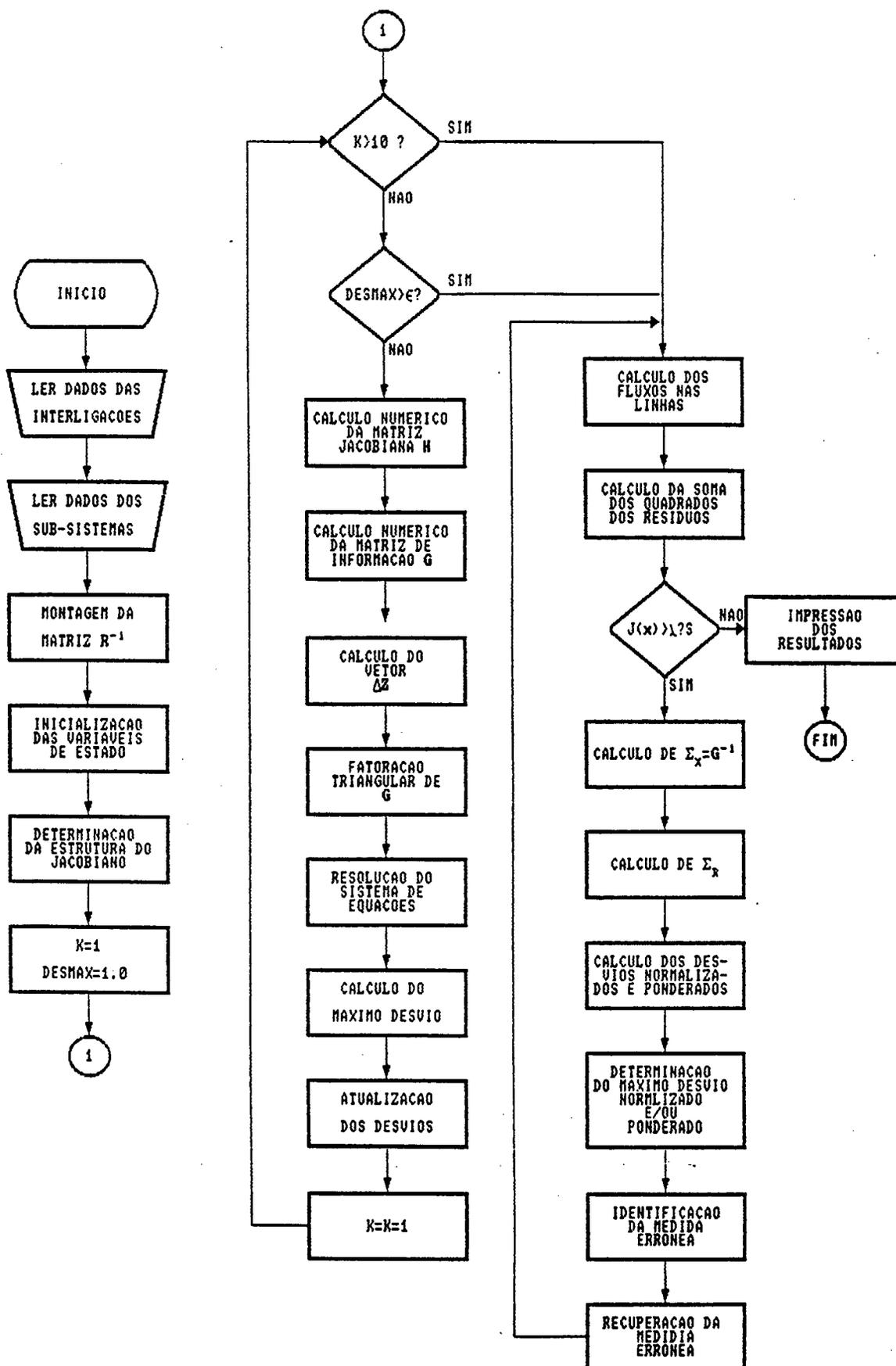


FIGURA 5.5 - FLUXOGRAMA DO PROGRAMA EESNH2

intercâmbio que saem do sub-sistema i.

A estrutura de H fica como:

$$H^e = [E_u] \quad (5.29)$$

e de G,

$$G^e = [E_u^T \cdot E_u] \quad (5.30)$$

A dimensão de H é $\{[k-1] \times m_T\}$ e de G é $[(k-1) \times (k-1)]$.

Como a dimensão de G é pequena e esta matriz nem sempre é esparsa, não foram utilizadas técnicas de esparsidade em seu armazenamento. Apenas H foi armazenada utilizando-se técnicas de esparsidade. O sistema linear $G \cdot \Delta u = H^T \cdot R^{-1} \cdot \Delta z_u$ foi resolvido por eliminação de Gauss, sem que G tenha sido re-ordenada ou fatorada simbolicamente. Os resultados foram armazenados em uma tabela LDL^T. Apenas o triângulo inferior de G é armazenado.

5.3.4 - Considerações sobre o Algoritmo de Kurzyn [7]

O Algoritmo de Kurzyn é bastante simples e sua implementação foi feita utilizando-se o FORTRAN VS/2. O programa denomina-se EESNH3 e seu fluxograma pode ser visto na figura 5.6.

O algoritmo não impõe qualquer restrição ao número ou tipo de telemedidas de fluxo necessárias em cada linha de intercâmbio. Segundo este método, nem todas as linhas de intercâmbio precisam ser monitoradas. A rigor, bastaria apenas uma linha monitorada por interligação.

Outra característica do algoritmo é não possuir uma matriz

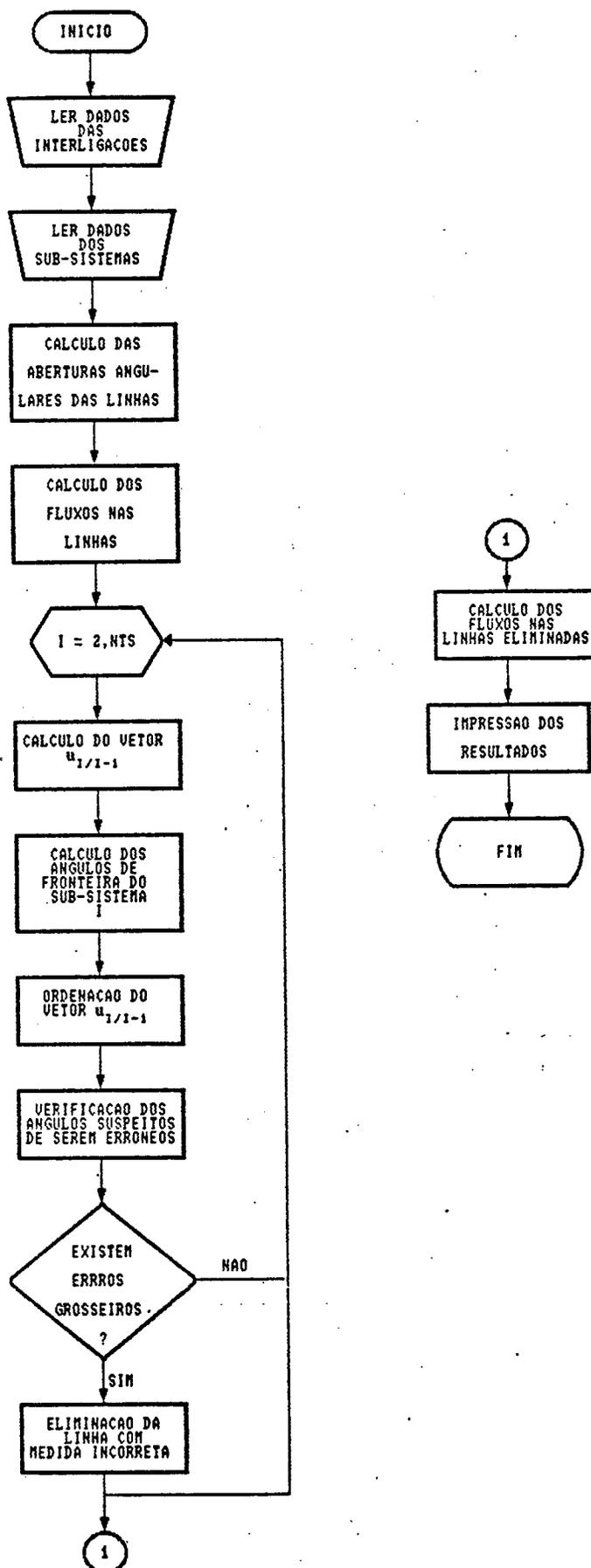


FIGURA 5.6 - FLUXOGRAMA DO PROGRAMA EESNH3

Jacobiana, mas sim, um vetor Jacobiano, de dimensão $[m_1 \times 1]$ onde m_1 é o número de medidas de fluxo na linha de intercâmbio 1. Se existirem t linhas de intercâmbio monitoradas, serão calculados t vetores Jacobianos. Isso provém do fato do algoritmo estimar as aberturas angulares das linhas de intercâmbio monitoradas e só então, calcular os ângulos de coordenação.

5.3.5 - Considerações sobre o processamento de erros grosseiros:

Tanto para o Algoritmo de Van Cutsem, quanto para o Algoritmo de Lo, a detecção e a identificação de medidas portadoras de erros grosseiros foram feitos pelos processos clássicos. Para a detecção, utilizou-se o critério da soma dos quadrados dos resíduos ponderados com uma probabilidade de falso alarme de 2%. Para graus de liberdade superiores a 30, utilizou-se a aproximação da distribuição qui-quadrado pela normal. A identificação foi feita considerando-se errônea a medida a qual corresponda o maior resíduo normalizado ou ponderado. Os programas processam uma medida portadora de erro grosseiro por vez até que todas tenham sido eliminadas. Em ambos os algoritmos foram adotadas técnicas de recuperação de medidas que serão descritas no próximo capítulo.

Para o Algoritmo de Kurzyn, foi implementada a técnica sugerida pelo autor e descrita no item 4.4 do capítulo anterior. Contudo, não se tentou recuperar as medidas portadoras de erros grosseiros. Por motivos que serão descritos no próximo capítulo, optou-se pela eliminação total da linha em que se detectou a presença de uma medida portadora de erro grosseiro, sem que se tenha identificado qual seja ela. Essa identificação consome um tempo computacional extra, sem que haja qualquer ganho na qualidade dos resultados.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS: ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS ALGORITMOS

6.1 - Introdução:

Este capítulo apresenta os resultados obtidos na implementação computacional dos três algoritmos para estimadores de estado hierárquicos. Os resultados obtidos por cada algoritmo são comparados tanto com os obtidos através do estimador integrado quanto entre si. Os resultados preliminares foram obtidos para o sistema exemplo (Sistema I), descrito no Apêndice A. O desempenho dos estimadores hierárquicos foi então testado usando-se o sistema exemplo de 230kV-500kV de 91 barras (Sistema II) que faz parte do sistema de potência interligado do sul-sudeste brasileiro, descrito no Apêndice A.

O computador utilizado foi um IBM 3090, utilizando-se o sistema operacional CMS (Conversational Monitor System) e o compilador FORTRAN VS/2. Os testes visam basicamente validar e avaliar os algoritmos quanto a qualidade, precisão e confiabilidade dos resultados, intercâmbio de informações, requisitos de armazenamento de dados, tempo de execução e velocidade de convergência, e ainda a capacidade de detectar, identificar e recuperar medidas portadoras de erros grosseiros. Os resultados obtidos pelo estimador integrado são a base de comparações entre os algoritmos.

Para todos os testes, os ângulos de coordenação são inicializados em zero. Para o Algoritmo de Van Cutsem, as tensões e ângulos nas barras de fronteira são inicializados com os valores estimados obtidos nos níveis locais.

As grandezas medidas são:

* Níveis Locais: medidas de tensão nas barras, injeções de potência ativa e reativa nas barras e fluxos de potência ativa e reativa nas linhas;

* Nível Central: fluxos de potência ativa e reativa em ambas as extremidades de todas as linhas de intercâmbio. Para os algoritmos de Lo, são utilizadas apenas medidas de fluxo de potência ativa em ambas as extremidades de todas as linhas de intercâmbio.

Um quadro geral dos planos de medição e das telemedidas utilizadas em ambos os sistemas exemplo e em seus respectivos sub-sistemas pode ser encontrado no Apêndice A. As medidas são simuladas conforme descrito no capítulo anterior.

Os critérios de convergência utilizados são os seguintes:

* Algoritmo de Van Cutsem:

$$\| \mathbf{x}_s^{(1)} - \mathbf{x}_s^{(1-1)} \|_{\infty} \leq \varepsilon \quad (6.1)$$

* Algoritmo de Lo:

$$\| \mathbf{u}^{(1)} - \mathbf{u}^{(1-1)} \|_{\infty} \leq \varepsilon \quad (6.2)$$

* Algoritmo de Kurzyn:

$$| \delta^{(1)} - \delta^{(1-1)} | \leq \varepsilon \quad (6.3)$$

onde $\| \cdot \|_{\infty}$ é a norma infinita de um vetor, i é o número da iteração corrente e ε , o fator de tolerância, pré-especificado igual a 0.001 para todos os algoritmos.

6.2 - Intercâmbio de Informações:

Entende-se por intercâmbio de informações toda e qualquer informação transmitida entre os níveis locais e o nível central e vice-versa ou entre os níveis locais entre si. Em nenhum dos três algoritmos implementados existe a necessidade de haver troca de informações entre os sub-sistemas.

Um quadro comparativo, mostrando o intercâmbio de informações entre os níveis locais e o nível central e vice-versa é apresentado na Tabela 6.1.

O Algoritmo de Lo é o que exige o menor fluxo de informações entre os níveis locais e o nível central e vice-versa. Devido ao fato do Algoritmo de Van Cutsem ser completo, ele é o que apresenta o maior fluxo de informações. O Algoritmo de Kurzyn encontra-se em uma posição intermediária.

6.3 - Memória Utilizada:

A memória computacional exigida por um algoritmo hierárquico completo é a soma da memória utilizada pelo nível local e pelo nível central.

Todos os algoritmos implementados utilizam neste trabalho, o mesmo estimador de estado no nível local.

Dentre todos os algoritmos implementados, o Estimador de Estado Integrado é o algoritmo que necessita de maior área de memória para armazenamento das variáveis utilizadas pelo programa computacional. Isto ocorre devido à grande dimensão do problema integrado. Como o Algoritmo de Van Cutsem é completo, isto é, utiliza todas as telemidas disponíveis nas linhas de intercâmbio, seus requisitos de área de memória para armazenamento de dados são os maiores dentre os algoritmos hierárquicos. O Algoritmo de Kurzyn processa uma linha de intercâmbio por vez, o que proporciona uma grande

economia de memória. O Algoritmo de Lo é desacoplado e processa apenas

TABELA 6.1 - INTERCÂMBIO DE INFORMAÇÕES ENTRE OS SUB-SISTEMAS E O NÍVEL CENTRAL E VICE-VERSA

Algoritmo	informações procedentes			
	do nível local para o central		do nível central para o local	
	grandeza	dimensão	grandeza	dimensão
Van Cutsem	\hat{x}_c $\text{diag}(\hat{\Sigma}_i)_j, j \in c$ $z_s = [M_T^T, MU^T]^T$	$2.n_c$ $k.n_c^i, i=1, k$ $2.m_T$	\hat{x}_c \hat{u} \hat{T}, \hat{U}	$2.n_c$ $k-1$ $2.m_T$
Lo	\hat{x}_c $z_u = [M_T]^T$	$2.n_c$ m_T	\hat{u} \hat{T}	$k-1$ m_T
Kurzyn	\hat{x}_c $z_u = [M_T^T, MU^T]^T$	$2.n_c$ $2.m_T$	\hat{u} \hat{T}, \hat{U}	$k-1$ $2.m_T$

onde:

n_c : número total de barras de fronteira;

n_c^i : número de barras de fronteira do sub-sistema i ;

k : número total de sub-sistemas;

m_T : número total de medidas de fluxo ativo nas linhas de intercâmbio.

telemidas de fluxo ativo. Portanto, seus requisitos de memória são menores que os exigidos pelo Algoritmo de Van Cutsem mas superiores aos do Algoritmo de Kurzyn.

A Tabela 6.2 apresenta os requisitos totais de memória requeridos por cada algoritmo em função do número de barras, do número de linhas e do número de telemidas do sistema processado por cada um dos programas. A Tabela apresenta ainda, os requisitos de memória em kbytes para o Sistema II.

TABELA 6.2 - REQUISITOS TOTAIS DE MEMÓRIA DOS PROGRAMAS COMPUTACIONAIS IMPLEMENTADOS

Programa	Memória computacional requerida	Sistema II (kbytes)
SESPAR	$3*N^{**2}+8*N+6*NL+9*(KP+KQ)+4KV+NM$ - var. int.	115.372
	$N^{**2}+8*N+5NM+8*KP+8*KQ+4*KV+3*NL$ - var. reais	103.848
EESNH1	$2*NTLI+132*NTBF+3*NTS+NTS^{**2}$ - var. int.	17.408
	$8*NTLI+75*NTBF+3*NTS$ - var. reais	21.024
EESNH2	$2*NTLI+15*NTBF+3NTS$ - var. int.	2.120
	$3*NTLI+13*NTBF+3*NTS$ - var. reais	3.856
EESNH3	$10*NTLI$ - var. int.	1.280
	$5*NTLI+NTS$ - var. reais	1.328

onde:

* SESPAR é Estimador de Estado utilizado no sistema integrado e nos níveis locais dos algoritmos hierárquicos;

* ESNH1 é o nível central do Estimador Hierárquico segundo o Algoritmo de Van Cutsem;

* EESNH2 é o nível central do Estimador Hierárquico segundo o Algoritmo de Lo;

* EESNH3 é o nível central do Estimador Hierárquico segundo o Algoritmo de Kurzyn;

e,

* N: número de barras;

* NM: número de medidas;

* NL: número de linhas;

* KP, KQ e KV: número de medidas de injeção de potência ativa e reativa e de tensão;

* JMT e JMV: número de medidas de fluxo ativo e reativo;

* NTS: número total de sub-sistemas;

* NTBF: número total de barras de fronteira;

* NTLI: número total de linhas de intercâmbio.

6.4 Tempo de Execução e Convergência:

As tabelas 6.3 e 6.4 apresentam um quadro comparativo entre cada um dos estimadores de estado hierárquicos e o estimador integrado, quanto ao número de iterações necessárias para obter-se a convergência, segundo os critérios apresentados na secção 6.1. Como o Algoritmo de Kurzyn processa uma

linha de intercâmbio por vez, é apresentado nas tabelas o número de iterações necessárias para obter-se a convergência no cálculo das aberturas angulares de cada uma das linhas de intercâmbio de ambos os sistemas-teste.

TABELA 6.3 - NÚMERO DE ITERAÇÕES - SISTEMA IEEE-30 BARRAS

Algoritmo	Número de Iterações	
Estimador Integrado	3	
Nível Local - sub-sist. 1	3	
Nível Local - sub-sist. 2	3	
Nível Local - sub-sist. 3	3	
Van Cutsem	3	
Lo	3	
Kurzyn	linha	iterações
	8	2
	11	2
	12	2
	13	2
	14	2
35	2	

TABLELA 6.4 - NÚMERO DE ITERAÇÕES - SISTEMA SUL-SUDESTE - 91 BARRAS

Algoritmo	Número de Iterações	
Estimador Integrado	5	
Nível Local - sub-sist. 1	4	
Nível Local - sub-sist. 2	5	
Nível Local - sub-sist. 3	4	
Nível Local - sub-sist. 4	4	
Nível Local - sub-sist. 5	3	
Van Cutsem	8	
Lo	3	
Kurzyn	linha	iterações
	14	3
	44	2
	56	2
	57	2
	59	2
	70	2
	71	2
	75	3
	76	2
	88	3
	92	2
	99	2
	105	2
	108	2
112	2	
114	2	
131	2	
132	3	

As tabelas 6.5 e 6.6 apresentam os tempos de execução (tempo total de CPU) obtidos para ambos os sistemas testes. O tempo total de execução de um algoritmo hierárquico completo é calculado adicionando-se o maior tempo de execução dos níveis locais com o tempo de execução do nível central.

TABELA 6.5 - TEMPO TOTAL DE CPU - SISTEMA IEEE-30 BARRAS

Algoritmo	Tempo Total de CPU em segundos	
Estimador Integrado	0.667500	
Nível Local - sub-sist. 1	0.093015	
Nível Local - sub-sist. 2	0.225495	
Nível Local - sub-sist. 3	0.073443	
Van Cutsem - Nível Central	0.047220	
Lo - Nível Central	0.021431	
Kurzyn - Nível Central	0.018628	
Algoritmo	Tempos Totais	% do Tempo do Est. Integrado
Van Cutsem	0.272715	40.85618
Lo	0.246926	36.99266
Kurzyn	0.244123	36.57273

TABELA 6.6 - TEMPO TOTAL DE CPU - SISTEMA SUL-SUDESTE - 91 BARRAS

Algoritmo	Tempo Total de CPU em segundos	
Estimador Integrado	7.121900	
Nível Local - sub-sist. 1	0.303190	
Nível Local - sub-sist. 2	0.177170	
Nível Local - sub-sist. 3	0.408900	
Nível Local - sub-sist. 4	0.294360	
Nível Local - sub-sist. 5	0.255480	
Van Cutsem - Nível Central	0.365510	
Lo - Nível Central	0.051525	
Kurzyn - Nível Central	0.069078	
Algoritmo	Tempo Total	% do Tempo do Est. Integrado
Van Cutsem	0.774410	10.87364
Lo	0.460425	6.46492
Kurzyn	0.477978	6.71138

Como pode ser visto pelas Tabelas 6.5 e 6.6, os estimadores hierárquicos proporcionam uma grande redução no tempo de estimação. Por exemplo, para o Sistema II, a redução foi da ordem de 9,3 vezes para o Algoritmo de Van Cutsem, 15 vezes para o Algoritmo de Lo e de cerca de 14,8 vezes para o Algoritmo de Kurzyn.

6.5 - Precisão e Confiabilidade dos Resultados:

As Tabelas 6.7 e 6.8 apresentam os resultados obtidos para os ângulos de coordenação para todos os algoritmos implementados. Estes valores são comparados com os valores obtidos no Estimador Integrado para as barras correspondentes às barras de folga de cada sub-sistema.

As Tabelas 6.7 e 6.8 apresentam ainda os erros percentuais calculados tendo como referência os valores obtidos pelo Estimador Integrado.

TABELA 6.7 - ÂNGULOS DE COORDENAÇÃO E ERROS PERCENTUAIS OBTIDOS
SISTEMA IEEE-30 BARRAS

	Est. Int.	Van Cutsem	Erro %	Lo	Erro %	Kurzyn	Erro %
u_2	-14.446	-14.471	0.1731	-14.435	0.0711	-14.502	0.3909
u_3	-11.885	-11.866	0.1632	-11.889	0.0399	-11.980	0.7998

TABELA 6.8 - ÂNGULOS DE COORDENAÇÃO E ERROS PERCENTUAIS OBTIDOS
SISTEMA SUL-SUDESTE - 91 BARRAS

	Est. Int.	Van Cutsem	Erro %	Lo	Erro %	Kurzyn	Erro %
u_2	-32.309	-32.409	0.3076	-32.348	0.1270	-32.415	0.3383
u_3	-3.334	-3.467	3.9909	-3.468	4.0229	-3.567	6.9919
u_4	12.978	13.151	1.3351	13.088	0.8500	13.038	0.4592
u_5	4.184	4.454	6.4230	4.425	5.7472	4.294	2.6162

Os resultados obtidos para os ângulos nas barras de fronteira foram ainda melhores que os obtidos para os ângulos de coordenação. A Tabela 6.9 apresenta os erros percentuais médios obtidos pelos três algoritmos para ambos os sistemas-teste.

Contudo, o erro percentual obtido no ângulo da barra 58 do Sistema II foi bastante grande (33.47% para os três algoritmos). Esse valor foi expurgado quando da elaboração da Tabela 6.9 já que ele foi o mesmo nos três algoritmos. O valor real deste ângulo é bastante pequeno (0.9002°), o que explica a ocorrência deste elevado erro percentual. Os resultados completos obtidos pelos algoritmos podem ser encontrados no Apêndice B deste trabalho.

TABELA 6.9 - ERROS PERCENTUAIS MÉDIOS PARA OS ÂNGULOS
NAS BARRAS DE FRONTEIRA

Algoritmo	Erro percentual médio	
	Sistema I	Sistema II
Van Cutsem	0.69080	1.22720
Lo	0.38480	1.06090
Kurzyn	0.50301	1.03130

Os melhores resultados foram os obtidos para as tensões nas barras de fronteira. A Tabela 6.10 apresenta os erros percentuais médios obtidos no nível local e no Algoritmo de Van Cutsem para as tensões nas barras de fronteira de ambos os sistemas-teste. O Apêndice B apresenta os resultados completos.

Como pode ser visto pela Tabela 6.10, os resultados obtidos para as tensões nos níveis locais, estão bastante próximos dos obtidos no Estimador Integrado.

Finalmente, a Tabela 6.11 apresenta os erros percentuais médios obtidos para os fluxos ativos nas linhas de intercâmbio de ambos os sistemas teste, para os três algoritmos.

TABELA 6.10 - ERROS PERCENTUAIS MÉDIOS PARA AS TENSÕES
NAS BARRAS DE FRONTEIRA

Algoritmo	Erro percentual médio	
	Sistema I	Sistema II
nível local	0.40700	0.25672
Van Cutsem	0.33781	0.22040

TABELA 6.11 - ERROS PERCENTUAIS MÉDIOS PARA OS FLUXOS DE POTÊNCIA ATIVA
NAS BARRAS DE FRONTEIRA

Algoritmo	Erro percentual médio	
	Sistema I	Sistema II
Van Cutsem	1.16911	0.85573
Lo	1.24650	5.69720
Kurzyn	1.82070	3.66219

O Algoritmo de Van Cutsem teve seus piores resultados associados a valores muito baixos de fluxo ativo em linhas de intercâmbio. Por exemplo, o pior resultado obtido ocorreu na linha 70 do Sistema II : um erro percentual de 2.182% para um fluxo de 0.08592 p.u. Já os algoritmos de Lo e Kurzyn

apresentaram seus piores resultados em linhas de intercâmbio eletricamente curtas (principalmente transformadores), linhas essas que possuem uma abertura angular inferior a 1° . É o caso, por exemplo, de linha 108, na verdade um transformador cuja reatância série é igual a 0.02401 p.u. O Algoritmo de Lo apresentou um erro de 22.724% e o de Kurzyn, 38.32%. Contudo, o pior resultado obtido pelo Algoritmo de Lo foi na linha 70, 23.523%. A linha 70, além de ser muito curta (x_1 igual a 0.01823 p.u.), possui um fluxo ativo muito pequeno, conforme observado no parágrafo anterior. Os resultados completos para ambos os sistemas, podem ser vistos no Apêndice B.

6.6 - Processamento de Erros Grosseiros:

6.6.1 Introdução:

Foram introduzidos erros grosseiros simples e múltiplos, tanto em telemidas de fluxo ativo, quanto de fluxo reativo. As pseudo-medidas provenientes dos sub-sistemas (os estados estimados nas barras de fronteira) foram consideradas isentas de qualquer tipo de ruído

Diversos testes foram realizados sendo que sete casos foram selecionados de maneira a ilustrar os resultados obtidos no processamento de erros grosseiros pelos três algoritmos implementados. Estes resultados são apresentados na Secção 6.6.4.

6.6.2 - Considerações Sobre o Processamento de Erros Grosseiros nos Algoritmos de Van Cutsem e Lo:

Quanto a detecção da presença de erros grosseiros, os algoritmos de Lo e Van Cutsem tiveram comportamentos similares, com a diferença de que no

segundo, o limiar λ_j , utilizado na detecção da presença de erros grosseiros, teve que ser multiplicado por um fator γ , já que a soma dos quadrados dos resíduos ponderados alcançou valores acima do esperado, sem que erros grosseiros estivessem presentes.

Vários testes foram efetuados e não se constatou qualquer caso de falha no teste de detecção. Os algoritmos mostraram-se bastante sensíveis a presença de erros grosseiros. Erros grosseiros múltiplos foram simulados e, sem exceção, detectados em ambos os algoritmos.

Contudo, os algoritmos tiveram dificuldades em identificar com precisão qual a medida portadora de erro grosseiro. No caso do Algoritmo de Van Cutsem, foi possível identificar-se apenas o tipo da telemedida e em qual linha de intercâmbio ela se encontra. Ainda no caso do Algoritmo de Van Cutsem, registraram-se casos em que foram introduzidos erros grosseiros em telemedidas de fluxo reativo, e o critério dos resíduos normalizados apontava uma telemedida de fluxo ativo como portadora de erro grosseiro. É interessante notar que, para os mesmos casos, o critério dos resíduos ponderados não registrou qualquer falha na identificação da linha que continha a telemedida portadora de erro grosseiro. Contudo, quando da introdução de erros grosseiros múltiplos, ocorreram casos em que o método dos resíduos ponderados apontava a existência de erros grosseiros em telemedidas de fluxo reativo quando de fato eles não existiam. Nestes casos, o critério dos resíduos normalizados não apresentou tal comportamento.

Da mesma forma, o Algoritmo de Lo foi incapaz de identificar a telemedida incorreta, mas apenas a linha que a continha. Isso ocorre devido ao fato das telemedidas de fluxo nas linhas de intercâmbio formarem um par crítico [23] já que, do ponto de vista do nível central, não existem conexões físicas entre essas linhas. Portanto, torna-se necessário a existência de um critério de desempate, pois qualquer das duas telemedidas de fluxo ativo ou

reativo em uma linha de intercâmbio apontada como suspeita pode ser a telemidada incorreta. O critério de desempate implementado nos algoritmos de Lo e Van Cutsem, é descrito a seguir:

- Utilizando-se os dados de entrada para tensões e ângulos nas barras de fronteira obtidos dos processos de estimação nos níveis locais, e os valores atualizados para os ângulos de coordenação, calcula-se o fluxo de potência em ambas as extremidades da linha de intercâmbio suspeita;
- Calcula-se os desvios percentuais dessas telemidas suspeitas com relação aos fluxos de potência calculado.
- A telemida que apresenta o maior desvio percentual é considerada a telemida portadora do erro grosseiro detectado.

No Algoritmo de Van Cutsem, o critério de desempate descrito no parágrafo anterior apresentou resultados satisfatórios, não sendo registrada qualquer falha mesmo quando erros grosseiros múltiplos são introduzidos. Contudo, no Algoritmo de Lo, quando da introdução de erros grosseiros múltiplos, ocorreram casos em que o maior resíduo ponderado estava associado a telemidas corretas, ocorrendo falha na identificação, inviabilizando completamente a estimação de estado. Nessas situações, o desvio percentual calculado como descrito no parágrafo anterior possui valores muito pequenos, já que a telemida identificada não é portadora de erro grosseiro. Como consequência desses fatos, algumas modificações no critério de identificação foram efetuadas:

- Caso os desvios percentuais das telemidas de fluxo de uma determinada linha de intercâmbio, apontada como portadora de medidas errôneas seja inferior a 25%, as telemidas associadas à referida linha são consideradas boas.
- Considera-se então que a linha que contém a telemida portadora do erro grosseiro identificado está associada às telemidas correspondentes ao

terceiro e quarto maiores resíduos ponderados já que os dois primeiros estão associados às telemidas anteriormente identificadas como errôneas e agora, consideradas boas.

- Calcula-se os desvios percentuais das telemidas suspeitas com relação aos fluxos calculados.
- A telemida que corresponder ao maior desvio percentual é considerada como portadora de erro grosseiro.

Como foi descrito na secção 4.3.3, a grande vantagem de se recuperar telemidas portadoras de erros grosseiros substituindo-as por pseudo-medidas é tornar desnecessário a introdução de alterações na estrutura tanto da matriz Jacobiana H quanto da matriz de informação G . Devido ao fato de as telemidas de fluxo constituírem um par crítico, não houve condições para que o processo convencional de recuperação de medidas portadoras de erros grosseiros expresso pela equação (4.16) apresentasse resultados satisfatórios. Um procedimento alternativo simples e eficiente de recuperação de medidas foi implementado, obtendo-se resultados bastante bons. Tal procedimento é descrito a seguir.

Caso o erro grosseiro ocorra numa telemida de fluxo ativo, substitui-se essa medida pela da outra extremidade da linha com sinal trocado. Caso o erro grosseiro ocorra numa telemida de fluxo reativo (no Algoritmo de Van Cutsem), o método de recuperação utilizado para as telemidas de fluxo ativo não pode ser utilizado pois a linha gera ou absorve potência reativa do resto do sistema. Portanto, esta telemida é substituída por uma pseudo-medida igual ao fluxo reativo calculado naquela extremidade da linha utilizando-se os ângulos e tensões estimados no nível local e valores atualizados para os ângulos de coordenação. Testes realizados confirmaram que erros grosseiros em telemidas de fluxo reativo afetam muito pouco os resultados obtidos para os ângulos de coordenação. Dessa forma, as

pseudo-medidas assim calculadas, encontram-se bastante próximas de seus valores reais.

Um resultado interessante, embora esperado, é que erros grosseiros introduzidos em telemedidas de fluxo reativo afetam muito pouco os ângulos de coordenação e os ângulos estimados nas barras de fronteira.

6.6.3 - O Processamento de Erros Grosseiros no Algoritmo de Kurzyn:

O Algoritmo de Kurzyn apresenta diversos problemas quanto ao processamento de erros grosseiros. A técnica sugerida pelo autor para este fim, descrita na secção 4.4 foi implementada, obtendo-se bons resultados. Contudo, se em uma determinada interligação houver menos de três linhas de intercâmbio monitoradas, é impossível sequer a detecção da presença de erros grosseiros. Ou ainda, se houver mais do que uma linha contendo erros grosseiros em uma determinada interligação, mesmo que esta interligação contenha mais do que quatro linhas, a identificação de qual delas contém telemedidas incorretas é bastante difícil, consumindo um tempo computacional precioso para um programa em tempo real. Nos sistemas-teste utilizados neste trabalho, este problema não ocorre pois não existem interligações entre sub-sistemas com menos de três linhas monitoradas e nem foram simulados erros grosseiros simultâneos na mesma interligação.

O processamento de erros grosseiros no Algoritmo de Kurzyn possui duas etapas: a primeira etapa identifica as linhas suspeitas de conterem telemedidas portadoras de erros grosseiros e a segunda etapa identifica essas telemedidas. O processo de identificação da linha suspeita é heurístico e implica na existência de um "critério de normalidade" para o qual o ângulo de coordenação calculado para uma determinada linha de intercâmbio é considerado correto ou incorreto. A questão a resolver é a determinação deste critério.

Neste trabalho foi utilizado o seguinte critério: são consideradas suspeitas de possuírem telemidas portadoras de erros grosseiros as linhas de intercâmbio cujos ângulos de coordenação possuírem um valor 25% superior ou inferior ao valor imediatamente abaixo ou acima na lista ordenada dos ângulos de coordenação. O método de identificação da telemida portadora de erro grosseiro sugerido pelo autor não trouxe qualquer benefício quanto a qualidade dos resultados e consumiu muito tempo computacional. Portanto, ele é completamente dispensável e inócua sua implementação.

6.6.4 - Resultados:

CASO I: Erro grosseiro introduzido na telemida de fluxo ativo junto a barra 48 da linha 76 do Sistema II:

valor verdadeiro da medida: -2.539 p.u.

valor adulterado: 2,539 p. u.

Tanto o critério do máximo resíduo normalizado, quanto o critério do máximo resíduo ponderado apontaram a linha 76 como contendo uma telemida portadora de erro grosseiro. O critério de identificação utilizado apontou a telemida junto a barra 48 como sendo a telemida errônea. A Tabela 6.12 apresenta os resultados obtidos para os ângulos de coordenação para os três algoritmos, após ter sido recuperada a telemida errônea.

CASO II: Erros grosseiros introduzidos nas linhas 14 e 44 do Sistema II, em telemidas de fluxo ativo, junto às barras 6 e 24 respectivamente:

valor verdadeiro da telemida junto a barra 6: -1.37 p.u.

valor adulterado: -2.74 p.u.

valor verdadeiro da telemida junto a barra 24: -4.958 p.u.

valor adulterado: 4.958 p.u.

Da mesma forma que no Caso I, as telemidas errôneas foram detectadas e identificadas sem qualquer problema. Os resultados obtidos para os ângulos de coordenação, após o processo de recuperação das telemidas portadoras de erros grosseiros pode ser visto na Tabela 6.13.

TABELA 6.12- ÂNGULOS DE COORDENAÇÃO E ERROS PERCENTUAIS OBTIDOS
CASO I

	Est. Int.	Van Cutsem	Erro %	Lo	Erro %	Kurzyn	Erro %
u_2	-32.309	-32.408	0.3064	-32.348	0.1207	-32.416	0.3312
u_3	-3.334	-3.458	3.7193	-3.466	3.9592	-3.597	7.8884
u_4	12.978	13.161	1.4101	13.091	0.8707	13.008	0.2312
u_5	4.184	4.463	6.6682	4.427	5.8878	4.263	1.8891

CASO III: Erros grosseiros em telemidas de fluxo ativo nas linhas 92, 112 e 44 do Sistema II, junto as barras 53, 77 e 29 respectivamente:

valor verdadeiro da telemida junto a barra 53: 2.517 p.u.

valor adulterado: -2.517

valor verdadeiro da telemida junto a barra : -5.798 p.u.

valor adulterado: -8.675 p.u.

No algoritmo de Van Cutsem, as três telemidas portadoras de erros grosseiros

foram detectadas, identificadas e recuperadas. Contudo, a telemedida de fluxo reativo junto a barra 77 da linha 112 foi identificada como portadora de erro grosseiro. Seu valor verdadeiro, igual a -0.09631 p.u., foi eliminado e substituído por -0.172 p.u. calculado como descrito na secção 6.6.2. No Algoritmo de Kurzyn, as linhas 92, 112 e 44 foram eliminadas. No Algoritmo de Lo houve erro na identificação da medida portadora de erro grosseiro da linha 92, inviabilizando a estimação de estado. Os resultados finais obtidos podem ser vistos na Tabela 6.14.

TABELA 6.13- ÂNGULOS DE COORDENAÇÃO E ERROS PERCENTUAIS OBTIDOS

CASO II

	Est. Int.	Van Cutsem	Erro %	Lo	Erro %	Kurzyn	Erro %
u_2	-32.309	-32.409	0.3076	-32.348	0.1207	-32.416	0.3311
u_3	-3.334	-3.467	3.9892	-3.468	4.0191	-3.567	6.9886
u_4	12.978	13.182	1.5718	13.096	0.9092	12.932	0.3544
u_5	4.184	4.476	6.9789	4.426	5.7839	4.188	0.0956

TABELA 6.14- ÂNGULOS DE COORDENAÇÃO E ERROS PERCENTUAIS OBTIDOS

CASO III

	Est. Int.	Van Cutsem	Erro %	Kurzyn	Erro %
u_2	-32.309	-32.399	0.2786	-32.469	0.4952
u_3	-3.334	-3.492	4.7391	-3.534	5.9988
u_4	12.978	13.126	1.1404	13.071	0.7166
u_5	4.184	4.432	5.9273	4.285	2.4139

CASO IV: Idêntico ao Caso III, apenas com a introdução de um erro grosseiro na telemidada de fluxo reativo junto a barra 68 da linha 112:

valor verdadeiro da telemidada de fluxo reativo junto a barra da linha 112: -0.09681 p.u.:

valor adulterado: -9.637 p.u.

No Algoritmo de Van Cutsem, todas as telemidas errôneas foram identificadas e recuperadas. O Algoritmo de Kurzyn comportou-se como no caso anterior. Como o Algoritmo de Lo não processa telemidas de fluxo reativo, o Caso IV torna-se idêntico ao Caso III. Os resultados obtidos são os mesmo apresentados na tabela 6.14, relativa ao Caso III.

CASO V: Erro grosseiro na telemidada de fluxo reativo da linha 70 junto a barra 45 do Sistema II:

valor verdadeiro da telemidada: -0.3942 p.u.

valor adulterado: 0.3942 p.u.

No Algoritmo de Van Cutsem, o critério dos resíduos normalizados identificou a telemedida de fluxo ativo junto a barra 52 da linha 88. O critério dos resíduos ponderados identificou corretamente a telemedida incorreta. No Algoritmo de Kurzyn, não houve detecção da presença da telemedida contendo um erro grosseiro. Os resultados obtidos, podem ser vistos na Tabela 6.15.

TABELA 6.15- ÂNGULOS DE COORDENAÇÃO E ERROS PERCENTUAIS OBTIDOS

CASO V

	Est. Int.	Van Cutsem	Erro %	Kurzyn	Erro %
u_2	-32.309	-32.409	0.3095	-32.415	0.3288
u_3	-3.334	-3.467	3.9892	-3.563	6.8696
u_4	12.978	13.151	1.3330	13.042	0.4931
u_5	4.184	4.454	6.4531	4.298	2.7247

CASO VI: Erro grosseiro na telemedida de fluxo reativo junto a barra 24 da linha 44 do Sistema II:

valor verdadeiro da telemedida: -0.359 p.u.

valor adulterado: 0.533 p. u.

Novamente, no Algoritmo de Van Cutsem, o critério dos resíduos normalizados identificou a telemedida de fluxo ativo junto a barra 52 da linha 88 como portadora de erro grosseiro. O critério dos resíduos ponderados indicou corretamente a telemedida incorreta. No Algoritmo de Kurzyn, para haver detecção, uma alteração no "critério de normalidade" teve de ser feita,

reduzino-o de 25% para 15%. Mesmo assim, os resultados obtidos foram idênticos ao caso anterior.

CASO VII: Erros grosseiros em telemidas de fluxo ativo junto às barras 58, 65 e 33 nas linhas 88, 105 e 52 do Sistema II respectivamente e foi mantido o erro grosseiro na telemida de fluxo reativo junto a barra 24 da linha 44 do caso anterior:

valor verdadeiro da telemida de fluxo ativo junto a barra 58 na linha 88: 12.18 p.u.

valor adulterado: 1.21 p. u.

valor verdadeiro da telemida de fluxo ativo junto a barra 65 na linha 105: -2.086 p.u.

valor adulterado: 2.086 p.u.

valor verdadeiro da telemida de fluxo ativo junto a barra 33 na linha 57: 0.356 p.u.

valor adulterado: 35.6 p.u.

No Algoritmo de Van Cutsem, todas as telemidas portadoras de erros grosseiros foram identificadas e recuperadas. Novamente, houve a identificação de erro grosseiro não existente em uma telemida de fluxo reativo (critério dos resíduos ponderados) na linha 105. No Algoritmo de Kurzyn, apenas as linhas 57 e 88 contendo telemidas portadoras de erros grosseiros foram eliminadas. No Algoritmo de Lo, houve problemas na identificação da telemida errônea da linha 105, inviabilizando a estimação. Os resultados obtidos pelos algoritmos de Van Cutsem e Kurzyn pode ser visto na Tabela 6.16.

TABELA 6.16- ÂNGULOS DE COORDENAÇÃO E ERROS PERCENTUAIS OBTIDOS

CASO VII

	Est. Int.	Van Cutsem	Erro %	Kurzyn	Erro %
u_2	-32.309	-32.405	0.2971	-32.052	0.7954
u_3	-3.334	-3.364	0.8998	-3.435	3.0294
u_4	12.978	13.254	2.1667	13.169	1.4717
u_5	4.184	4.556	8.8910	4.367	4.3738

Como o Algoritmo de Lo apresentou problemas de identificação de telemedidas portadoras de erros grosseiros, as modificações sugeridas na Secção 6.6.2 para o processo de identificação foram implementadas e os Casos III e VII repetidos, obtendo-se resultados satisfatórios. Os resultados obtidos podem ser vistos na Tabela 6.17.

6.7 Considerações Finais:

Este capítulo apresentou os principais resultados obtidos na implementação computacional dos três algoritmos selecionados. Comparações quanto ao intercâmbio de informações entre os níveis locais e o nível central e vice-versa entre os três algoritmos foram feitas na Secção 6.2.

Embora a memória computacional requerida por um determinado programa não seja hoje considerada um fator tão limitante ao emprego de um determinado algoritmo, a secção 6.3 apresenta a memória requerida por cada

TABELA 6.17- ÂNGULOS DE COORDENAÇÃO E ERROS PERCENTUAIS OBTIDOS
PELO ALGORITMO DE LO MODIFICADO

	Est. Int.	CASO III	Erro %	CASO VII	Erro %
u_2	-32.309	-32.347	0.1176	-32.348	0.1207
u_3	-3.334	-3.469	4.0492	-3.468	4.0192
u_4	12.978	13.083	0.8091	13.092	0.8784
u_5	4.184	4.425	5.7600	4.429	5.8557

Programa, incluindo o Estimador Integrado e o Estimador Local.

O tempo de execução de um determinado programa, por outro lado, é um fator limitante ao seu emprego. A secção 6.4 fornece quadros comparativos entre os tempos de execução do Estimador Integrado, dos Estimadores Locais e dos três algoritmos hierárquicos implementados. Além disso, é ainda mostrado um quadro comparativo quanto ao número de iterações necessárias a convergência de cada algoritmo.

Um resumo dos resultados numéricos obtidos é apresentado na Secção 6.5. Selecionou-se para apresentação nessa secção, os resultados obtidos nos dois sistemas testes para os ângulos de coordenação e os erros percentuais médios obtidos pelos três algoritmos para os ângulos e tensões nas barras de fronteira e para os fluxos de potência ativa nas linhas de intercâmbio.

Finalmente, a Secção 6.6 tece alguns comentários quanto ao processamento de erros grosseiros nos três algoritmos, destacando os problemas encontrados durante sua implementação e apresentando diversos resultados

obtidos durante as simulações.

As características e parâmetros de cada sistema simulado, bem como seus diagramas unifilares, condições de operação e planos de medição são apresentados nos Apêndices A deste trabalho. O Apêndice B apresenta um quadro comparativo completo entre os resultados obtidos pelos três algoritmos hierárquicos e o Estimador Integrado, incluindo tabelas mostrando os erros percentuais obtidos para os ângulos e tensões nas barras de fronteira e para os fluxos de potência ativa nas linhas de intercâmbio. Os resultados obtidos até aqui, permitem que no próximo capítulo sejam apresentadas as conclusões finais deste trabalho, apontando as vantagens e desvantagens de cada algoritmo e sugerindo alternativas e estudos posteriores.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÃO

7.1 - Conclusões:

Procurou-se, neste trabalho, estudar, implementar e comparar os desempenhos de três algoritmos destinados à estimação de estado em sistemas elétricos de potência em dois níveis hierárquicos. Dois dos algoritmos implementados baseiam-se na técnica dos mínimos quadrados ponderados (WLS): os algoritmos de Van Cutsem, Howard e Ribbens-Panvella [4] e de Lo, Salem, Moffatt e McColl [11]. O terceiro algoritmo, desenvolvido por Kurzyn [7], calcula os ângulos de coordenação entre os sub-sistemas estimando as aberturas angulares em todas as linhas de intercâmbio monitoradas do sistema interligado.

A memória computacional requerida por um determinado algoritmo não chega a ser um fator limitante à sua utilização. O Algoritmo de Kurzyn é o que necessita de menor área de memória ao armazenamento de dados e o Algoritmo de Van Cutsem a maior área. Mesmo assim, os requisitos de memória do Algoritmo de Van Cutsem são ainda bem menores que os do Estimador Integrado.

Dos três algoritmos implementados, o mais rápido é o Algoritmo de Lo, justamente por tratar-se de um algoritmo desacoplado que processa somente as telemidas de fluxo ativo nas linhas de intercâmbio e não re-estima os estados nas barras de fronteira. O Algoritmo de Van Cutsem mostrou ser bem mais lento que o de Lo, em todos os sistemas-teste. O Algoritmo de Kurzyn mostrou ser ligeiramente mais rápido que o de Lo no Sistema I. Mas para o

Sistema II, três vezes maior que o Sistema I em número de barras, o Algoritmo de Lo foi cerca de 30% mais rápido. Da forma como foi construído, a medida que aumenta o número de linhas de intercâmbio monitoradas, o tempo de execução do Algoritmo de Kurzyn aumenta com mais intensidade do que o tempo de execução do Algoritmo de Lo. Isso se deve ao fato do Algoritmo de Kurzyn processar uma linha de intercâmbio por vez, enquanto que tanto o Algoritmo de Lo quanto o de Van Cutsem as processam de maneira global. Para o Sistema II, mais realístico, o Estimador Integrado foi cerca de 9 vezes mais lento que o Algoritmo de Van Cutsem, cerca de 15.5 vezes mais lento que o Algoritmo de Lo e cerca de 15 vezes mais lento que o Algoritmo de Kurzyn.

Do ponto de vista do intercâmbio de informações, o Algoritmo de Van Cutsem é o que mais necessita de informações provenientes dos sub-sistemas, já que os estados estimados nas barras de fronteira de cada um deles são tratados pelo algoritmo como pseudo-medidas e não como variáveis determinísticas como ocorre nos algoritmos de Lo e Kurzyn. Portanto, cada sub-sistema deve enviar ao nível central as covariâncias dos erros de estimação dessas variáveis de estado, valores estes necessários como fatores de ponderação das pseudo-medidas de ângulos e tensões. Além disso, os estados re-estimados nas barras de fronteira devem ser enviados de volta aos sub-sistemas juntamente com as estimativas dos ângulos de coordenação e fluxos de potência nas linhas de intercâmbio. Novamente, por se tratar de um algoritmo desacoplado, o Algoritmo de Lo é o que apresenta o menor fluxo de informações entre os níveis locais e o nível central e vice-versa, já que as telemidas de fluxo reativo nas linhas de intercâmbio não são necessárias e nem as estimativas dos fluxos reativos nas linhas de intercâmbio são calculadas. O Algoritmo de Kurzyn encontra-se em uma posição intermediária entre os dois algoritmos anteriores.

Quanto a precisão e confiabilidade dos resultados, o Algoritmo de Lo apresentou melhores resultados para ângulos de coordenação e ângulos nas

barras de fronteira que o Algoritmo de Van Cutsem em ambos os sistemas-teste e melhores resultados nos mesmos itens que o Algoritmo de Kurzyn para o Sistema II. É interessante notar que, mesmo re-estimando os ângulos nas barras de fronteira, o Algoritmo de Van Cutsem apresentou resultados ligeiramente inferiores aos obtidos pelos algoritmos de Lo e Kurzyn, em ambos os sistemas-teste. Mas, no caso das tensões, o Algoritmo de Van Cutsem apresenta resultados ligeiramente melhores que os obtidos nos níveis locais. Em compensação, os resultados obtidos pelo Algoritmo de Van Cutsem para as estimativas dos fluxos de potência nas linhas de intercâmbio, são bem melhores que os resultados obtidos pelos outros dois algoritmos, principalmente para o Sistema II, onde o Algoritmo de Lo chegou a apresentar erros da ordem de 23.5% e o de Kurzyn erros da ordem de 38.2%. O maior erro percentual obtido pelo Algoritmo de Van Cutsem foi de apenas 2.2%. Este tipo de problema decorre do fato de no Algoritmo de Lo, as telemidas de fluxo ativo nas linhas de intercâmbio formarem um par crítico [23] [24], gerando problemas quando da estimação de estado em linhas eletricamente curtas. No Algoritmo de Van Cutsem este problema não existe, pois além das telemidas de fluxo ativo nas linhas de intercâmbio, ele processa também telemidas de fluxo reativo e as pseudo-medidas de tensão e ângulo em todas as barras de fronteira. Isso demonstra que, apesar do fato do Algoritmo de Van Cutsem ser mais lento e apresentar resultados ligeiramente inferiores aos outros dois algoritmos para os ângulos de coordenação e ângulos nas barras de fronteira, é um algoritmo mais confiável.

Quanto ao processamento de erros grosseiros, os Algoritmos de Van Cutsem e Lo apresentam um comportamento diferente. Ambos são bastante eficientes para detectarem a presença de erros grosseiros, sejam eles simples ou múltiplos. O Algoritmo de Van Cutsem, devido ao fato de possuir uma redundância local superior, mostra-se capaz de identificar telemidas

portadoras de erros grosseiros em situações em que o Algoritmo de Lo falha completamente. Modificações neste algoritmo tiveram que ser feitas, corrigindo em parte as distorções registradas. A ocorrência de diversos casos de erros na identificação de telemedidas portadoras de erros grosseiros em ambos os algoritmos, como pôde ser visto no capítulo anterior, foram registrados, demonstrando de certa forma que os métodos clássicos de identificação de medidas portadoras de erros grosseiros não se adaptam muito bem aos algoritmos hierárquicos do tipo apresentados neste trabalho. Já o Algoritmo de Kurzyn não possui um esquema confiável para o processamento de erros grosseiros. O método sugerido por Kurzyn para tal é ineficiente e teoricamente frágil devido aos motivos apresentados no decorrer deste trabalho.

Os três algoritmos foram desenvolvidos tendo em vista sua utilização como estimadores de estado em sistemas interligados de grande porte, embora possam ser utilizados na decomposição de um grande sistema elétrico em vários sub-sistemas. Contudo, testes demonstraram que, se estes algoritmos forem utilizados na decomposição, cuidados devem ser tomados na escolha dos sub-sistemas e, principalmente, nos planos de medição de cada um deles, procurando se evitar problemas de observabilidade topológica e numérica. Planos de medição inadequados geram resultados incorretos nos ângulos das tensões de barras internas e de fronteira dos sub-sistemas, sem que estes possam ser detectados. Esses resultados incorretos são transmitidos

CAPÍTULO 7

CONCLUSÃO

7.1 - Conclusões:

portadoras de erros grosseiros em situações em que o Algoritmo de Lo falha completamente. Modificações neste algoritmo tiveram que ser feitas, corrigindo em parte as distorções registradas. A ocorrência de diversos casos de erros na identificação de telemidas portadoras de erros grosseiros em ambos os algoritmos, como pôde ser visto no capítulo anterior, foram registrados, demonstrando de certa forma que os métodos clássicos de identificação de medidas portadoras de erros grosseiros não se adaptam muito bem aos algoritmos hierárquicos do tipo apresentados neste trabalho. Já o Algoritmo de Kurzyn não possui um esquema confiável para o processamento de erros grosseiros. O método sugerido por Kurzyn para tal é ineficiente e teoricamente frágil devido aos motivos apresentados no decorrer deste trabalho.

Os três algoritmos foram desenvolvidos tendo em vista sua utilização como estimadores de estado em sistemas interligados de grande porte, embora possam ser utilizados na decomposição de um grande sistema elétrico em vários sub-sistemas. Contudo, testes demonstraram que, se estes algoritmos forem utilizados na decomposição, cuidados devem ser tomados na escolha dos sub-sistemas e, principalmente, nos planos de medição de cada um deles, procurando se evitar problemas de observabilidade topológica e numérica. Planos de medição inadequados geram resultados incorretos nos ângulos das tensões de barras internas e de fronteira dos sub-sistemas, sem que estes possam ser detectados. Esses resultados incorretos são transmitidos ao nível central, gerando erros importantes nos ângulos de coordenação e nos fluxos estimados nas linhas de intercâmbio. A origem desses problemas numéricos está no fato de a estimação local em cada sub-sistema ser realizada sem qualquer tipo de informação proveniente dos sub-sistemas vizinhos, a não ser as telemidas de fluxo de potência nas linhas de intercâmbio transformadas em pseudo-medidas de injeção.

Tendo em vista o apresentado até aqui, conclui-se que os algoritmos

hierárquicos são uma ferramenta indispensável a operação em tempo real de grandes sistemas elétricos e, principalmente, a estimação de estado em sistemas interligados que, devido às suas dimensões, podem inviabilizar o uso de Estimadores Integrados. Uma alternativa viável é investir-se tempo e recursos no estudo, aperfeiçoamento ou no desenvolvimento de novos estimadores de estado hierárquicos. Um dos objetivos deste trabalho foi, justamente, comprovar a eficiência e confiabilidade destes estimadores e verificar sua aplicabilidade a sistemas de potência realísticos.

7.2 - Sugestões para Futuros Trabalhos:

No decorrer deste trabalho, surgiram algumas idéias, principalmente com relação a modificações nos algoritmos implementados, que não puderam ser analisadas detidamente e posteriormente implementadas em computador. Desse modo, essas idéias são descritas a seguir e podem servir como sugestões para trabalhos posteriores.

Os três algoritmos implementados baseiam-se na técnica dos mínimos quadrados ponderados, com tendência a apresentar problemas numéricos. O uso de um algoritmo de estimação numericamente mais robusto tal como os que utilizam-se das rotações de Givens (os estimadores sequenciais-ortogonais) nos níveis locais deve ser considerado e estudos destinados a verificar sua adaptabilidade ao nível central dos algoritmos hierárquicos seriam bastante interessantes e poderiam levar a resultados muito melhores que os obtidos até aqui.

Na implementação das rotinas destinadas ao processamento de erros grosseiros, observou-se que a identificação da medida incorreta através dos resíduos normalizados apresentou diversos problemas, principalmente quando da ocorrência de erros grosseiros em telemedidas de fluxo reativo. Da mesma

forma, quando da utilização dos resíduos ponderados como forma de identificar medidas portadoras de erros grosseiros, estes indicaram telemedidas de fluxo reativo como portadoras de erros grosseiros quando de fato não eram. Portanto, torna-se necessário o estudo de técnicas de identificação de medidas portadoras de erros grosseiros mais confiáveis que o uso dos resíduos ponderados ou normalizados, algo como as técnicas de identificação por testes de hipótese, descritas na referência [18]. O desenvolvimento de técnicas destinadas ao processamento de erros grosseiros múltiplos interativos em estimadores hierárquicos tais como os descritos neste trabalho, é um campo ainda não explorado sendo importante seu estudo, principalmente quando se considera a implementação destes estimadores em sistemas elétricos reais.

A técnica de recuperação de telemedidas eliminadas devido a erros grosseiros utilizada neste trabalho, embora tenha apresentado bons resultados, é heurística e sujeita a certas incertezas. Por exemplo, erros grosseiros poderiam ocorrer nas duas telemedidas de fluxo ativo ou reativo em uma determinada linha de intercâmbio, inviabilizando o processo de recuperação. Portanto, torna-se necessário o estudo e o desenvolvimento de técnicas mais adequadas à recuperação das telemedidas portadoras de erros grosseiros, evitando-se assim, provocar modificações na estrutura da matriz Jacobiana ou na matriz de Informação.

A topologia da rede, quando analisada do ponto de vista do nível central de um estimador hierárquico, possui uma estrutura muito peculiar. Ela é constituída apenas das linhas de intercâmbio entre os sub-sistemas, e das barras aos quais estas linhas estão conectadas. Portanto, não existe uma conexão física entre essas linhas e as outras barras que constituem a área de interligação entre os sub-sistemas. Os Observadores de Rede atualmente existentes não estão adaptados a análise deste tipo de estrutura. O desenvolvimento de Observadores de Rede ou a adaptação de algoritmos já

existentes de modo que eles possam ser utilizados na verificação da observabilidade do tipo de rede descrita acima, seria uma substancial contribuição ao desenvolvimento dos estimadores hierárquicos. A redefinição de conceitos como medidas críticas ou conjuntos de medidas k-críticas [23] complementaria os estudos sobre a observabilidade da rede formada pela área de interligação do nível central.

Como já foi mencionado antes, este trabalho não considerou a existência de uma janela de tempo entre os dados enviados ao nível central por cada nível local. Contudo, esta janela existe e seus efeitos sobre os resultados finais da estimação de estado no nível central estudados.

No Brasil, as fronteiras entre empresas de energia elétrica operando interligadamente não estão bem definidas. É comum uma determinada empresa monitorar barras e linhas de transmissão pertencentes a uma empresa vizinha. Neste sentido, é importante e interessante o estudo e o desenvolvimento de Estimadores de Estado Hierárquicos capazes de processar áreas superpostas ou ainda, realizar estudos que visem a adaptação dos estimadores aqui estudados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - SCHWEPPE, F. C.; WILDES, J.; RON, D. B., "Power System Static State Estimation, Part I: Exact Model; Part II: Approximate Model; Part III: Implementation", IEE Trans. on PAS, vol. PAS-89, no. 1, Jan. 1970, pp. 120-135.
- 2 - CLEMENTS, K. A.; ENISON, Q. J.; RINGLES, R. J., "A Multi-area Approach to State Estimation in Power Systems Networks", IEEE PES Summer Meeting, paper C72 465-3, San Francisco, Ca., July, 1972.
- 3 - KOBAYASHI, H.; MORITA, S.; HAMMAN, M. S. A., "A Model Coordination Method Applied to Power System Control and Estimation Problem", Proc. of the IFAC 4th. Int. Conf. on Digital Computer Appl. to Process Control, 1974, pp.114-128.
- 4 - VAN CUTSEM, Th.; HOWARD, J. I. ; RIBBENS-PAVELLA, M., "A Two-level Static State Estimator for Electric Power Systems", IEEE Trans. on PAS, vol. PAS-100, no. 8, Aug. 1981, pp. 3722-3732.
- 5 - WALLOCK, Y.; HANDSCHIN, R., "An Efficient Parallel Processing Method for Power System State Estimation", IEEE Trnas. on PAS, vol. PAS-100, no. 11, Nov. 1981, pp. 4402-4406.

- 6 - VAN CUTSEM, Th.; RIBBENS-PAVELLA, M., "Hierarchical Methods for State Estimation of Electric Power Systems", IEEE Trans. on PAS, vol. PAS-102, Oc. 1983, pp. 3415-3424.
- 7 - KURZYN, M. S., "Real Time State Estimation for Large Scale Power Systems", IEEE Trans. on PAS, vol. PAS-102, no. 7, July 1983, pp. 2055-2063.
- 8 - SADAHI, H.; AOKI, K.; YOKOYAMA, R. , "A Parallel Computation Algorithm for Static State Estimation by Means of Matrix Inversion Lemma", IEEE Trans. on Power Systems, vol. PWRs-2, no. 3, Aug. 1987, pp. 624-632.
- 9 - MARSH, J. F.; AZZAM, M., "MCHSE: A Versatile Framework for the Design of Two Level Power Systems State Estimators", IEE Proceedings, vol. 135, Pr. C. no. 4, July 1988, pp. 291-298.
- 10 - LO, K. L.; SALEM, M. F., "A Reliable and Efficient Linear Programming Algorithm for Two-level Power Systems State Estimation". Electric Power Systems Research, no. 14, 1988, pp. 51-60.
- 11 - LO, K. L.; SALEM, M. F.; McCOLL, R. D.; MOFFATT, A. M.; "Two-level State Estimation for Large Power Systems, Part I: Algorithms, Part II: Computational Experience", IEE Proceedings, vol. 135, Pt. C. no. 4, July 1988, pp. 299-318.
- 12 - IWAMOTO, S.; KUSANA, M.; QUINTANA, V. H., "Hierarchical State Estimation Using a Fast Rectangular Coordinate Method", IEEE Trans. on Power Systems, vol. PWRs-4, no. 3, Aug. 1989, pp. 870-880.

- 13 - LO, K. L.; ONG, P. S.; McCOLL, R. D.; MOFFATT, A. M., "Development of a Static State Estimator , Part I: Estimation and Bad Data Supression", IEEE Trans. on PAS, vol. PAS-102, 1983, pp. 2486-2491.
- 14 - SIMÕES COSTA, A. J. A.; QUINTANA, V. H., "A Robust Numerical Technique for Power System State Estimation", IEEE Trns. on PAS, vol. PAS-100, no. 2, 1981, pp.691-698.
- 15 - MERRIL, H. M.; SCHWEPPE, F. C. "Bad Data Supression in Power Systems State Estimartion", IEEE Trans. on PAS, vol. PAS-90, 1971, pp. 2718-2725.
- 16 - HANDSCHIN, E., "Real Time Data Processing Using State Estimation in Electric Power Systems", Real Time Control of Electric Power Systems, Amsterdan, The Neetherlands, Elsevier, 1972, ch. 2.
- 17 - HANDSCHIN, E.; SCHWEPPE, F. C.; KOHLAS, J.; FRIECHTER, A., "Bad Data Analysis for Power System State Estimation", IEEE Trans. on PAS, vol. PAS-94, no. 2, March/April 1975, pp. 329-337.
- 18 - MILLI, L.; VAN CUTSEM, Th.; RIBBENS-PAVELLA, M., "Hypothesis Testing Identification: a New Method for Bad Data Analysis in Power System State Estimation", IEEE Trnas. on PAS, vol. PAS-103, no. 11, Nov. 1984, pp. 3239-3252.
- 19 - BROUSSOLE, F., "State Estimation in Power Systems: Detecting Bad Data Through the Sparse Inverse Matrix Method", IEEE Trans. on PAS, vol. PAS-97, no. 3, May/June 1978, pp. 678-682.

- 20 - GIMARÃES Jr., SEBASTIÃO CAMARGO, "Técnicas Ortogonais Sequenciais Associadas a Estimadores de Estado Desacoplados Rápidos em Sistemas de Potência", Dissertação de Mestrado, UFSC, 1983, 155pp.
- 21 - MONTICELLI, A., "Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica", São Paulo, Edgar Blücher, 1983, 164pp.
- 22 - MILLI, L. ; VAN CUTSEM, Th. ; RIBBENS-PAVELLA, M., "Bad Data Identification Methods in Power System State Estimation - A Comparative Study", IEEE/PES 1985 Winter Meeting, New York, 1985.
- 23 - AMARAL, S., "Métodos para Processamento de Erros Grosseiros Múltiplos em Estimadores de Estado Sequenciais-Ortogonais", Dissertação de Mestrado, UFSC, 1987, 152 pp.
- 24 - Simões Costa, A. : Piazza, T. S. : Mandel, A., "Qualitative Methods to Solve Qualitative Problems in Power System State Estimation", IEEE/PES Winter Meeting, Atlanta, Georgia, 1990, paper no. 257-6, 7 pp.
- 25 - George, A. ; Liu, J. W-H. , "Computer Solution of Large Sparse Positive Definite Systems", Prentice Hall, 1981, 324 pp.
- 26 - Almeida, P. A. , "Processamento de Erros Grosseiros em Estimação de Estado de Sistemas de Energia Elétrica", Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, agosto, 1979.

- 27 - Garcia, A.; Monticelli, A.; Abreu, P., "Fast Decoupled State Estimation and Bad Data Processing", IEEE Trans. on PAS, vol. PAS 98, No. 5, Sep/Oc. 1979, pp. 1645-1652.
- 28 - Simões Costa, A. J. A.; Salgado, R. S., "Documentação Interna de Programas", LABSPOT/UFSC.

APÊNDICE ADADOS E CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DOS SISTEMAS TESTESA.1 - Dados do Sistema IEEE-30 barras - SISTEMA I

NÚMERO DE BARRAS: 30

NÚMERO DE LINHAS: 41

LINHA	NA	NB	G	B	B0
1	1	2	0.5225D+01	-0.1565D+02	0.2640D-01
2	1	3	0.1244D+01	-0.5096D+01	0.2040D-01
3	2	4	0.1706D+01	-0.5197D+01	0.1840D-01
4	2	5	0.1136D+01	-0.4772D+01	0.2090D-01
5	2	6	0.1686D+01	-0.5117D+01	0.1870D-01
6	3	4	0.8195D+01	-0.2353D+02	0.4200D-02
7	4	6	0.6413D+01	-0.2231D+02	0.4500D-02
8	4	12	0.0000D+00	-0.3906D+01	0.0000D+00
9	5	7	0.2954D+01	-0.7449D+01	0.1020D-01
10	6	7	0.3590D+01	-0.1103D+02	0.8500D-02
11	6	8	0.6289D+01	-0.2201D+02	0.4500D-02
12	6	9	0.0000D+00	-0.4808D+01	0.0000D+00
13	6	10	0.0000D+00	-0.1799D+01	0.0000D+00
14	6	28	0.4363D+01	-0.1546D+02	0.6500D-02
15	8	28	0.1444D+01	-0.4541D+01	0.2140D-01
16	9	10	0.0000D+00	-0.9091D+01	0.0000D+00
17	9	11	0.0000D+00	-0.4808D+01	0.0000D+00
18	10	17	0.3956D+01	-0.1032D+02	0.0000D+00
19	10	20	0.8751D+00	-0.4619D+01	0.0000D+00
20	10	21	0.5102D+01	-0.1098D+02	0.0000D+00
21	10	22	0.2619D+01	-0.5401D+01	0.0000D+00
22	12	13	0.0000D+00	-0.7143D+01	0.0000D+00
23	12	14	0.1527D+01	-0.3173D+01	0.0000D+00
24	12	15	0.3095D+01	-0.6097D+01	0.0000D+00

25	12	16	0.1952D+01	-0.4104D+01	0.0000D+00
26	14	15	0.2491D+01	-0.2251D+01	0.0000D+00
27	15	18	0.1811D+01	-0.3687D+01	0.0000D+00
28	15	23	0.1968D+01	-0.3976D+01	0.0000D+00
29	16	17	0.1883D+01	-0.4393D+01	0.0000D+00
30	18	19	0.3076D+01	-0.6219D+01	0.0000D+00
31	19	20	0.5882D+01	-0.1176D+02	0.0000D+00
32	21	22	0.1677D+02	-0.3413D+02	0.0000D+00
33	22	24	0.2540D+01	-0.3954D+01	0.0000D+00
34	23	24	0.1461D+01	-0.2989D+01	0.0000D+00
35	24	25	0.1310D+01	-0.2288D+01	0.0000D+00
36	25	26	0.1216D+01	-0.1817D+01	0.0000D+00
37	25	27	0.1969D+01	-0.3760D+01	0.0000D+00
38	27	28	0.0000D+00	-0.2525D+01	0.0000D+00
39	27	29	0.9955D+00	-0.1881D+01	0.0000D+00
40	27	30	0.6875D+00	-0.1294D+01	0.0000D+00
41	29	30	0.9120D+00	-0.1723D+01	0.0000D+00

TELEMEDIDAS

TELEMEDIDAS DE TENSÃO: 7

TELEMEDIDAS DE FLUXO ATIVO: 43

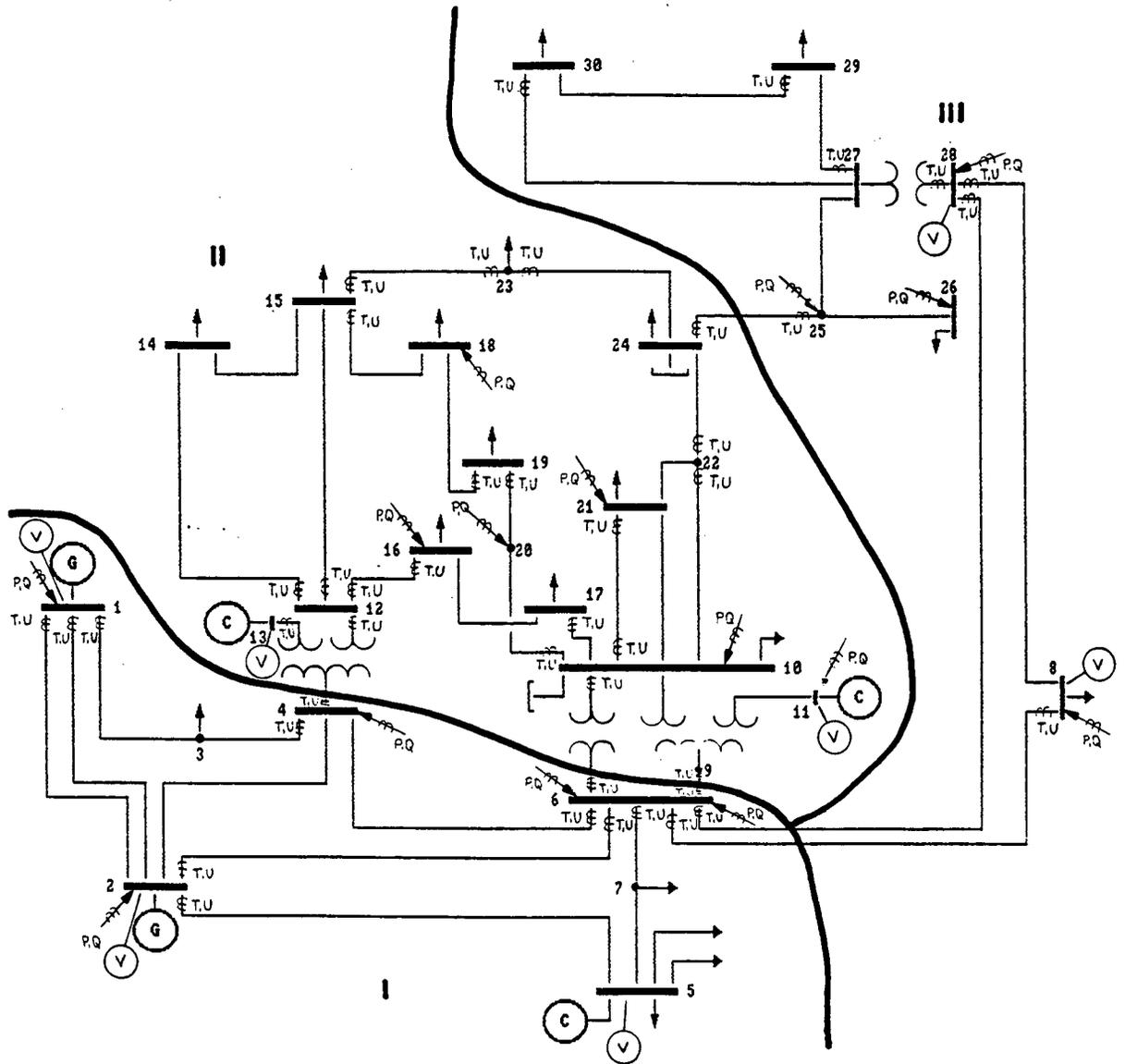
TELEMEDIDAS DE FLUXO REATIVO: 43

TELEMEDIDAS DE INJECAO ATIVA: 15

TELEMEDIDAS DE INJECAO REATIVA: 15

NÚMERO TOTAL DE TELEMEDIDAS: 123

A.2 - Diagrama Unifilar e Plano de Medição do Sistema IEEE-30 barras:



A.3 - Dados do Sistema Sul-sudeste - 91 Barras - Sistema II

NÚMERO DE BARRAS: 91

NÚMERO DE LINHAS: 136

LINE	NA	NB	G	B	B0
1	1	55	0.3059D+01	-0.4733D+02	0.1078D+01
2	1	59	0.1314D+01	-0.2270D+02	0.2312D+01
3	1	88	0.4785D+01	-0.8082D+02	0.6216D+00
4	2	6	0.1632D+01	-0.8497D+01	0.9525D-01
5	2	8	0.5451D+01	-0.3017D+02	0.5195D-01
6	2	9	0.3320D+01	-0.1705D+02	0.4870D-01
7	2	31	0.1623D+01	-0.8402D+01	0.9874D-01
8	3	5	0.1003D+02	-0.5182D+02	0.1610D-01
9	3	12	0.2016D+01	-0.1030D+02	0.8170D-01
10	3	39	0.7158D+01	-0.3677D+02	0.2270D-01
11	4	7	0.2577D+01	-0.1308D+02	0.6465D-01
12	4	39	0.5865D+01	-0.2856D+02	0.3230D-01
13	5	7	0.3209D+01	-0.1597D+02	0.5545D-01
14	6	11	0.1375D+01	-0.7154D+01	0.1130D+00
15	6	61	0.1829D+01	-0.9361D+01	0.8910D-01
16	8	62	0.2014D+01	-0.1247D+02	0.1183D+00
17	9	31	0.2316D+01	-0.1199D+02	0.6921D-01
18	9	62	0.9669D+00	-0.4958D+01	0.1703D+00
19	10	32	0.2251D+01	-0.1153D+02	0.7330D-01
20	10	33	0.2392D+01	-0.1224D+02	0.6903D-01
21	11	12	0.8992D+01	-0.4539D+02	0.1910D-01
22	11	37	0.1044D+01	-0.5401D+01	0.1536D+00
23	13	16	0.1027D+01	-0.5139D+01	0.1696D+00
24	13	21	0.1537D+01	-0.7673D+01	0.1092D+00
25	14	17	0.6043D+01	-0.3389D+02	0.2615D-01
26	14	20	0.8528D+00	-0.4751D+01	0.1884D+00
27	14	25	0.1878D+01	-0.1042D+02	0.3401D+00
28	14	36	0.9816D+00	-0.5451D+01	0.1623D+00
29	15	16	0.1767D+01	-0.7589D+01	0.1102D+00
30	15	18	0.4226D+01	-0.2113D+02	0.4079D-01

31	15	20	0.7884D+00	-0.3937D+01	0.2189D+00
32	16	18	0.1351D+01	-0.6691D+01	0.1331D+00
33	17	20	0.8288D+00	-0.4590D+01	0.1960D+00
34	17	22	0.2364D+01	-0.8780D+01	0.9700D-01
35	17	23	0.1907D+01	-0.7276D+01	0.1183D+00
36	19	35	0.4051D+01	-0.1504D+02	0.5665D-01
37	19	36	0.3992D+01	-0.1480D+02	0.5755D-01
38	20	21	0.3121D+02	-0.1460D+03	0.2700D-01
39	20	23	0.2266D+01	-0.1022D+02	0.8590D-01
40	20	24	0.6902D+02	-0.3613D+03	0.4360D-01
41	20	25	0.1581D+02	-0.8639D+02	0.4132D-01
42	20	36	0.4318D+01	-0.2234D+02	0.3714D-01
43	22	34	0.2102D+01	-0.1051D+02	0.8205D-01
44	24	29	0.0000D+00	-0.1600D+03	0.0000D+00
45	24	35	0.4587D+01	-0.2369D+02	0.1403D+00
46	26	27	0.3871D+01	-0.4888D+02	0.1242D+01
47	26	30	0.3975D+01	-0.5032D+02	0.1206D+01
48	26	47	0.0000D+00	-0.1492D+03	0.0000D+00
49	27	28	0.3622D+01	-0.5110D+02	0.1198D+01
50	27	30	0.6037D+01	-0.7487D+02	0.8163D+00
51	27	37	0.0000D+00	-0.8019D+02	0.0000D+00
52	27	39	0.1615D+01	-0.2911D+02	0.1679D+01
53	28	29	0.2540D+01	-0.3216D+02	0.1887D+01
54	31	32	0.2063D+01	-0.1069D+02	0.3104D+00
55	32	33	0.1174D+01	-0.6068D+01	0.1369D+00
56	32	37	0.2377D+01	-0.1229D+02	0.2704D+00
57	33	34	0.4754D+01	-0.2457D+02	0.1352D+00
58	34	35	0.1595D+01	-0.8167D+01	0.4128D+00
59	35	44	0.9407D+00	-0.4866D+01	0.1705D+00
60	37	38	0.1373D+01	-0.7124D+01	0.1166D+00
61	38	39	0.1492D+01	-0.7659D+01	0.1080D+00
62	39	40	0.3942D+01	-0.2026D+02	0.1655D+00
63	39	41	0.8813D+00	-0.1096D+02	0.2043D+00
64	40	41	0.5714D+01	-0.2947D+02	0.1132D+00
65	41	42	0.1272D+01	-0.6598D+01	0.1255D+00
66	41	43	0.9573D+00	-0.4965D+01	0.1667D+00
67	42	43	0.1731D+01	-0.8977D+01	0.9229D-01

68	43	44	0.7636D+01	-0.3932D+02	0.8450D-01
69	45	48	0.3372D+01	-0.4256D+02	0.2982D+01
70	45	50	0.4067D+01	-0.5375D+02	0.5515D+00
71	45	51	0.6462D+01	-0.8012D+02	0.3762D+00
72	45	81	0.1196D+02	-0.2277D+03	0.7200D-01
73	46	61	0.6829D+01	-0.3880D+02	0.4040D-01
74	46	62	0.4711D+01	-0.2672D+02	0.5870D-01
75	47	68	0.1129D+01	-0.2945D+02	0.8111D+01
76	48	52	0.4248D+01	-0.5492D+02	0.5004D+00
77	48	53	0.3160D+01	-0.4178D+02	0.6595D+00
78	48	57	0.1374D+01	-0.1848D+02	0.1452D+01
79	48	58	0.2600D+01	-0.3247D+02	0.3907D+01
80	49	50	0.0000D+00	-0.2667D+03	0.0000D+00
81	49	64	0.1356D+01	-0.7980D+01	0.1881D+00
82	49	78	0.1563D+02	-0.9853D+02	0.2385D+00
83	50	51	0.6784D+01	-0.8208D+02	0.3661D+00
84	50	52	0.4331D+01	-0.5356D+02	0.2414D+01
85	51	52	0.1667D+01	-0.2088D+02	0.1573D+01
86	51	67	0.4985D+01	-0.5946D+02	0.5410D+00
87	51	80	0.5073D+01	-0.7898D+02	0.3880D+00
88	52	58	0.3071D+01	-0.3936D+02	0.3987D+01
89	52	63	0.3353D+01	-0.4303D+02	0.6720D+00
90	52	67	0.2488D+01	-0.3145D+02	0.1071D+01
91	53	54	0.1822D+01	-0.2545D+02	0.1595D+01
92	53	91	0.2187D+01	-0.2737D+02	0.1105D+01
93	54	57	0.1413D+01	-0.1898D+02	0.1414D+01
94	55	56	0.0000D+00	-0.4878D+02	0.0000D+00
95	56	89	0.1418D+01	-0.1585D+02	0.5336D+00
96	57	58	0.3082D+01	-0.4126D+02	0.6505D+00
97	57	88	0.0000D+00	-0.7143D+02	0.0000D+00
98	59	60	0.0000D+00	-0.9901D+02	0.0000D+00
99	60	83	0.1202D+02	-0.1305D+03	0.6150D-01
100	60	90	0.3415D+01	-0.3757D+02	0.2222D+00
101	61	64	0.1331D+01	-0.6802D+01	0.1244D+00
102	61	79	0.4393D+01	-0.2466D+02	0.6350D-01
103	62	63	0.0000D+00	-0.1398D+02	0.0000D+00
104	64	79	0.2576D+01	-0.1501D+02	0.9810D-01

105	65	66	0.5142D+01	-0.4921D+02	0.1584D+00
106	65	71	0.3657D+01	-0.3259D+02	0.9223D+00
107	65	76	0.3232D+01	-0.3581D+02	0.2326D+00
108	65	82	0.0000D+00	-0.4167D+02	0.0000D+00
109	66	71	0.1402D+01	-0.1562D+02	0.5417D+00
110	66	81	0.0000D+00	-0.5263D+03	0.1680D-01
111	68	69	0.0000D+00	-0.1282D+03	0.0000D+00
112	68	77	0.2446D+01	-0.4709D+02	0.7214D+00
113	69	80	0.6099D+01	-0.6457D+02	0.5548D+00
114	69	81	0.6110D+01	-0.5668D+02	0.2502D+00
115	70	73	0.3209D+01	-0.3102D+02	0.1014D+01
116	70	85	0.2851D+01	-0.3070D+02	0.1052D+01
117	71	72	0.0000D+00	-0.4184D+02	0.0000D+00
118	71	73	0.4945D+01	-0.4512D+02	0.6600D+00
119	71	76	0.2375D+01	-0.2522D+02	0.3352D+00
120	71	83	0.3174D+01	-0.3184D+02	0.1043D+01
121	72	74	0.2748D+01	-0.4097D+02	0.1248D+01
122	72	84	0.2878D+01	-0.4446D+02	0.1150D+01
123	73	83	0.2199D+01	-0.2395D+02	0.3493D+00
124	74	75	0.2341D+01	-0.3588D+02	0.1433D+01
125	74	77	0.6126D+01	-0.8729D+02	0.5175D+00
126	74	85	0.1399D+01	-0.4179D+02	0.2003D+01
127	75	76	0.0000D+00	-0.4587D+02	0.0000D+00
128	75	84	0.2996D+01	-0.4536D+02	0.1124D+01
129	77	91	0.0000D+00	-0.7143D+02	0.0000D+00
130	78	82	0.1825D+02	-0.9256D+02	0.3780D-01
131	83	90	0.2569D+01	-0.2867D+02	0.2820D+00
132	84	86	0.4424D+01	-0.7567D+02	0.2400D+01
133	86	87	0.0000D+00	-0.4167D+02	0.0000D+00
134	86	88	0.3716D+01	-0.5600D+02	0.8594D+00
135	87	89	0.3829D+01	-0.4062D+02	0.2072D+00
136	89	90	0.6766D+01	-0.7183D+02	0.1168D+00

TELEMEDIDAS

TELEMEDIDAS DE TENSÃO: 53

TELEMEDIDAS DE FLUXO ATIVO: 139

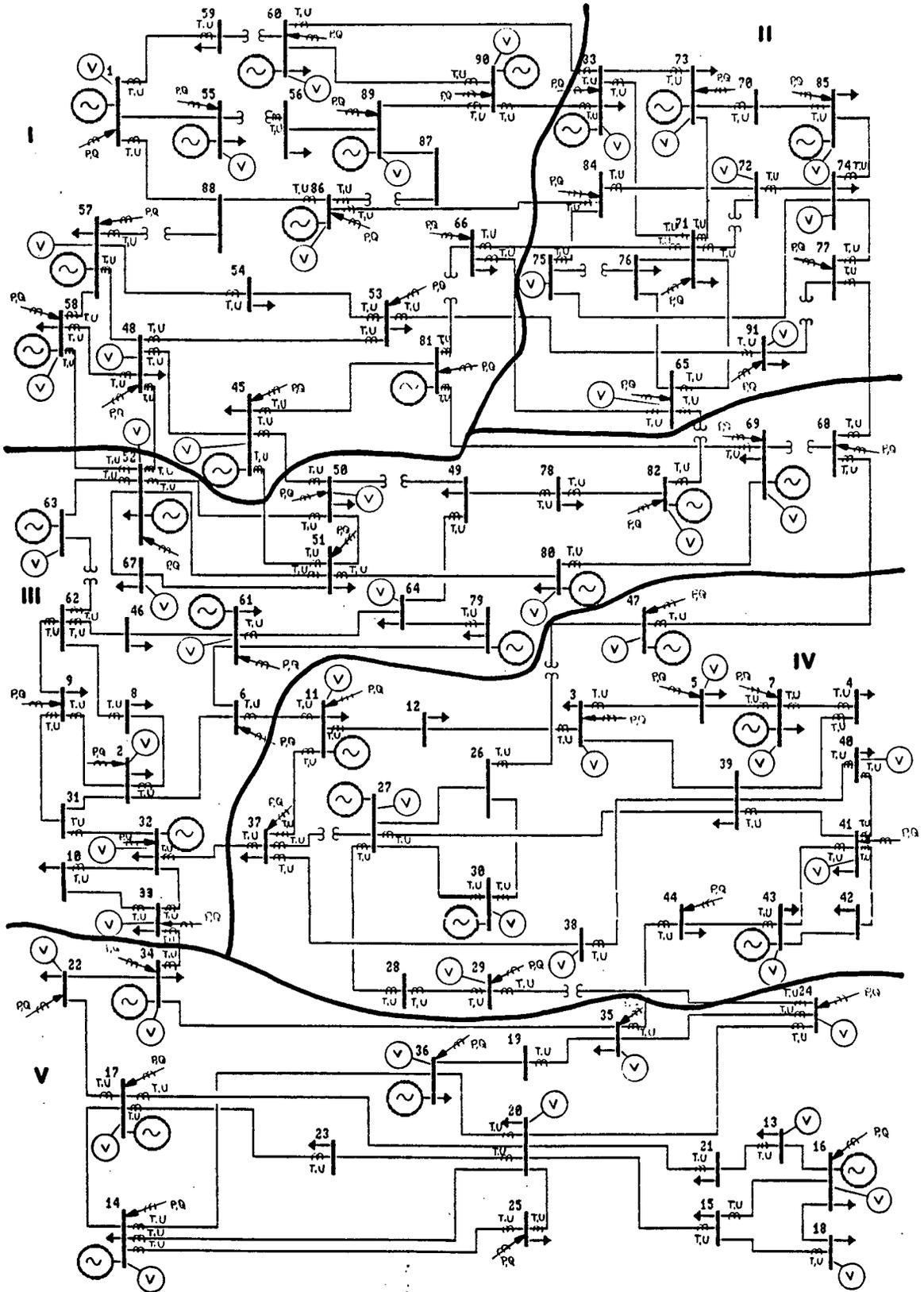
TELEMEDIDAS DE FLUXO REATIVO: 139

TELEMEDIDAS DE INJECAO ATIVA: 51

TELEMEDIDAS DE INJECAO REATIVA: 51

NÚMERO TOTAL DE TELEMEDIDAS: 433

A.4 - Diagrama Unifilar e Plano de Medição do Sistema Sul-sudeste-91 barras:



A.5 - Condições de Operação dos Sistemas-teste Utilizados:

SISTEMA IEEE-30 BARRAS - CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO

----- VARIÁVEIS DE BARRA -----					X	----- FLUXO NAS LINHAS -----			
BARRA	MODULO DE TENSÃO	ÂNGULO	P	Q	LINHA	PARA BARRA	FLUXO ATIVO	FLUXO REATIVO	
1	1.0600	0.0	2.611	-.2178	1	2	1.778	-.2574	
					2	3	.8325	.3964E-01	
2	1.0450	-5.5266	.1830	.4390	1	1	-1.723	.3634	
					3	4	.4571	.2443E-01	
					4	5	.8312	.2721E-01	
					5	6	.6183	.2396E-01	
3	1.0234	-8.0213	-.2400E-01	-.1200E-01	2	1	-.8045	.3095E-01	
					6	4	.7809	-.4219E-01	
4	1.0152	-9.6809	-.7600E-01	-.1600E-01	3	2	-.4461	-.2993E-01	
					6	3	-.7731	.5560E-01	
					7	6	.7031	-.2396E-01	
					8	12	.4404	-.1694E-01	
5	1.0100	-14.3844	-.9420	.1786	4	2	-.8012	.5456E-01	
					9	7	-.1406	.1241	
6	1.0082	-11.3234	.0	.0	5	2	-.5978	-.1360E-02	
					7	4	-.6974	.3467E-01	
					10	7	.3738	-.3726E-01	
					11	8	.2959	.1443E-01	
					12	9	.2800	-.5887E-01	
					13	10	.1569	.2376E-01	
					14	20	.1890	.2533E-01	
7	1.0011	-13.1085	-.2280	-.1090	9	5	.1423	-.1404	
					10	6	-.3701	.3143E-01	
8	1.0039	-12.0137	-.3000	-.3600E-01	11	6	-.2948	-.1988E-01	
					15	20	-.5252E-02	-.1604E-01	
9	1.0220	-14.5623	.0	.0	12	6	-.2800	.7561E-01	
					16	10	.2799	.2191	
					17	11	.0	-.2945	
10	0.9988	-16.2905	-.5800E-01	-.1800E-01	13	6	-.1569	-.9991E-02	
					16	9	-.2799	-.2058	
					18	17	.5527E-01	.1567E-01	

					19	20	.9066E-01	.2754E-01
					20	21	.1570	.1053
					21	22	.7565E-01	.4938E-01
11	1.0820	-14.5623	.0	.3117	17	9	.0	.3117
12	1.0255	-15.8959	-.1120	-.7500E-01	8	4	-.4404	.6518E-01
					22	13	-.2861E-05	-.3324
					23	14	.7971E-01	.3169E-01
					24	15	.1777	.9794E-01
					25	16	.7092E-01	.6287E-01
13	1.0710	-15.8959	.0	.3470	22	12	.2861E-05	.3470
14	1.0082	-16.8098	-.6200E-01	-.1600E-01	23	12	-.7885E-01	-.2989E-01
					26	15	.1682E-01	.1391E-01
15	1.0017	-16.8260	-.8200E-01	-.2500E-01	24	12	-.1751	-.9284E-01
					26	14	-.1672E-01	-.1382E-01
					27	18	.5937E-01	.2572E-01
					28	23	.5034E-01	.5597E-01
16	1.0068	-16.3479	-.3500E-01	-.1800E-01	25	12	-.7012E-01	-.6118E-01
					29	17	.3509E-01	.4318E-01
17	0.9957	-16.5303	-.9000E-01	-.5800E-01	18	10	-.5516E-01	-.1539E-01
					29	16	-.3484E-01	-.4259E-01
18	0.9898	-17.4162	-.3200E-01	-.9000E-02	27	15	-.5892E-01	-.2481E-01
					30	19	.2692E-01	.1582E-01
19	0.9860	-17.5611	-.9500E-01	-.3400E-01	30	18	-.2685E-01	-.1569E-01
					31	20	-.6812E-01	-.1832E-01
20	0.9896	-17.3257	-.2200E-01	-.7000E-02	19	10	-.9030E-01	-.2565E-01
					31	19	.6829E-01	.1867E-01
21	0.9855	-16.7620	-.1750	-.1120	20	10	-.1558	-.1027
					32	22	-.1920E-01	-.9323E-02
22	0.9859	-16.7417	.0	.0	21	10	-.7505E-01	-.4815E-01
					32	21	.1923E-01	.9369E-02
					33	24	.5582E-01	.3879E-01
23	0.9854	-17.0918	-.3200E-01	-.1600E-01	28	15	-.4978E-01	-.5483E-01
					34	24	.1778E-01	.3884E-01
24	0.9724	-17.0728	-.8700E-01	-.6700E-01	33	22	-.5528E-01	-.3794E-01
					34	23	-.1753E-01	-.3833E-01
					35	25	-.1415E-01	.9280E-02
25	0.9720	-16.6854	.0	.0	35	24	.1421E-01	-.9179E-02
					36	26	.3545E-01	.2373E-01
					37	27	-.4967E-01	-.1453E-01
26	0.9534	-17.1460	-.3500E-01	-.2300E-01				

27	0.9807	-16.1582	.0	.0	36	25	-.3496E-01	-.2299E-01
					37	25	.4998E-01	.1512E-01
					38	28	-.1830	-.4872E-01
					39	29	.6192E-01	.1690E-01
					40	30	.7094E-01	.1690E-01
28	1.0032	-11.9336	.0	.0	14	6	-.1884	-.3630E-01
					15	8	.5256E-02	-.2706E-01
					38	27	.1830	.6348E-01
29	0.9599	-17.4996	-.2400E-01	-.9000E-02	39	27	-.6098E-01	-.1512E-01
					41	30	.3698E-01	.6144E-02
30	0.9479	-9.4654	-.1060	-.1900E-01	40	27	-.6917E-01	-.1356E-01
					41	29	-.3662E-01	-.5450E-02

SISTEMA SUL-SUDESTE - 91 BARRAS - CONDIC0ES DE OPERACAO

----- VARIAVEIS DE BARRA -----					X	----- FLUXO NAS LINHAS -----			
BARRA	MODULO DE TENSAO	ANGULO	P	Q	LINHA	PARA BARRA	FLUXO ATIVO	FLUXO REATIVO	
1	1.0200	0.0	1.803	-5.061	1	55	-4.427	-1.123	
					2	59	3.810	-2.116	
					3	88	2.420	-1.821	
2	0.9673	-3.4680	-.7728	-.4160E-01	4	6	-.1768	-.2579	
					5	8	1.302	-.2920	
					6	9	-.4175	.1545	
					7	31	-1.480	.3538	
3	0.9815	12.9374	-.9962	-.6202	8	5	-.5547	-.1402	
					9	12	.6304	-.2114	
					10	39	-1.072	-.2685	
4	0.9955	14.0792	-1.004	-.4358	11	7	-.7986	-.4901	
					12	39	-.2052	.5432E-01	
5	0.9860	13.5217	-.5998	-.5598	8	3	.5560	.1153	
					13	7	-1.156	-.6751	
6	0.9913	-2.4889	-.2522	.6280E-01	4	2	.1782	.8245E-01	
					14	11	-1.334	.3389	
					15	61	.9038	-.3586	
7	1.0400	16.9914	1.988	1.085	11	4	.8106	.4170	

8	0.9686	-6.1107	-1.010	-.2832	13	5	1.177	.6678
					5	2	-1.291	.2549
9	0.9608	-1.8781	-.9452	-.2662	16	62	.2810	-.5381
					6	2	.4200	-.2320
10	1.0167	21.7132	-.1554	-.5440E-01	17	31	-1.819	.3790
					18	62	.4541	-.4131
11	0.9841	8.8328	-.3001	-.1790	19	32	-1.026	.1924
					20	33	.8707	-.2468
12	0.9844	9.2958	-.2640	.2070E-01	14	6	1.386	-.2875
					21	12	-.3579	.3903E-01
13	1.0248	4.2211	-.2200	-.8970E-01	22	37	-1.329	.6949E-01
					9	3	-.6225	.9382E-01
14	1.0390	16.3037	3.594	-.7864	21	11	.3585	-.7312E-01
					23	16	.1881	-.2406
15	1.0093	-0.1545	-.6450	-.2678	24	21	-.4081	.1509
					25	17	.5635	-.1237
16	1.0300	2.1838	.5732	-.1737	26	20	.7476	-.1614
					27	25	1.528	-.2888
17	1.0300	15.4069	1.252	-.2338	28	36	.7550	-.2126
					29	16	-.3572	-.1891
18	1.0060	-0.8218	-.6580	-.2738	30	18	.2644	-.1909E-01
					31	20	-.5522	-.5966E-01
19	1.0226	8.8107	.0	.0	23	13	-.1867	-.1105
					29	15	.3610	-.2365E-01
20	1.0066	7.9278	-2.705	-.4473	32	18	.3989	-.3962E-01
					25	14	-.5619	.7700E-01
21	1.0039	7.4417	-.9200	-.4908	33	20	.6467	-.1685
					34	22	.1613	-.1060
					35	23	1.006	-.3629E-01
					30	15	-.2638	-.6056E-01
					32	16	-.3942	-.2132
					36	35	.2458E-01	.4388E-01
					37	36	-.2457E-01	-.4386E-01
					26	14	-.7282	-.1216
					31	15	.5681	-.3056
					33	17	-.6316	-.1545
					38	21	1.336	.1005
					39	23	-.3951E-01	.6234E-01
					40	24	-1.842	.2747
					41	25	-.9067	.2487E-02
					42	36	-.4607	-.3051

					24	13	.4137	-.3474
					38	20	-1.334	-.1434
22	1.0260	14.4732	-.6324	-.1122	34	17	-.1606	-.9645E-01
					43	34	-.4718	-.1575E-01
23	0.9936	8.3162	-.9333	-.3144	35	17	-.9733	-.8244E-01
					39	20	.4000E-01	-.2320
24	1.0067	8.2151	-3.485	-1.024	40	20	1.844	-.3535
					44	29	-5.030	-.3585
					45	35	-.2991	-.3123
25	1.0080	8.5064	-.5830	-.2896	27	14	-1.491	-.2124
					41	20	.9083	-.7721E-01
26	1.0113	16.8288	.0	-3.655	46	27	-6.311	-.8021
					47	30	-8.498	-.7443
					48	47	14.81	-2.109
27	1.0200	24.0154	15.06	-5.332	46	26	6.374	-.9637
					49	28	5.126	-2.189
					50	30	-2.982	-1.207
					51	37	1.604	-.1304
					52	39	4.938	-.8418
28	1.0358	18.5239	.0	-1.000	49	27	-5.090	.1653
					53	29	5.090	-1.166
29	1.0094	9.9879	.0	-1.499	44	24	5.030	.5152
					53	28	-5.030	-2.014
30	1.0285	26.1566	11.60	-.7574	47	26	8.608	-.3663
					50	27	2.992	-.3911
31	0.9664	7.6185	.0	.0	7	2	1.537	-.2453
					17	9	1.878	-.2021
					54	32	-3.415	.4474
32	1.0150	26.7217	6.500	-.9105	19	10	1.044	-.2528
					54	31	3.643	.1225
					55	33	.9860	-.2815
					56	37	.8348	-.4987
33	1.0195	17.7744	-1.461	-.1371	20	10	-.8589	.1638
					55	32	-.9564	.1511
					57	34	.3540	-.4520
34	1.0290	16.8867	1.359	-.4379	43	22	.4757	-.1377
					57	33	-.3524	.1767
					58	35	1.236	-.4769
35	1.0159	8.8217	-1.119	-.4274	36	19	-.2439E-01	-.1609
					45	24	.3000	.3015E-01
					58	34	-1.202	-.2160

36	1.0220	8.9108	-.2501	.1310	59	44	-.1926	-.8068E-01
					28	14	-.7377	-.3347E-01
					37	19	.2459E-01	-.7634E-01
					42	20	.4630	.2409
37	1.0218	22.9161	-.4494	-.8390E-01	22	11	1.393	-.4448E-01
					51	27	-1.604	.1614
					56	32	-.8239	-.5395E-02
					60	38	.5848	-.1955
38	1.0197	18.4534	.0	.0	60	37	-.5761	-.2484E-02
					61	39	.5761	.2477E-02
39	0.9941	14.5128	-.9054	-1.536	10	3	1.078	.2572
					12	4	.2055	-.1165
					52	27	-4.892	-1.734
					61	38	-.5680	-.1798
					62	40	2.178	.2498
					63	41	1.093	-.1293E-01
40	0.9593	8.5102	-2.312	-.8236	62	39	-2.132	-.3292
					64	41	-.1804	-.4944
41	0.9738	8.7202	-1.330	-.4172	63	39	-1.084	-.2697
					64	40	.1817	.2896
					65	42	-.7035E-02	-.1741
					66	43	-.4205	-.2629
42	0.9823	8.6887	-.7502	-.2694	65	41	.7130E-02	-.6542E-01
					67	43	-.7573	-.2040
43	1.0140	13.2354	2.716	.5577E-01	66	41	.4279	-.2821E-01
					67	42	.7699	.8535E-01
					68	44	1.518	-.1373E-02
44	1.0055	11.1664	-1.313	-.3746	59	35	.1943	-.2588
					68	43	-1.508	-.1158
45	1.0300	-28.3364	-1.393	-2.217	69	48	-7.821	-1.125
					70	50	.8632E-01	-.4094
					71	51	.3800	-.4290
					72	81	5.962	-.2537
46	1.0021	-8.3586	-.4494	-.1141	73	61	-.1660	-.1686
					74	62	-.2834	.5444E-01
47	1.0300	11.3633	4.186	1.717	48	26	-14.81	3.575
					75	68	18.99	-1.858
48	1.0141	-18.0567	-3.099	-6.496	69	45	7.935	-3.669
					76	52	-2.589	-.9564
					77	53	8.099	.9448
					78	57	-5.550	-.8509
					79	58	-11.00	-1.965

49	1.0233	-30.7641	-7.812	-1.074	80	50	-11.51	-.6946
					81	64	-1.633	.4150
					82	78	5.331	-.7950
50	1.0267	-28.4096	-.8070	-.3630	70	45	-.8630E-01	-.7564
					80	49	11.51	1.170
					83	51	.2544	-.6843
					84	52	-12.49	-.9267E-01
51	1.0300	-28.5925	-6.067	-.5269	71	45	-.3799	-.3675
					83	50	-.2542	-.8835E-01
					85	52	-4.944	-.6235
					86	67	-2.427	-.5654
					87	80	1.939	1.118
52	1.0266	-15.5110	10.25	-6.733	76	48	2.598	.3584E-01
					84	50	12.72	-2.148
					85	51	5.036	-1.558
					88	58	-11.73	-1.909
					89	63	-4.709	.1082
					90	67	6.340	-1.262
53	0.9797	-29.0732	-9.566	-3.488	77	48	-7.980	-.6768
					91	54	-4.062	-1.400
					92	91	2.476	-1.411
54	0.9994	-19.7160	-2.061	-1.880	91	53	4.110	-1.050
					93	57	-6.171	-.8296
55	1.0300	5.0862	11.26	-.2366	1	1	4.453	-.7453
					94	56	6.809	.5086
56	1.0288	-2.4833	-6.507	-.2156	94	55	-6.809	.3925
					95	89	.3024	-.6081
57	1.0450	-1.5477	10.26	.1046	78	48	5.671	-.5946
					93	54	6.321	-.1110
					96	58	-1.894	-.9317E-01
					97	88	.1638	.9033
58	1.0350	0.9303	25.19	-6.884	79	48	11.29	-2.516
					88	52	12.00	-3.141
					96	57	1.901	-1.226
59	1.0113	-9.2907	-2.207	-2.395	2	1	-3.775	-2.038
					98	60	1.568	-.3567
60	1.0150	-10.1745	-4.545	-1.410	98	59	-1.568	.3822
					99	83	.3812	-1.433
					100	90	-3.359	-.3586
61	1.0060	-8.1547	2.341	-.2261	15	6	-.8856	.2741
					73	46	.1662	.8821E-01
					101	64	1.306	-.2493

62	0.9998	-7.7289	.0	.0	102	79	1.754	-.3391
					16	8	-.2775	.3305
					18	9	-.4429	.1129
					74	46	.2840	-.1687
					103	63	.4364	-.3047
63	1.0221	-9.4794	4.312	-.6928	89	52	4.748	-1.018
					103	62	-.4364	.3249
64	1.0050	-18.8936	-1.334	.7111E-01	81	49	1.693	-.4483
					101	61	-1.259	.2386
					104	79	-1.767	.2808
65	1.0278	-32.3312	-6.991	.3130	105	66	-2.111	.7257E-01
					106	71	-4.215	.5240E-01
					107	76	-1.441	.2767
					108	82	.7760	-.8853E-01
66	1.0282	-30.0032	-1.720	-1.389	105	65	2.120	-.3214
					109	71	-1.371	-.2482
					110	81	-2.469	-.8196
67	1.0339	-26.4105	-3.810	-.2980	86	51	2.435	-.4941
					90	52	-6.245	.1960
68	0.9974	-26.8255	.0	-3.297	75	47	-18.50	-1.833
					111	69	12.70	-1.368
					112	77	5.796	-.9695E-01
69	1.0130	-32.4521	-18.54	1.771	111	68	-12.70	2.647
					113	80	-2.950	-.2505E-01
					114	81	-2.884	-.8513
70	0.9921	-38.0292	.0	.0	115	73	-10.46	1.066
					116	85	10.46	-1.066
71	1.0195	-25.1377	-5.278	-.8800	106	65	4.276	-1.445
					109	66	1.382	-.7683
					117	72	.6781	.8581
					118	73	-5.498	.2233
					119	76	2.265	-.4251
					120	83	-8.379	.6775
72	0.9995	-26.0490	.0	-1.359	117	71	-.6781	-.8305
					121	74	8.077	-.5073
					122	84	-7.399	-.2161E-01
73	1.0200	-18.3669	12.95	-.2991	115	70	10.84	.5662
					118	71	5.570	-.9414
					123	83	-3.466	.7607E-01
74	0.9878	-37.4445	-4.894	-2.588	121	72	-7.970	-.3575
					124	75	-6.294	-1.240
					125	77	-5.139	.2144

75	1.0105	-27.3502	.0	.0	126	85	14.51	-1.205
76	1.0180	-30.0728	-3.041	-3.3770	124	74	6.368	-.4935
77	0.9855	-33.9604	.0	-1.800	127	76	2.242	-.2921
78	1.0218	-33.7043	-6.062	-1.270	128	84	-8.609	.7856
79	1.0070	-12.1657	.7100E-01	.6292E-01	107	65	1.447	-.7018
80	1.0100	-29.0709	1.029	-2.829	119	71	-2.246	-.7639E-01
81	1.0297	-29.7494	-5.851	1.520	127	75	-2.242	.4012
82	1.0300	-33.3392	.0	.7277	112	68	-5.759	-.5977
83	1.0250	-10.3869	9.056	.2497	125	74	5.161	-.9073
84	0.9991	-16.4001	.0	-2.920	129	91	.5900	-.2948
85	1.0200	-57.5391	-24.46	4.863	82	49	-5.288	.5677
86	1.0100	-4.1095	13.60	-3.282	130	82	-7.740	-.6947
87	1.0222	-3.7953	.0	.0	102	61	-1.732	.3329
88	1.0329	-1.6694	.0	.0	104	64	1.803	-.2700
89	1.0300	-3.5201	2.340	-7.419	87	51	-1.934	-1.853
					113	69	2.963	-.9756
					72	45	-5.954	.2479
					110	66	2.469	.7961
					114	69	2.900	.4767
					108	65	-.7760	.1024
					130	78	.7760	.6253
					99	60	-.3798	1.320
					120	71	0.598	-.6634
					123	73	3.510	-.3208
					131	90	-2.673	-.8601E-01
					122	72	7.400	-1.019
					128	75	8.720	-1.381
					132	86	-16.20	-.5201
					116	70	-10.13	2.527
					126	74	-14.34	2.337
					132	84	16.41	-.8149
					133	87	-.2359	-.5129
					134	88	-2.570	-1.954
					133	86	.2359	.5203
					135	89	-.2359	-.5204
					3	1	-2.415	.5966
					97	57	-.1638	-.8925
					134	86	2.579	.2955
					95	56	-.3019	-.5172
					135	87	.2362	.8763E-01

90	1.0300	-5.3266	3.600	.5084E-01	136	90	2.406	-.3123
					100	60	3.385	.1834
					131	83	2.694	-.2728
					136	89	-2.399	.1402
91	0.9897	-34.4522	-3.055	-.1940	92	53	-2.457	-.4952
					129	77	-.5980	.3012

APÊNDICE BRESULTADOS: COMPARAÇÕES ENTRE OS ALGORITMOS HIERÁRQUICOS E O ESTIMADOR
INTEGRADOB.1 - Tensões nas Barras de Fronteira: Sistema I

barra	Est. Int.	Nível Local	Erro %	Van Cutsem	Erro %
04	1.0138	1.0150	0.118	1.0149	0.108
06	1.0068	1.0080	0.119	1.0069	0.010
09	1.0198	1.0120	0.765	1.0132	0.647
10	0.9973	0.9897	0.762	0.9899	0.742
12	1.0240	1.0220	0.195	1.2239	0.166
24	0.9710	0.9634	0.783	0.9645	0.669
08	1.0027	1.0050	0.229	1.0047	0.199
25	0.9708	0.9746	0.391	0.9734	0.268
28	1.0020	1.0050	0.299	1.0043	0.229

B.2 - Tensões nas Barras de Fronteira: Sistema II

barra	Est. Int.	Nível Local	Erro %	Van Cutsem	Erro %
45	1.0301	1.0260	0.398	1.0261	0.388
48	1.0142	1.0120	0.217	1.0119	0.227
53	0.9799	0.9783	0.163	0.9782	0.173
58	1.0354	1.0350	0.039	1.0346	0.079
60	1.0156	1.0150	0.059	1.0144	0.120
66	1.0284	1.0240	0.428	1.0244	0.387
81	1.0299	1.0260	0.379	1.0260	0.379
86	1.0100	1.0090	0.099	1.0086	0.139
90	1.0304	1.0300	0.039	1.0293	0.107
65	1.0279	1.0260	0.185	1.0241	0.370
71	1.0198	1.0170	0.275	1.0159	0.378
77	0.9853	0.9829	0.244	0.9821	0.325
83	1.0255	1.0230	0.244	1.0242	0.127
84	0.9991	0.9947	0.440	0.9978	0.130
91	0.9896	0.9874	0.222	0.9873	0.232
06	0.9917	0.9872	0.454	0.9919	0.020
32	1.0147	1.0120	0.266	1.0168	0.207
33	1.0188	1.0170	0.177	1.0174	0.137
50	1.0269	1.0240	0.282	1.0227	0.409
51	1.0302	1.0270	0.311	1.0261	0.398
52	1.0267	1.0230	0.360	1.0252	0.146
68	0.9971	0.9933	0.381	0.9938	0.331
69	1.0127	1.0090	0.365	1.0090	0.365
82	1.0302	1.0270	0.311	1.0279	0.223
11	0.9843	0.9875	0.325	0.9855	0.122
29	1.0093	1.0130	0.367	1.0119	0.258
37	1.0215	1.0250	0.343	1.0239	0.235
44	1.0053	1.0080	0.269	1.0064	0.109

Tensões nas barras de Fronteira: Sistema II - Continuação

barra	Est. Int.	Nível Local	Erro %	Van Cutsem	Erro %
47	1.0299	1.0330	0.301	1.0311	0.116
24	1.0067	1.0060	0.069	1.0092	0.248
34	1.0282	1.0270	0.117	1.0268	0.136
35	1.0159	1.0150	0.089	1.0162	0.029

B.3 - Ângulos nas Barras de Fronteira: Sistema I

barra	Est. Int.	Van Cutsem	Erro %	Lo	Erro %	Kurzyn	Erro %
04	-9.5626	-9.2512	3.257	-9.5300	0.341	-9.5300	0.341
06	-11.205	-11.170	0.309	-11.170	0.310	-11.170	0.310
09	-14.446	-14.471	0.174	-14.436	0.092	-14.502	0.391
10	-16.161	-16.248	0.535	-16.213	0.317	-16.279	0.731
12	-15.718	-15.682	0.226	-15.639	0.503	-15.705	0.079
24	-16.946	-17.031	0.503	-17.026	0.471	-17.092	0.866
08	-11.885	-11.866	0.165	-11.890	0.039	-11.980	0.800
25	-16.515	-16.380	0.814	-16.372	0.865	-16.462	0.318
28	-11.802	-11.775	0.233	-11.793	0.074	-11.884	0.692

B.4 - Ângulos nas barras de fronteira: Sistema II

barra	Est. Int.	Van Cutsem	Erro %	Lo	Erro %	Kurzyn	Erro %
45	-28.321	-28.559	0.847	-28.560	0.847	-28.560	0.847
48	-18.077	-18.343	1.438	-18.340	1.438	-18.340	1.438
53	-29.056	-29.222	0.551	-29.170	0.379	-29.170	0.379
58	0.9002	0.5989	33.47	0.5989	33.47	0.5989	33.47
60	-10.206	-10.242	2.938	-10.210	0.004	-10.210	0.004
66	-29.989	-30.117	0.429	-30.250	0.871	-30.250	0.871
81	-29.738	-30.000	0.881	-30.000	0.881	-30.000	0.881
86	-4.2378	-4.2382	0.009	-4.2450	0.170	-4.2450	0.170
90	-5.3245	-5.3436	0.359	-5.3010	0.441	-5.3010	0.441
65	-32.309	-32.409	0.310	-32.348	0.120	-32.416	0.331
71	-25.127	-25.318	0.760	-25.258	0.523	-25.326	0.793
77	-33.913	-34.252	1.002	-34.218	0.901	-34.286	1.131
83	-10.422	-10.440	0.169	-10.438	0.154	-10.506	0.805
84	-16.504	-16.483	0.130	-16.348	0.946	-16.416	0.535
91	-34.448	-34.674	0.657	-34.782	0.971	-34.850	1.168
06	-2.3798	-2.3723	0.315	-2.3322	2.000	-2.4381	2.450
32	26.716	26.885	0.631	26.962	0.919	26.863	0.549
33	17.773	18.058	1.604	18.032	1.456	17.933	0.899
50	-28.394	-28.634	0.847	-28.618	0.790	-28.717	1.139
51	-28.573	-28.813	0.839	-28.778	0.716	-28.877	1.062
52	-15.545	-15.898	2.268	-15.898	2.271	-15.997	2.907
68	-26.831	-27.178	1.293	-26.918	0.561	-27.017	0.692
69	-32.484	-32.726	0.745	-32.738	0.783	-32.837	1.088
82	-33.306	-33.405	0.295	-33.578	0.816	-33.677	1.112
11	8.9050	9.0853	2.025	9.0123	1.205	8.9620	0.640
29	9.9885	10.276	2.881	10.233	2.445	10.182	1.937
37	22.885	23.086	0.880	23.014	0.561	22.963	0.357
44	11.153	11.429	2.468	11.256	0.914	11.205	0.462

Ângulos nas barras de Fronteira: Sistema II - Continuação

barra	Est. Int.	Van Cutsem	Erro %	Lo	Erro %	Kurzyn	Erro %
47	11.383	11.604	1.945	11.567	1.117	11.516	1.563
24	8.2172	8.5322	3.833	8.4732	3.115	8.3422	1.521
34	16.875	17.165	1.723	17.145	1.602	17.014	0.825
35	8.8550	9.1181	2.971	9.1182	2.972	8.9870	2.974

B.5 - Fluxos nas linhas de intercâmbio: Sistema I

linha	para barra	Est. Int.	Van Cutsem	Erro %	Lo	Erro %	Kurzyn	Erro %
08	12	0.4348	0.4349	0.023	0.4312	0.828	0.4387	0.897
11	08	0.2909	0.2952	1.478	0.2997	3.025	0.2857	1.788
12	09	0.2791	0.2818	0.967	0.2794	0.108	0.2850	2.114
13	10	0.1560	0.1587	1.731	0.1577	1.090	0.1586	1.667
14	28	0.1843	0.1874	1.682	0.1839	2.170	0.1795	2.604
12	06	-0.2791	-0.2818	0.967	-0.2794	0.107	-0.2850	2.114
13	06	-0.1560	-0.1587	1.731	-0.1577	1.090	-0.1586	1.667
08	04	-0.4348	-0.4349	0.030	-0.4312	0.828	-0.4387	0.897
35	25	-0.0158	-0.0354	123.9	-0.0386	143.6	-0.0289	88.88
11	06	-0.2889	-0.2941	1.449	-0.2986	3.001	-0.2847	1.794
35	24	0.0159	0.0357	124.5	0.0389	144.6	0.0292	83.65
14	06	-0.1838	-0.1868	1.632	-0.1834	0.218	-0.1789	2.666

B.6 - Fluxos nas linhas de intercâmbio: Sistema II

linha	para barra	Est. Int.	Van Cutsem	Erro %	Lo	Erro %	Kurzyn	Erro %
70	50	0.0858	0.0877	2.182	0.0656	23.52	0.0834	2.808
71	51	0.3742	0.3747	1.277	0.3149	15.85	0.3682	1.603
76	52	-2.5760	-2.5804	0.188	-2.4657	4.282	-2.5480	1.087
92	91	2.4840	2.5017	0.712	2.5766	3.728	2.4858	0.073
88	52	12.010	12.019	0.081	12.007	0.023	12.121	0.922
99	83	0.3913	0.3889	0.613	0.4421	12.98	0.3978	1.661
105	65	2.1130	2.0709	1.992	1.8861	10.74	2.0259	4.122
109	71	-1.3710	-1.3810	0.729	-1.4000	2.115	-1.3865	1.131
114	69	2.9470	2.9030	1.493	2.9169	1.021	2.9052	1.418
132	84	16.370	16.299	0.473	16.087	1.731	16.647	1.690
131	83	2.7160	2.7092	0.250	2.7346	0.685	2.7306	0.538
105	66	-2.1040	-2.0622	1.787	-1.8789	10.70	-2.0175	4.111
108	82	0.7679	0.7636	0.560	0.9424	22.72	1.0622	38.33
109	66	1.3820	1.3919	0.716	1.4111	2.106	1.3974	1.114
112	68	-5.7150	-5.6697	0.793	-5.8470	2.310	-5.6239	1.594
131	90	-2.6940	-2.6877	0.171	-2.7127	0.694	-2.7088	0.549
99	60	-0.3900	-0.3875	0.641	-0.4411	3.103	-0.3968	1.744
132	86	-16.170	-16.097	0.454	-15.888	1.742	-16.434	1.635
92	53	-2.4650	-2.4824	0.706	-2.5562	3.700	-2.4668	0.073
14	11	-1.3310	-1.3536	1.698	-1.3470	1.202	-1.3769	3.449
56	37	0.8400	0.8357	0.512	0.8521	1.440	0.8134	3.167
57	34	0.3588	0.3549	1.087	0.3494	2.620	0.3522	1.840
70	45	-0.0857	-0.0876	2.217	-0.0656	23.45	-0.0834	2.684
71	45	-0.3741	-0.3745	0.107	-0.3147	15.88	-0.3681	1.604
88	58	-11.740	-11.751	0.095	-11.739	0.008	-11.847	0.915
76	48	2.5850	2.5902	0.201	2.4743	4.282	2.5571	1.079
112	77	5.7520	5.7063	0.795	5.8861	2.331	5.6599	1.601
75	47	-18.500	-18.535	0.191	-18.600	0.541	-18.485	0.080

Fluxos nas linhas de intercâmbio: Sistema II - Continuação

linha	para barra	Est. Int.	Van Cutsem	Erro %	Lo	Erro %	Kurzyn	Erro %
114	81	-2.9300	-2.8870	1.468	-2.9007	1.000	-2.8891	1.395
108	65	-0.7679	-0.7636	0.560	-0.9424	22.72	-1.0622	38.33
14	06	1.3830	1.4072	1.750	1.3994	1.186	1.4317	3.521
44	24	5.0250	4.9730	1.035	5.0064	0.370	4.9920	0.657
56	32	-0.8289	-0.8247	0.507	-0.8400	1.339	-0.8023	3.209
59	35	0.1901	0.1921	1.052	0.1797	5.471	0.1965	3.367
75	68	19.000	19.035	0.182	19.106	0.558	18.983	0.088
44	29	-5.0250	-4.9730	1.035	-5.0064	0.370	-4.9920	0.657
57	33	-0.3572	-0.3533	1.092	-0.3477	2.659	-0.3505	1.876
59	44	-0.1884	-0.1905	1.115	-0.1784	5.308	-0.1949	3.450