

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

**“IDENTIFICAÇÃO DE ERROS DE TOPOLOGIA EM
SISTEMAS DE POTÊNCIA UTILIZANDO TÉCNICAS DE
SISTEMAS ESPECIALISTAS”**

**Tese Submetida à Universidade Federal de Santa Catarina Para
Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia**

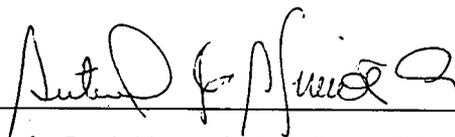
SILVIA GALVÃO DE SOUZA

Florianópolis,^{25,} Agosto de 1995.

Identificação de Erros de Topologia em Sistemas de Potência utilizando Técnicas de Sistemas Especialistas

Silvia Galvão de Souza

“Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia Elétrica,
e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação.”



Antonio José Alves Simões Costa, Ph. D.
Orientador



Ênio Valmor Kassick, Dr. Ing.
Coordenador de Pós-Graduação

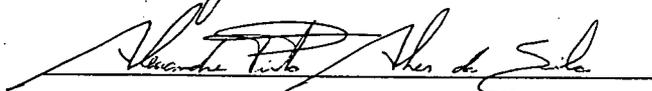
Banca Examinadora:



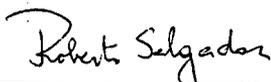
Antonio José Alves Simões Costa, Ph. D.
Orientador



Luiz Jairo Branco Machado, Dr. Ing.
Co-orientador



Alexandre Pinto Alves da Silva, Ph. D.



Roberto de Souza Salgado, Ph. D.

A Deus, sem o qual nada do que
fiz e faço teria sentido.

Para minha amada irmã, a pessoa que mais contribui para
minha formação e crescimento, sem a qual os
caminhos seriam mais difíceis

Célia

Para minha mãe

Mercedes

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Simões pela valiosa orientação e amizade que muito contribuíram para minha formação.

Ao Professor Jairo pela co-orientação, amizade e discussões e à banca examinadora cujas sugestões muito acrescentaram ao trabalho.

Pelas instalações e toda infra-estrutura proporcionadas pela Universidade Federal de Santa Catarina.

Pelos recursos proporcionados pela CAPES.

Ao Grupo de Sistemas de Potência, que além de fornecer suporte técnico, agrega pessoas muito especiais que contribuíram com alegria, eficiência e amizade em todos os momentos.

Deixo agradecimentos especiais a Jacqueline, a Ruth e a André Della Rocca pela amizade e pela disposição de ouvir e dar sugestões ao trabalho.

Ao destino, que me trouxe até Florianópolis e me permitiu compartilhar do cotidiano de pessoas tão especiais como Gilmar, Anne, André Lerm, Andréa, Fernando Mussoi, Denise, Carla, Javier, Roberto, Andriano, Cícero, Udo e tantas outras que conheci na pós-graduação. Os bons momentos ficarão gravados para sempre na lembrança de bons tempos!

RESUMO

A identificação de erros de topologia na modelagem em tempo real de Sistemas de Potência é um problema ainda não satisfatoriamente resolvido, tendo em vista os aspectos de tempo computacional e coerência dos resultados. A revisão da literatura recente revela as dificuldades de se obter soluções satisfatórias para o problema através do uso de métodos e ferramentas puramente analíticas.

A partir destas constatações, propõe-se neste trabalho a utilização de técnicas de Sistemas Especialistas baseados em regras capazes de comprovar ou refutar hipóteses sobre a presença de erros de topologia no modelo em tempo real de Sistemas de Potência.

O SEIDET (Sistema Especialista para Identificação de Erros de Topologia), escrito em linguagem PROLOG, utiliza como dados de entrada os resultados de um programa de pré-filtragem de medidas que detecta e identifica erros grosseiros simples e múltiplos. A partir das medidas suspeitas de estarem contaminadas por erros grosseiros, busca-se a identificação de erros de topologia do tipo inclusão ou exclusão indevida de elementos na rede ou má configuração de subestações do sistema.

Os resultados obtidos através de simulações em sistemas de potência de 30, 57 e 75 barras mostram que os diagnósticos fornecidos pelo SEIDET são confiáveis, desde que seja garantida a redundância global e local do plano de medição utilizado para o sistema. Os resultados obtidos com os três sistemas-teste incluídos ilustram a metodologia utilizada e o desempenho da abordagem proposta.

ABSTRACT

The identification of topology errors in real-time power system modeling is a problem which still needs more research efforts until a reliable and computationally efficient method is produced. A review of the recent literature on the subject reveals the difficulties in obtaining satisfactory performances from purely analytical methods.

Those considerations have led to the investigation on the use of knowledge-based approaches based on rules capable of accepting or rejecting hypotheses related to the presence of topology errors in the power system real-time model. This work proposes an Expert System with those characteristics, which is referred to as SEIDET ("Expert System for Topology Error Identification"). SEIDET is written in PROLOG and processes the results of a previously executed pre-filtering program which identifies bad data among the measurements used for power system monitoring. It is devised to verify whether the bad data are symptoms of topology errors; in that case, SEIDET identifies those errors. The types of topology errors contemplated in this work are inclusion and exclusion of network elements and bus-split errors in the configuration of substations.

Results obtained from simulations for 30-bus, 57-bus and 75-bus test-systems indicate that the diagnoses provided by SEIDET are reliable, as long as both global and local redundancies of the power system metering schemes are satisfactory. The results illustrate both the methodology and performance of the proposed approach.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - MODELAGEM EM TEMPO REAL DE SISTEMAS DE POTÊNCIA, ERROS GROSSEIROS E ERROS DE TOPOLOGIA-----	1
1.2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA-----	3
1.3 - CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO -----	4
1.4 - ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO-----	5

CAPÍTULO 2

ERROS DE TOPOLOGIA NA MODELAGEM EM TEMPO REAL DE SISTEMAS DE POTÊNCIA

2.1 - INTRODUÇÃO -----	7
2.2 - TIPOS DE ERROS DE TOPOLOGIA -----	8
2.3 - EFEITOS DE ERROS DE TOPOLOGIA NA MODELAGEM EM TEMPO REAL----	11
2.4 - PROCESSAMENTO DE ERROS DE TOPOLOGIA -----	13
2.4.1 - Condições para a Identificação de Erros de Topologia-----	13
2.4.2 - Métodos para Identificação de Erros de Topologia. -----	15
2.5 - CONCLUSÕES -----	22

CAPÍTULO 3

SISTEMAS ESPECIALISTAS

3.1 - INTRODUÇÃO -----	24
3.2 - CONCEITOS BÁSICOS DE SISTEMAS ESPECIALISTAS-----	24
3.2.1 - Organização do Conhecimento-----	25
3.2.2 - Base de conhecimento (BC)-----	26
3.2.3 - Memória de Trabalho-----	27
3.2.4 - Mecanismo de Inferência (MI) -----	28
3.3 - RESOLUÇÃO DE CONFLITOS -----	29
3.4 - VALIDAÇÃO -----	30
3.5 - FERRAMENTAS PARA DESENVOLVIMENTO DE UM SE -----	30
3.6 - SISTEMAS ESPECIALISTAS APLICADOS À SISTEMAS DE POTÊNCIA-----	31
3.7 - CONCLUSÕES -----	33

CAPÍTULO 4

MÉTODO PARA PRÉ-FILTRAGEM DE MEDIDAS

4.1 - INTRODUÇÃO -----	35
4.2 - DESCRIÇÃO DO MÉTODO DE PRÉ-FILTRAGEM -----	36
4.3 - EXEMPLO ILUSTRATIVO-----	44
4.4 - CONCLUSÕES -----	49

CAPÍTULO 5

UM SISTEMA ESPECIALISTA PARA IDENTIFICAÇÃO DE ERROS TOPOLÓGICOS

5.1 - INTRODUÇÃO	50
5.2 - DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA ESPECIALISTA	51
5.3 - IMPLEMENTAÇÃO	56
5.3.1 - Aquisição do Conhecimento	56
5.3.2 - Representação do Conhecimento	57
5.3.3 - Estrutura dos Programas utilizados	60
5.3.4 - Índices de Confiança	62
5.4 - EXEMPLO ILUSTRATIVO	63
5.5 - VALIDAÇÃO	68
5.6 - CONCLUSÕES	70

CAPÍTULO 6

RESULTADOS

6.1 - INTRODUÇÃO	71
6.2 - DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO	71
6.2.1 - NEWFLOW	72
6.2.2 - INPNML	72
6.2.3 - PREFIL	73
6.2.4 - SEIDET	73
6.2.5 - Simulações	74
6.3 - SISTEMAS-TESTE	75
6.3.1 - Sistema IEEE 30 barras	75

6.3.2 - Sistema IEEE 57 barras -----	77
6.3.3 - Sistema das Regiões Sul e Sudeste do Brasil -----	79
6.4 - RESULTADOS-----	82
6.4.1 - Sistema IEEE-30 barras-----	82
6.4.2 - Sistema-teste IEEE 57-barras -----	87
6.4.3 - Sistema-teste Sul-Sudeste Brasileiro - 75 barras -----	90
6.5 - CONCLUSÕES -----	94

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

7.1 - CONCLUSÕES -----	95
7.1.1 - Apreciação dos Resultados -----	96
7.2 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS -----	97

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - MODELAGEM EM TEMPO REAL DE SISTEMAS DE POTÊNCIA, ERROS GROSSEIROS E ERROS DE TOPOLOGIA

A Análise de Segurança e monitoração de Sistemas de Potência em Tempo Real busca proporcionar a operação do sistema de forma satisfatória e confiável. Para monitoração do sistema são necessárias informações confiáveis a respeito do ponto de operação em que este se encontra. Necessita-se também de meios para atualização, em tempo real, do banco de dados do sistema. Para desempenhar esta função os principais aplicativos utilizados são a Estimação de Estados em Sistemas de Potência (EESP) e o Configurador de Redes (WU e LIU, 1989).

O estimador de estados processa informações a fim de fornecer todas as variáveis de estados: módulo e ângulo de tensão em todas as barras do sistema. Estas informações podem ser estáticas: informações sobre os parâmetros das linhas, transformadores, capacitores e indutores em conexão transversal (elementos “*shunt*”), ou seja, o modelo da rede; ou dinâmicas: informações medidas incluindo fluxos e injeções de potência, tensões e posições das chaves e disjuntores (SINGH e OESCH, 1994). As informações dinâmicas são ainda divididas entre lógicas: posições das chaves e disjuntores, que são as informações utilizadas pelo Configurador de Redes; e analógicas: fluxos e injeções de potência e tensões (WU e LIU, 1989).

Os dados dinâmicos analógicos podem estar contaminados por erros aleatórios de medição, que são ruídos normais, inerentes ao próprio sistema; erros grosseiros de medição, que podem ser simples: quando ocorrem em uma única medida; ou múltiplos: quando ocorrem em mais de uma medida ao mesmo tempo, são provenientes de falhas nos medidores, nos instrumentos de medição, TP's e TC's, nos transdutores, no sistema de transmissão de dados, etc. Nos dados estáticos podem ocorrer erros de parâmetros, por imprecisão nos cálculos das características dos componentes do sistema, por alteração devido a envelhecimento dos equipamentos ou ainda devido a alterações das condições ambientais.

Os erros que podem ocorrer nos dados dinâmicos digitais, de natureza lógica, são chamados de erros topológicos. São provenientes de falhas nas informações das posições das chaves e disjuntores provocando má configuração de um ou mais elementos da rede, e desta forma, uma falsa configuração do sistema (WU e LIU, 1989).

A Estimação de Estados filtra naturalmente os erros aleatórios e processa também os erros grosseiros em medidas possibilitando sua detecção e identificação, através da análise dos resíduos normalizados das medidas (HANDSCHIN e outros, 1975). Surgem problemas quando ocorrem erros topológicos no sistema, pois os efeitos destes erros são iguais aos efeitos dos erros grosseiros múltiplos em medidas, no processamento da estimação de estados.

São muitos os trabalhos que tratam da identificação e detecção dos erros grosseiros, e muitos deles ressaltam as dificuldades no processamento diferenciado de erros grosseiros múltiplos e erros topológicos.

Métodos recentes propostos para processamento de erros topológicos são capazes de identificar anomalias previamente detectadas. Entretanto, a associação à estimação de estados inevitavelmente implica em um aumento do tempo computacional necessário à execução (LUGTU e outros, 1980, SIMÕES COSTA e LEÃO, 1993). Por outro lado, uma nova linha de pesquisa originou-se do fato de que os erros topológicos podem ser detectados e identificados com rapidez e precisão por um especialista, apenas pela análise das condições do sistema pré e pós chaveamento (SINGH e GLAVITSCH, 1991). Esta tem sido a motivação para o surgimento de metodologias baseadas em técnicas de Sistemas Especialista.

1.2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O método desenvolvido por Lugtu e outros (1980), propõe a detecção dos erros topológicos através da análise dos resultados da estimação de estados da qual resulta uma lista com todas as medidas consideradas errôneas. Estas medidas são suprimidas do processo de estimação de estados. Sobre o conjunto de medidas de injeções de potência ativa e reativa suprimidas, são feitas tentativas de inclusões ou exclusões de elementos, e executada nova estimação de estados. É feita nova análise do vetor de resíduos, e este procedimento repetido até ser alcançado um resultado satisfatório. Seguindo o mesmo raciocínio de análise do vetor de resíduos normalizados das medidas Wu e Liu (1989), enunciam teoremas sobre a detecção e identificação destes erros, propondo a detecção do erros topológico através da análise da sensibilidade dos resíduos normalizados em relação aos fluxos nos elementos da rede, sem no entanto, operacionalizar tal proposta.

Simões Costa e Leão (1993) operacionalizam a proposta de Wu e Liu (1989). Para isto foram conceituadas medidas sensíveis e sintomáticas e a relação entre elas chamadas de índice de correlação. Este índice determina a sensibilidade das medidas aos erros topológicos que podem ocorrer no sistema, identificando o elemento erroneamente configurado através do maior índice apresentado.

Clements e Davis (1988), propõem uma abordagem geométrica do problema utilizando a matriz de sensibilidade dos resíduos de medidas e a matriz de incidência de medidas do sistema. Através da análise da colinearidade entre as colunas destas matrizes são detectados e identificados os erros topológicos.

Singh e Glavitsch (1991), desenvolveram um algoritmo baseado em regras para detecção e identificação de erros topológicos. O algoritmo valida as mudanças de posições das chaves e disjuntores da rede, através de informações disponíveis no sistema. Este algoritmo é aplicado num sistema real no Centro de Controle Europeu e seus resultados apresentados por Singh e Oesch (1994).

1.3 - CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

Este trabalho se propõe a desenvolver um método para detecção e identificação de erros topológicos, baseado em técnicas de Sistemas Especialistas. O Sistema é desenvolvido a partir da análise dos resultados do método de pré-filtragem de medidas, que apresenta como resultado uma lista de medidas detectadas como portadoras de erros grosseiros. O Sistema Especialista analisa os resultados da pré-filtragem com o objetivo de identificar os erros topológicos que possam ser

confundidos com erros grosseiros múltiplos. O método de pré-filtragem foi desenvolvido por Marchiori da Luz (1991). O objetivo do Sistema Especialista é detectar e identificar possíveis erros topológicos, antes que estes sejam utilizados na estimação de estados, proporcionando, desta forma, uma estimação mais rápida e confiável.

1.4 - ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Será apresentado, de forma resumida, o conteúdo de cada capítulo deste trabalho, com objetivo de proporcionar uma visão global do problema proposto e o método para sua solução.

O Capítulo 2 aborda os erros topológicos, suas causas, tipos e efeitos e a problemática advinda de seu mascaramento através dos erros grosseiros múltiplos. É feita também uma descrição dos métodos já existentes para identificação e detecção destes erros.

No Capítulo 3 é feita uma breve revisão sobre Sistemas Especialistas. Discutem-se seus conceitos básicos, sua organização e aplicação ao problema proposto.

O método de pré-filtragem de medidas é descrito no Capítulo 4, e um exemplo de sua utilização é apresentado.

O Capítulo 5 descreve o método proposto neste trabalho. As regras e detalhes de implementação são apresentados.

No Capítulo 6 apresentam-se os resultados das simulações em sistemas testes do IEEE e um sistema real reduzido da Eletrosul-Celesc.

O Capítulo 7 apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

ERROS DE TOPOLOGIA NA MODELAGEM EM TEMPO REAL DE SISTEMAS DE POTÊNCIA

2.1 - INTRODUÇÃO

Para que a topologia de um sistema de potência seja definida é necessário conhecer informações sobre a posição de chaves e disjuntores em suas subestações. Estas informações são normalmente processadas por um aplicativo chamado *configurador de redes elétricas*, que determina a configuração real do sistema, ou seja, a topologia da rede, atualizando-a constantemente. A topologia assim determinada é utilizada como entrada de dados para três funções distintas: análise de segurança em tempo real, através de estimação de estados; funções de treinamento e simulação junto a programas de fluxo de potência; e em estudos de fluxo de potência (PRAIS e BOSE, 1988). Alterações nos “*status*” das chaves e disjuntores da rede alteram sua topologia. Estas mudanças devem ser informadas aos centros de operação do sistema de potência. Quando, por alguma falha, estas informações não são repassadas, ou repassadas de forma incorreta, configura-se um erro de topologia. As alterações nas posições de chaves e disjuntores ocorrem com frequência considerável, devido à dinâmica da operação. Falhas no processamento destas informações também podem ocorrer (ASSADIAN e outros, 1994).

A detecção de erros em medidas através da estimação de estados já é uma técnica consagrada (SCHWEPPE e ROM, 1970, MILI e outros, 1984, MILI e outros, 1985, AMARAL, 1987). No entanto, os efeitos de erros topológicos na estimação de estados confundem-se com os efeitos de erros grosseiros em medidas, tornando necessária a criação de novas metodologias para detecção de erros topológicos.

2.2 - TIPOS DE ERROS DE TOPOLOGIA

Sabe-se que os erros de topologia são causados por informações errôneas das chaves e disjuntores do sistema, causando uma falsa configuração e conseqüentemente um falso modelo para a rede. Os erros de topologia podem ser classificados em *simples*: quando apenas um elemento da rede é erroneamente configurado e *múltiplos*: quando mais de um elemento for erroneamente configurado no modelo da rede (SIMÕES COSTA e LEÃO - 1993).

Por sua vez, os erros de topologia simples podem ser divididos em (WU e LIU - 1989, SIMÕES COSTA e LEÃO - 1993):

- erros de exclusão: quando um elemento está em operação, porém não é configurado no modelo da rede.
- erros de inclusão: quando um elemento não está em operação no sistema, mas é configurado no modelo da rede.

Considera-se erro de topologia múltiplo:

- a ocorrência de mais de um erro de exclusão ou inclusão ao mesmo tempo;
- erros de seccionamento de barras, conhecidos como “*bus-split*”, que ocorrem por falha na informação do “*status*” de um disjuntor de barra, alterando o número de barras da rede.

O erro de *bus-split* pode ser analisado de formas distintas: como uma combinação dos *erros de inclusão e exclusão*, onde elementos são excluídos da barra original e incluídos na nova barra adicionada ao sistema, que surge com a abertura do disjuntor (WU e LIU - 1989).

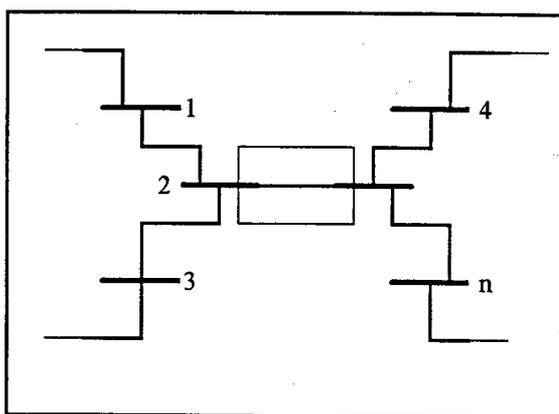


Figura 2.1 - Representação de um disjuntor de barra.

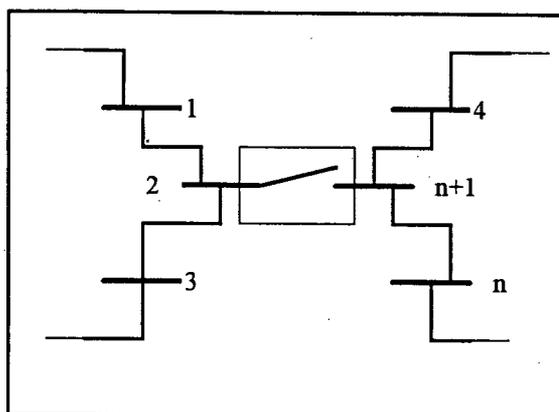


Figura 2.2 - Abertura do disjuntor de barras.

A Figura 2.1 apresenta a configuração do sistema considerada correta. Nela pode-se verificar a presença de um disjuntor entre as duas seções da barra 2, tendo-se assim elementos entre as barras 2-4 e 2-n. A Figura 2.2, exemplifica a abertura do disjuntor da barra 2, o que causa a criação de uma nova barra no sistema, designada como barra n+1. Algumas das linhas, anteriormente ligadas à barra 2, passam a ser incidentes à barra n+1, podendo ser analisadas como erros de exclusão das linhas 2-4 e 2-n e erros de inclusão das linhas (n+1)-4 e (n+1)-n.

A outra forma de analisar o erro de topologia de *bus-split* é modelando o disjuntor de barra como um elemento, com valor de baixa impedância, ligando a barra original a uma nova barra do sistema (MAZI e outros, 1986). Desta forma, o sistema tem sua dimensão aumentada com adição de novos elementos em substituição aos disjuntores de barras. Esta abordagem permite que o erro de *bus-split* seja analisado como um *erro topológico de exclusão*.

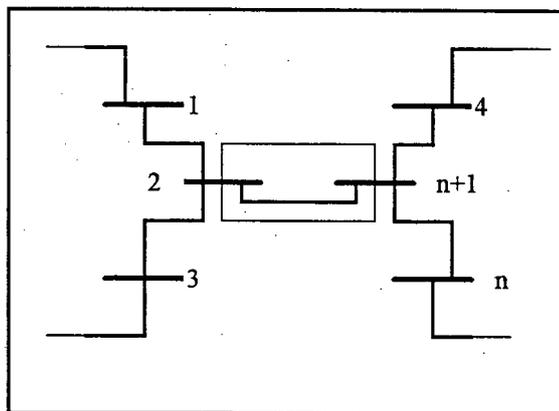


Figura 2.3 - Modelagem do disjuntor de barra como um elemento de baixa impedância.

A Figura 2.3 exemplifica a abordagem que modela o disjuntor de barra como um elemento de baixa impedância. Portanto, o erro topológico de *bus-split* poderia ser também simulado como um *erro de exclusão* do elemento entre as barras 2 e n+1.

2.3 - EFEITOS DE ERROS DE TOPOLOGIA NA MODELAGEM EM TEMPO REAL

O efeito primário de um erro de topologia é a falsa estimação das injeções nas barras extremas do elemento erroneamente configurado. Se existir um nível adequado de redundância, poderá ser observado que a magnitude e ângulo de tensão nestas barras e os fluxos e injeções em outros elementos serão afetados em menor grau do que as injeções de potência no próprio elemento (LUGTU e outros, 1980). Estes efeitos resultam em um cálculo incorreto do vetor de estados; falsa detecção de erros em medidas e falsas violações de limites de tensão e potência (SINGH e GLAVITSCH, 1991). Além de provocar uma falsa estimação de estado do sistema, a ocorrência de erros de topologia pode dificultar ou mesmo impossibilitar a convergência do algoritmo.

Será mostrado abaixo como os efeitos da presença de erros topológicos no sistema podem ser confundidos com os efeitos dos erros grosseiros múltiplos em medidas. Considerando o modelo de medição:

$$\mathbf{z} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (2.1)$$

onde:

- \mathbf{z} - vetor de medidas;
- $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ - vetor de funções não-lineares que relacionam as variáveis de estado com as medidas do sistema;

- \mathbf{x} - vetor de estados do sistema;
- \mathcal{E} - vetor de erros em medidas;
- $\mathbf{h}(\mathbf{x}_k)$ - vetor de funções não-lineares que possuem os valores calculados em $\mathbf{x} = \mathbf{x}_k$ para as quantidades medidas (tensão, fluxos e injeções de potência).

Os efeitos dos erros de topologia, bem como dos erros grosseiros em medidas, influenciarão nos valores do vetor $\mathbf{h}(\mathbf{x}_k)$.

No caso de um erro de exclusão o vetor será afetado nos seus elementos correspondentes às medidas de fluxo de potência do elemento excluído. Estes valores estarão ausentes no modelo. Nos elementos correspondentes às medidas de injeção de potência ativa e reativa, a soma dos fluxos que chegam e que saem das barras sofrerão a ausência do valor de fluxo do elemento excluído.

No caso de um erro de inclusão, o raciocínio inverso é válido, ou seja, surgirão medidas de fluxo ativo e reativo diferentes de zero em um elemento que de fato não está em operação. Estes fluxos serão somados às injeções de potência calculadas, alterando assim os elementos correspondentes do vetor $\mathbf{h}(\mathbf{x}_k)$.

Quando o erro topológico for um erro de *bus-split*, seus efeitos serão encarados como o de uma exclusão de elemento do sistema, conforme foi descrito na Seção 2.2, Figura 2.3. Desta forma o efeito sobre o vetor $\mathbf{h}(\mathbf{x}_k)$ será no valor correspondente ao elemento fictício, que modela o

disjuntor de barra no sistema. Este efeito só poderá ser detectado no vetor $\mathbf{h}(\mathbf{x})$, se houver monitoração do elemento adicionado.

2.4 - PROCESSAMENTO DE ERROS DE TOPOLOGIA

2.4.1 - Condições para a Identificação de Erros de Topologia

O processamento de erros de topologia exige que condições preliminares sejam cumpridas, tais como a observabilidade do sistema (MARCHIORI DA LUZ, 1991) e nível de redundância (HANDSCHIN e outros, 1975). Uma condição necessária, mas não suficiente, para garantir a observabilidade é que exista uma quantidade mínima de medidas para que se possa calcular as magnitudes e ângulos de tensão em todas as barras do sistema. Esta quantidade deve ser maior ou igual ao número de estados do sistema, isto é:

$$m \geq n \quad (2.2)$$

onde:

$$n = 2N - 1 \quad (2.3)$$

e:

- m - número de medidas efetuadas sobre a rede;
- n - número de estados do sistema;
- N - número de barras do sistema.

A observabilidade de uma rede também é verificada através do posto de sua matriz Jacobiana. A observabilidade é garantida se este posto for completo (CLEMENTS e DAVIS, 1988).

A redundância global das medidas da rede de um sistema de potência é definida como a relação entre o número de medidas efetuadas na rede e o número de estados a serem estimados (HANDSCHIN e outros, 1975).

$$\eta = \frac{m}{n} = \frac{m}{2N-1} \quad (2.4)$$

A redundância local é a relação entre as medidas e o número de estados de cada barra da rede. Estas medidas e estados são aqueles relacionados à barra e considerados até a segunda vizinhança desta barra (HANDSCHIN e outros, 1975).

A partir dos conceitos de observabilidade e redundância da rede conceitua-se também (CLEMENTS e DAVIS, 1988):

- *medida crítica*: sendo uma rede observável, a retirada de uma medida crítica torna a rede não-observável;

- *par crítico*: em uma rede observável, a remoção do par de medidas em questão, torna a rede não-observável. Com a remoção de apenas uma das medidas, a observabilidade da rede é mantida.

Erros incidentes em medidas críticas não são detectáveis, e incidentes em pares críticos não são identificáveis (CLEMENTS e DAVIS, 1988). São conceituados também as *medidas relacionadas* a um dado elemento da rede, que são as medidas de injeção de potência nas barras terminais deste elemento, e as medidas de fluxo de potência no próprio elemento. Pode-se também dizer que o elemento é relacionado às medidas. Diz-se que um *elemento é irrelevante* quando este elemento não tem medidas relacionadas (SIMÕES COSTA e LEÃO, 1993).

2.4.2 - Métodos para Identificação de Erros de Topologia.

Os métodos existentes para detecção de erros de topologia dividem-se em duas classes:

- (i.) - Pré-processamento de medidas, anterior à Estimação de Estados;
- (ii.) - Pós-processamento de medidas, utilizando resultados da Estimação de Estados.

Na primeira categoria enquadram-se os seguintes métodos:

- (i.1.) - Singh e Glavistch (1991), apresentam um algoritmo baseado em regras que utiliza informações disponíveis no sistema, para validar as posições das chaves e disjuntores. As informações disponíveis são analisadas como *compatíveis*, *incompatíveis* ou *não-utilizáveis* para cada posição das chaves. Se a quantidade de informações compatíveis são, em sua maioria,

favoráveis a uma dada posição então a posição de chave ou disjuntor analisada é suposta como verdadeira. Se a quantidade de informações incompatíveis é maior do que a quantidade de informações compatíveis, então esta dada posição é considerada falsa. Se não existe informação suficiente ou não existe clareza para distinção da informação, nada se conclui sobre a posição da chave ou disjuntor. Este conhecimento é elaborado na forma de regras e o Sistema Especialista aplicado em situações de ocorrência de erros para inferir se as posições das chaves são verdadeiras ou falsas.

Na segunda categoria de métodos, tem-se:

(ii.1.) - O método proposto por Lugtu e outros (1980), analisa a detecção de erros de topologia através da já conhecida facilidade que a estimação de estados proporciona na detecção de erros grosseiros em medidas. O método utiliza resultados da estimação de estados nos casos em que ocorre a identificação de medidas de injeção de potência ativa e reativa nas barras como sendo medidas portadoras de erros grosseiros. Estas medidas são suprimidas do processo. Em um pós-processamento, parte-se para a detecção dos erros topológicos, através de um teste de hipóteses cuja hipótese básica verifica se o elemento, entre as barras em que as medidas de injeção foram suprimidas, foi configurado de forma diferente da real configuração do sistema. A hipótese complementar considera que nenhuma conclusão pode ser obtida sobre a configuração do elemento. Desta forma, aceita-se a primeira hipótese se as barras terminais onde as medidas foram suprimidas passam no teste de resíduos. Se as medidas não passarem no teste de resíduos conclui-se que o "status" do elemento ou sua medida de injeção é errôneo. Após o teste de hipóteses, faz-se nova estimação com as possíveis alterações: saída do elemento cujas medidas de

injeções foram suprimidas; reconexão do elemento que não foi incluído no modelo; reconexão do elemento com uma das extremidades aberta.

O método foi proposto para aplicações em tempo-real, mas tem a desvantagem de exigir a execução de novas estimações de estados para que o elemento erroneamente configurado seja detectado.

(ii.2.) - O método proposto por Freire (FREIRE, 1989), pretende ser uma melhoria do método proposto por Lugtu e outros. A melhoria proposta baseia-se na extensão do método para detecção e identificação de outros tipos de erros de topologia, como erros de configuração nos elementos *shunts* da rede, abertura de apenas uma das extremidade da linha, o que é considerado como erro de exclusão de linha na rede e erro topológico de barramento (*bus-split*) utilizando a metodologia de associação de erros de exclusão e inclusão de elementos com a criação de um novo nó na rede. O procedimento para detecção e identificação dos erros de topologia é realizado como proposto por Lugtu e outros. Desta forma, é verificada a existência de medidas de injeções ativas e reativas identificadas como errôneas pelo teste de resíduo normalizado. Com esta informação, é realizada a mudança da posição da chave ou disjuntor do elemento relacionado as medidas de injeções errôneas. As limitações da implementação proposta em relação aos erros de configuração dos elementos *shunts* é que este terá o sucesso de sua identificação associado aos valores dos elementos *shunts* considerados.

(ii.3.) - Outro método proposto na literatura por Clements e Davis (1988), parte de uma análise geométrica do problema. O método foi inicialmente concebido para detecção e identificação de

erros grosseiros sendo a mesma proposta estendida para erros topológicos. O método parte da análise do vetor de resíduos das medidas e sua relação com a matriz de sensibilidade:

$$\tilde{z} = W\varepsilon \quad (2.5)$$

onde:

$$W = I - H(H^T R^{-1} H)^{-1} h^T R^{-1} \quad (2.6)$$

e:

- H** - matriz Jacobiana do sistema;
- I** - matriz identidade;
- ε** - vetor de ruídos nas medidas;
- W** - matriz de sensibilidade do vetor de resíduos em relação ao vetor de ruídos.

Para representar os fluxos na rede como uma função não-linear de medidas $h(x)$, tem-se:

$$h(x) = Mf(x) \quad (2.7)$$

onde:

\mathbf{M} - matriz de de incidência de medidas nos ramos;

$\mathbf{f}(\mathbf{x})$ - vetor dos valores de fluxos nos ramos da rede;

Supondo a existência de erros topológicos na rede, tem-se:

$$\tilde{\mathbf{z}} = \mathbf{W}\mathbf{M}\Delta\mathbf{f}(\mathbf{x}) \quad (2.8)$$

onde:

$\tilde{\mathbf{z}}$ - vetor de resíduos;

$\Delta\mathbf{f}(\mathbf{x})$ - erros nos valores de fluxos nos ramos da rede.

O teste para verificar a colinearidade entre as medidas do vetor de resíduos e as colunas da matriz \mathbf{W} , e assim detectar e identificar erros topológicos é definido como:

$$\cos\theta_j = \frac{\mathbf{m}_j^t \mathbf{W} \tilde{\mathbf{z}}}{\left(\|\mathbf{W}\mathbf{m}_j\| \|\tilde{\mathbf{z}}\|\right)} \quad (2.9)$$

onde:

\mathbf{m}_j - j-ésima coluna da matriz \mathbf{M} .

Os resultados desta análise são:

- Se $\mathbf{WM} \neq \mathbf{0}$, o erro topológico simples é detectável. Em consequência, se $\mathbf{Wm}_i = \mathbf{0}$, o ramo é um ramo crítico ou as medidas nele incidentes são críticas, então qualquer erro topológico simples neste ramo não será detectável.
- Se \mathbf{Wm}_i é colinear a \mathbf{Wm}_j , para $i \neq j$, o erro topológico simples no elemento correspondente a coluna de \mathbf{WM} não será detectável, ou seja, os dois ramos formam um par crítico.

Baseado nestas conclusões, obtidas através do teste de colinearidade, da equação 2.9, é feita a detecção e identificação dos erros topológicos. No entanto a detecção e identificação podem não ser tão evidentes se forem considerados os erros aleatórios nas medidas, que tendem a comprometer a colinearidade entre os valores das medidas do vetor de resíduos e as colunas da matriz \mathbf{W} . A verificação desta colinearidade não é uma tarefa que exija pouco esforço computacional.

(ii.4.) - Outro método, proposto por Wu e Liu (1989), parte da consideração que todas as medidas contaminadas por erros grosseiros tenham sido identificadas e eliminadas no modelo. Faz-se então uma análise sobre o vetor de resíduos das medidas:

$$\mathbf{r} = \mathbf{z} - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}} \quad (2.10)$$

que origina, na presença de erros de topologia:

$$\mathbf{r} = (\mathbf{I} - \mathbf{M})\boldsymbol{\varepsilon} \quad (2.11)$$

onde:

$$\mathbf{M} = \mathbf{H}(\mathbf{H}^t \mathbf{W} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^t \mathbf{W} \quad (2.12)$$

e:

$\boldsymbol{\varepsilon}$ - vetor dos valores de erros em medidas;

\mathbf{W} - inversa da matriz de covariâncias;

Onde a expectância de \mathbf{r} será:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = (\mathbf{I} - \mathbf{M})\mathbf{B}\mathbf{x} \quad (2.13)$$

onde:

\mathbf{B} - matriz Jacobiana que contém os erros nas medidas.

Na ausência de erros de topologia, a expectância dos resíduos dada pela Equação (2.13), é igual a zero. Na presença deste erro a expectância é diferente de zero, permitindo a decomposição da Equação (2.13) em:

- $\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B}\mathbf{x} \neq \mathbf{0}$, significando que o vetor \mathbf{x} não pode pertencer ao espaço nulo da matriz \mathbf{B} ;
- $(\mathbf{I} - \mathbf{M})\boldsymbol{\varepsilon} \neq \mathbf{0}$, significando que $\boldsymbol{\varepsilon}$ não pode pertencer ao espaço nulo de $(\mathbf{I} - \mathbf{M})$.

As condições acima são condições de detectabilidade de erros de topologia em uma rede.

(ii.5.) - Leão (1990), busca tratar o problema através da relação existente entre a sensibilidade dos resíduos normalizados e os fluxos nos elementos da rede. O método determina um grau de correlação entre *medidas sintomáticas*, que são as medidas detectadas como errôneas no processo de estimação, e as *medidas sensíveis*, que são aquelas que se espera serem identificadas como suspeitas quando o elemento ao qual elas estão relacionadas for mal configurado. Este conjunto de medidas sensíveis é determinado através da relação de sensibilidade estabelecida entre os resíduos e os fluxos de potência nos elementos. A partir da intersecção dos conjuntos de *medidas sensíveis* e *medidas sintomáticas*, atribui-se um índice a cada elemento da rede. Este índice é o que determina a maior ou menor correlação do elemento ao erro de configuração apresentado.

(ii.6.) Uma melhoria sobre o método de Leão (1990), proposto por Simões Costa e Leão (1993), é sobre a determinação do grupo de *medidas sensíveis*. Foi verificado que, quando $m \gg n$, os maiores valores de uma dada coluna da matriz de sensibilidade $s_{i,j}$, correspondem às *medidas relacionadas* a este dado elemento. Desta forma, o conjunto de *medidas sensíveis* considerado é definido pelas *medidas relacionadas* a este elementos.

2.5 - CONCLUSÕES

Neste capítulo foi visto como ocorrem os erros de topologia em um sistema de potência, e os efeitos que eles causam. Poucos são os trabalhos propostos para tentar solucionar o problema de identificação e detecção destes erros, se comparados com a quantidade de trabalhos que se propõem à solução da identificação e detecção de erros grosseiros em medidas.

Os métodos propostos para detecção e identificação de erros de topologia descritos neste capítulo podem ser vistos como parte de uma estratégia para solucionar satisfatoriamente o problema. Esta estratégia é dividida em três estágios. O primeiro estágio consiste de um pré-processamento de informações, incluindo testes de consistência e validação que utiliza a técnica de verificação de consistência de dados proposta por Bonanomi e Gramberg (1983). Após o pré-processamento, a execução da estimação de estados, as medidas apontadas como errôneas pelo teste de resíduos normalizados são processadas por outra rotina com o objetivo de detectar e identificar os possíveis erros de topologia no modelo da rede. Este estágio poderia ser implementado através de métodos como os de Lugtu e outros, (1980), Freire, (1989), Wu e Liu, (1989), Clements e Davis, (1988) e Simões Costa e Leão, (1993). Um terceiro estágio é um pós-processamento de todas as informações obtidas nos estágios anteriores, com conseqüente identificação das anomalias do sistema de potência.

A proposta deste trabalho situa-se no primeiro estágio, e consiste na adição de técnicas de Sistemas Especialistas para inferir a presença de erros de topologia a partir dos resultados do estágio de Pré-filtragem.

CAPÍTULO 3

SISTEMAS ESPECIALISTAS

3.1 - INTRODUÇÃO

Este capítulo tem por objetivo apresentar a ferramenta que será utilizada neste trabalho para tentar solucionar o problema de identificação de erros de topologia em Sistemas de Potência. Esta ferramenta se compõe de técnicas de Sistemas Especialistas. Estas técnicas têm sido utilizadas em problemas cuja solução depende do conhecimento adquirido com a experiência de um especialista.

Sistemas Especialistas é uma área surgida da Inteligência Artificial (IA). A IA foi dividida em diversas áreas devido sua abrangência. Algumas destas áreas são hoje, amplamente pesquisadas, como: processamento de linguagem natural, sistemas especialistas, redes neurais, entre outras. Como não é o objetivo deste trabalho um estudo pormenorizado de IA e SE, serão conceituados apenas os aspectos importantes e necessários para seu desenvolvimento.

Neste capítulo serão apresentados os conceitos básicos de um SE, as fases e ferramentas para seu desenvolvimento. Será feito também uma breve análise de suas aplicações à Sistemas de Potência.

3.2 - CONCEITOS BÁSICOS DE SISTEMAS ESPECIALISTAS

Os SE são programas que envolvem alguns aspectos de uma parte específica do conhecimento e a habilidade de usar este conhecimento para auxiliar na solução de problemas. Ele tem como função a preservação do conhecimento, principalmente quando das ausências e afastamentos do especialista, assim como substituir o especialista em atividades rotineiras e triviais (TORRES e SILVA, 1994). Eles servem também como apoio à tomada de decisões em momentos críticos, tanto na presença de um grande volume de dados quanto na falta de alguns deles.

Os SE são particularmente relevantes na realização de inferências e deduções sobre problemas que envolvem aspectos não estruturados. Atuam também com conhecimento incompleto e impreciso (OMAR, 1992), buscando uma solução boa e viável, não necessariamente a ótima.

Para trabalhar com SE é necessário, inicialmente, definir com clareza o problema que se quer solucionar. Ele deve ser restrito a uma área específica do conhecimento e para sua solução não deve estar disponível metodologia apropriada. Os conceitos básicos que envolvem o assunto serão descritos como segue.

3.2.1 - Organização do Conhecimento

O conhecimento pode ser organizado de formas distintas dentro da Base de Conhecimento. Algumas destas formas são: sistemas de produção, representação procedimental, *frames*, redes semânticas e cálculo de predicados. Estas várias formas de organização podem ser encontradas

em diversas referências (OMAR, 1992, LIU e outros, 1993). Como neste trabalho serão utilizados sistemas de produção, dar-se-á maior atenção a esta forma de organização do conhecimento.

Os Sistemas de Produção consistem em um conjunto de regras de decisão da forma:

SE condição ENTÃO conclusão

Este tipo de organização do conhecimento é o que melhor se aplica ao conhecimento constituído de heurísticas, que são diretrizes gerais ganhas com a experiência com um problema em particular.

3.2.2 - Base de conhecimento (BC)

Para o caso da representação do conhecimento através de regras de produção, organiza-se a BC do SE em fatos e regras:

- *Fatos* - são as informações não-condicionais sobre o assunto, obtidas através de manuais, relatórios, documentos ou com o próprio especialista. Eles podem ser classificados em estáticos ou dinâmicos, segundo o seu tempo de atualização;
- *Regras* - determinam as relações entre os fatos, podendo também gerar novos fatos. A vantagem de representar o conhecimento através de regras é que estas devem ser simples,

claras, consistentes e completas, tendo em vista a impossibilidade de se obter a totalidade do conhecimento, baseado na diversidade de situações que qualquer problema pode causar.

Durante a elaboração das regras, é feito o que se chama de *verificação*, em que se determina se uma fase do desenvolvimento do sistema alcança os objetivos previamente estabelecidos (LIU e outros, 1993). A elaboração de cada regra pode ser vista como uma fase a ser verificada. Este processo é mostrado na Figura 3.1.

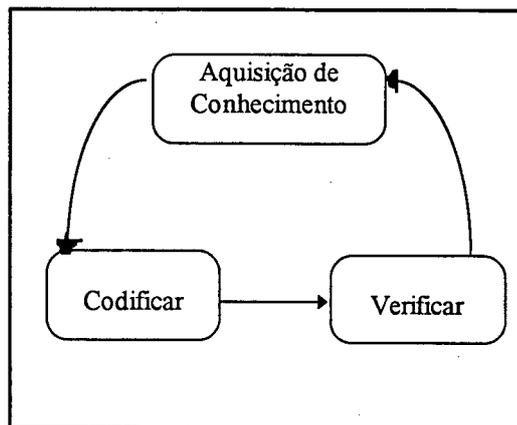


Figura 3.1- Processo de aquisição de conhecimento e criação de regras (LIU e outros, 1993).

3.2.3 - Memória de Trabalho

Chama-se Memória de Trabalho (MT) os fatos e regras que são inferidos, e obtiveram sucesso, durante o processo de busca de uma solução. Esta memória funciona como um rascunho, que pode ser utilizada para depuração do programa, durante a implementação, tornando-se desnecessário quando o trabalho é concluído (TORRES e SILVA, 1994).

3.2.4 - Mecanismo de Inferência (MI)

Qualquer solução aproximada para um problema pode ser vista como uma busca através de um espaço de estados. Diferentes soluções são distinguidas por sua representação de estados, estratégias de controle da busca e critérios de solução (LIU e outros, 1993). O componente do SE que trata desta busca e estratégias para solução do problema é o mecanismo de inferência. É ele quem deve selecionar as fontes de conhecimento que dizem respeito a um objetivo imediato e realizar inferências a partir dessas fontes de conhecimento, gerando novos fatos que automaticamente se incorporam à base de dados. A eficiência das estratégias usadas para fazer inferências e controlar o processo de raciocínio depende fortemente da adequação das mesmas à natureza do domínio do problema e a maneira com a qual o conhecimento é representado e organizado na BC (OMAR, 1992).

A busca em um MI pode ser definida como:

- Progressiva (*Forward-Chaining*): parte-se dos dados em busca da conclusão de uma regra;
- Retroativo (*Backward-Chaining*): parte-se dos objetivos em busca de dados que se casem com este objetivo;
- Bidirecional: que é a combinação das anteriores.

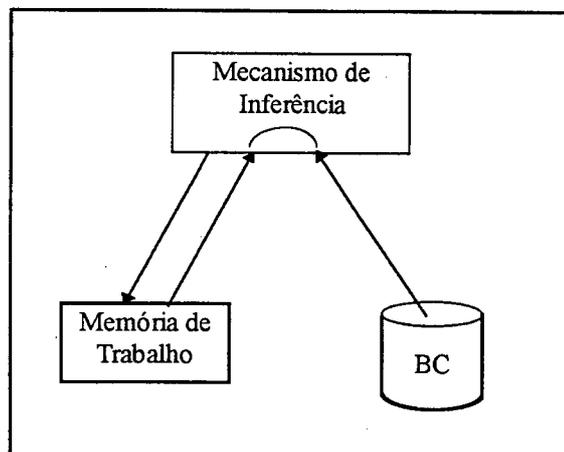


Figura 3.2 - Estrutura de um sistema de produção (SASAKI e outros - 1989)

A Memória de trabalho é utilizada em conjunto com o mecanismo de inferência como mostrado na Figura 3.2.

3.3 - RESOLUÇÃO DE CONFLITOS

Quando mais de uma regra obtém sucesso e não existe prioridade entre elas ou quando as regras têm a mesma prioridade, deve ocorrer o que se chama de Resolução de Conflitos. A Resolução de Conflitos visa evitar que o processo de ativação de regras seja interrompido, criando, também opções de caminhos que tornem a busca de uma solução mais eficiente. Isto deve ser feito pelo mecanismo de inferência, que neste caso deve possuir um procedimento pré-estabelecido para fazer opção entre estas regras.

3.4 - VALIDAÇÃO

É comum haver confusão entre os termos verificação e validação. A verificação é um processo para determinar se dadas fases de desenvolvimento do SE atingem os objetivos estabelecidos nas fases anteriores a fase analisada. A verificação ocorre durante o processo de implementação de um sistema especialista, ou seja à medida em que fases do SE são implementadas é feita a verificação de seu sucesso. A validação, por sua vez, repete o processo da verificação mas para o conjunto de regras como um todo. A validação é o processo que avalia se o SE na fase final de seu processo de desenvolvimento atinge os objetivos estabelecidos (LIU e outros, 1993). Esta validação é feita, se possível, com a participação de um especialista para verificar se as respostas dadas pelos SE são satisfatórias. O ideal é que os testes de validação sejam feitos através de um simulador, para que as diversas situações que possam ocorrer sejam testadas.

3.5 - FERRAMENTAS PARA DESENVOLVIMENTO DE UM SE

Os programas hoje disponíveis para trabalhar com IA são divididos em três categorias: linguagens convencionais, linguagens para SE, e ambientes para SE. Embora as linguagens convencionais não sejam apropriadas para o desenvolvimento de SE, alguns já foram desenvolvidos em FORTRAN e C, devido à familiaridade e facilidade de interface com outros programas já existentes.

As linguagens para SE são diferentes das convencionais, pois elas oferecem estruturas apropriadas para se trabalhar com o conhecimento. Dentre as linguagens para SE, as mais

utilizadas são LISP, Prolog, OPS83, e outras. Os ambientes proporcionam um ambiente adequado para o desenvolvimento de SE, incluindo interfaces gráficas. Como exemplo de ambientes tem-se: NEXPERT, KAPPA, SNAP, e outros (LIU e outros, 1993).

As linguagens mais apropriadas para o desenvolvimento de SE são LISP e Prolog (HUNEAULT e outros, 1994), sendo que Prolog foi a linguagem escolhida pelos japoneses para o desenvolvimento de projetos de quinta geração (SAKAGUCHI, 1988). O Prolog tem como característica de seu motor de inferência a busca do tipo “*Backward-Chaining*”. Na linguagem Prolog, a prioridade das regras está na seqüência destas, que são acionadas de acordo com a ordem em que foram colocadas no programa.

3.6 - SISTEMAS ESPECIALISTAS APLICADOS À SISTEMAS DE POTÊNCIA

A utilização de um SE aplicado em Sistemas de Potência pode ser encontrada na padronização das operações dentro de uma companhia; no treinamento de usuários em diversas funções do sistema elétrico; no apoio as tomadas de decisões em situações de emergência, entre outras.

As pesquisas em Sistemas de Potência utilizando SE são distribuídas entre diferentes áreas, sendo as principais citadas a seguir (TORRES e SILVA - 1994):

- diagnóstico - no qual se procura a causa do mau funcionamento de um equipamento ou do sistema;

- prescrição - recomendações ou ações para corrigir um dado problema;
- análise - monitoração das leituras e informações do sistema com o objetivo de acompanhar seu funcionamento e definir seu estado;
- previsão - em que se procura estabelecer as conseqüências de uma determinada ação ou grupo de ações;
- seleção - criação de um rol de possibilidades de soluções ou cenários e escolha de um ou um grupo segundo alguns critérios;
- configuração - configurar ou reconfigurar objetos, cenários ou sistemas segundo alguns limitantes e critérios;
- planejamento - desenvolvimento da seqüência de ações para atingir um determinado objetivo dentro de um tempo desejado;
- controle - combinação de diversas áreas descritas acima, incluindo análise e prescrição;
- instrução - utilização no treinamento através da instrução inteligente assistida por computador.

Em qualquer das áreas citadas, existem situações em que os problemas apresentados têm incertezas embutidas em seus fatos e regras. No processo de busca de uma solução utilizando estes fatos e regras tem-se estas incertezas transferidas para a solução. Outra questão que surge quando se trabalha com Sistemas de Potência são as dificuldades de interface com os programas já existentes. Uma das soluções mais utilizadas é fazer esta interface através de arquivos.

3.7 - CONCLUSÕES

Pode-se concluir deste capítulo que o desenvolvimento de um SE deve obedecer fases que são essenciais para o sucesso da aplicação. A mais importante e decisiva fase é a aquisição e representação do conhecimento.

O SE permite ao usuário a visualização do raciocínio utilizado para solucionar o problema proposto. Desta forma, torna-se fácil entender o porque dos SE chegarem a soluções viáveis mesmo quando o conhecimento sobre o problema é incompleto ou incerto, pois um especialista humana deveria ter o mesmo raciocínio numa situação similar. Em vista destas características, pode-se concluir também que os SE são particularmente aplicáveis a problemas simbólicos, que não possuem tratamento numérico.

Para tratar o problema de identificação de erros de topologia em Sistemas de Potência de forma numérica existem vários métodos que já foram descritos no Capítulo 2. A justificativa para utilização de Sistemas Especialistas a este problema é que estes métodos numéricos não proporcionam soluções satisfatórias para uma aplicação em tempo real, considerando características reais dos sistemas de potência, como erros aleatórios.

Para a solução do problema proposto neste trabalho, busca-se utilizar as características dos Sistemas Especialistas, por ter o problema características simbólicas e sua solução numérica não ter o desempenho desejado, ou seja, sua aplicação em tempo real é comprometida.

As técnicas de Sistemas Especialistas utilizadas concentram heurísticas do problema proposto, criadas pela observação do Sistema de Potência, quando na presença de erros de topologia. Estas heurísticas proporcionam a criação de procedimentos para obtenção de soluções viáveis, com baixo custo de tempo computacional.

CAPÍTULO 4

MÉTODO PARA PRÉ-FILTRAGEM DE MEDIDAS

4.1 - INTRODUÇÃO

A pré-filtragem é um método para selecionar medidas antes que estas sejam utilizadas como dados de entrada para a Estimação de Estados. O método utilizado neste trabalho foi baseado na abordagem proposta por Bonanomi e Gramberg (1983) para estimação e processamento de erros grosseiros, posteriormente adaptada por Marchiori da Luz (1991) e Marchiori da Luz e Simões Costa (1991), para executar procedimentos de pré-filtragem. Nele são utilizadas técnicas de busca em grafos e as leis de Kirchhoff de corrente e tensão. Através de testes de consistência nas medidas, procura-se identificar alterações nos valores de fluxos e injeções de potência ativa e reativa. No caso da presença de erros grosseiros, o método fornece uma lista contendo medidas suspeitas de serem portadoras desses erros.

Neste capítulo será descrito o método de pré-filtragem, sua aplicação e utilização na proposta de detecção de erros topológicos.

4.2 - DESCRIÇÃO DO MÉTODO DE PRÉ-FILTRAGEM

Como foi visto anteriormente, para que seja possível a detecção e identificação de erros grosseiros em medidas e também de erros topológicos, é necessário que o sistema tenha redundância em seu plano de medição. Faz-se necessário também que as medidas sejam distribuídas de forma a não permitir a existência de conjuntos críticos de medidas no sistema.

O método é iniciado por uma busca em grafos para exploração sistemática das barras do sistema. As barras são consideradas como vértices. *Vértice marcado* é todo vértice que já tenha sido “visitado” na ocorrência da busca. A busca utilizada foi a *Busca em Largura*, que tem como critério para escolha do *vértice marcado* a seguinte regra: “dentre todos os vértices marcados e incidentes a alguma aresta ainda não explorada, escolher aquele menos recentemente alcançado na busca”. Esta busca pode ser implementada com auxílio de uma lista, onde o primeiro elemento a ser colocado na lista, é o primeiro a ser retirado da mesma.

Durante o processo de busca é feito o cálculo de estados do sistema. Este cálculo é iniciado em uma barra onde a magnitude de tensão é medida. Arbitra-se, para esta barra, ângulo de fase de tensão igual a zero e todos os outros ângulos de tensão de fase são calculados em relação a esta barra, considerada como referência. Para estes cálculos são utilizadas as equações de fluxo de potência (4.1) e (4.2), para determinar as tensões complexas das barras.

$$P_{ij} = \frac{V_i V_j}{|Z|} \sin(\delta_{ij} - \theta_{ij}) + \frac{V_i^2}{|Z|} \sin(\theta_{ij}) \quad (4.1)$$

$$Q_{ij} = \frac{-V_i V_j}{|Z|} \cos(\delta_{ij} - \theta_{ij}) + V_i^2 \left(\frac{I}{|Z|} \cos \theta_{ij} - \frac{Y}{2} \right) \quad (4.2)$$

onde:

- P_{ij} - fluxo de potência ativa da barra i para a barra j;
- Q_{ij} - fluxo de potência reativa da barra i para a barra j;
- V_i - magnitude de tensão na barra i;
- V_j - magnitude de tensão na barra j;
- $|Z|$ - módulo da impedância na linha;
- δ_{ij} - diferença angular entre a barra i e a barra j;
- θ_{ij} - $\arctg \frac{R}{X}$;
- $Y = jB$ - admitância da linha.

Existe também a necessidade de se utilizar as medidas de fluxo de potência aos pares (de medidas ativas e reativas), pois as medidas de fluxo de potência ativo e ângulo da tensão da barra são utilizadas para calcular o ângulo das barras adjacentes, e as medidas de fluxo reativo e magnitude de tensão para calcular a magnitude de tensão das mesmas (MARCHIORI DA LUZ, 1991).

A equação (4.3), utilizada para os cálculos das tensões complexas nas barras adjacentes à barra considerada é:

$$E_{ij} = \frac{Z(P_{ij} - jQ_{ij})}{V_i} - \frac{V_i Y}{2} \quad (4.3)$$

sendo:

$$E_{ij} = E_i - E_j \quad (4.4)$$

$$V_j = |V_i - E_{ij}| \quad (4.5)$$

$$\delta_j = \arctg \frac{\text{Im}(V_i - E_{ij})}{\text{Re}(V_i - E_{ij})} \quad (4.6)$$

onde:

- E_i - tensão complexa na barra i;
- E_j - tensão complexa na barra j;
- V_i - magnitude de tensão na barra i;
- V_j - magnitude de tensão na barra j;
- δ_i - ângulo de tensão na barra i;
- δ_j - ângulo de tensão na barra j;
- P_{ij} - fluxo de potência ativa medida na linha em i;
- Q_{ij} - fluxo de potência reativa medida na linha em i;
- $Z=R+jX$ - impedância da linha;
- $Y=jB$ - admitância shunt da linha.

À medida em que as tensões complexas nas barras são calculadas, as barras já visitadas são armazenadas em um vetor para posterior utilização.

No processo de cálculo dos estados do sistema muitas medidas são redundantes, e algumas dessas medidas não são utilizadas neste processo. Porém, elas são utilizadas posteriormente nos testes de consistência para validação dos cálculos. Estes testes são comparações entre os valores medidos e os valores calculados de cada grandeza. Se a diferença entre estes valores, que é chamada de discrepância, estiver dentro de uma tolerância previamente definida em termos das propriedades estatísticas das medidas, a medida é considerada correta. Em caso contrário, suspeita-se que alguma medida participante dos cálculos seja errônea.

Os testes de consistência são baseados nas leis de Kirchhoff e dividem-se em três categorias:

1. *Teste de magnitude de tensão*, que compara o módulo da tensão calculada em cada barra com o módulo da tensão medida nesta barra. Desta forma, o teste só é realizado nas barras onde a tensão é medida. Se a discrepância estiver dentro da tolerância, o resultado do teste é considerado bom e todas as medidas envolvidas no cálculo desta tensão, previamente armazenadas no processo de busca, recebem uma pontuação positiva. Em caso contrário, o teste é considerado ruim e as medidas participantes receberão pontuação negativa.
2. *Teste LKT*, baseado na Lei de Kirchhoff para tensões, segundo a qual a soma das quedas de tensão em um laço é igual a zero. As medidas que participam deste teste são medidas de fluxo de potência ativa e reativa nas linhas que não participaram do cálculo das tensões complexas da rede. Novamente compara-se os valores dos fluxos medidos e calculados. O teste é feito

separadamente para medidas ativas e reativas. No processo de pontuação a busca retroativa para obtenção das medidas que participaram dos cálculos parte das duas extremidades do elemento em questão. Assim, tem-se dois caminhos e conseqüentemente dois conjuntos de medidas. As medidas que recebem notas são aquelas que não fazem parte da interseção destes conjuntos, maiores detalhes sobre este procedimento são encontrados no trabalho de Marchiori da Luz. Para o teste da parte reativa o procedimento é o mesmo com a diferença de que o cálculo do fluxo de potência reativa está relacionado a magnitude da tensão nas barras.

3. *Teste LKC*, baseado na Lei de Kirchhoff para correntes, a qual diz que o somatório das correntes que convergem para um nó é igual ao somatório das correntes que divergem deste nó. Este teste é realizado nas barras onde as injeções de potência ativa e reativa são medidas, e não foram utilizadas nos cálculos das tensões complexas das barras. Os testes são feitos separadamente para parte ativa e reativa. A discrepância é calculada e comparada com a tolerância de cada medida. No processo de pontuação, recebem notas as medidas de fluxo de potência que participaram dos cálculos. Para os valores de fluxo calculados, recebem notas também as medidas que participaram no cálculo deste fluxo.

As tolerâncias utilizadas nos testes de consistência são calculadas através das tolerâncias individuais de cada medida. Estas tolerâncias individuais dependem da precisão dos instrumentos utilizados. O cálculo das margens de tolerância é feito durante o processo de cálculo dos estados. Quando os valores das tensões são calculados, a margem de tolerância associada a este cálculo também é realizado. O mesmo ocorre no cálculo das medidas de fluxo de potência nas linhas.

A margem de tolerância para a queda de tensão em uma linha é calculada através da margem de tolerância do fluxo de potência medido na respectiva linha. É utilizada a relação definida pela matriz Jacobiana já simplificada, supondo-se o modelo desacoplado:

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta_{ij} \\ \Delta V_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial\delta}{\partial P} & 0 \\ 0 & \frac{\partial V}{\partial Q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{ij} \\ \Delta Q_{ij} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

onde:

- $\Delta\delta_{ij}$ - tolerância para o ângulo de tensão entre a barra i e a barra j;
- ΔV_{ij} - tolerância para a diferença entre as magnitudes de tensão entre a barra i e a barra j;
- ΔP_{ij} - tolerância para fluxo de potência ativa na linha;
- ΔQ_{ij} - tolerância para fluxo de potência reativa na linha.

A margem de tolerância para as tensões nas barras é calculada com relação à barra de referência. O valor das tolerâncias para os fluxos ativo ΔP_{ij} , e reativo ΔQ_{ij} , são calculados de maneira distinta, dependendo se os fluxos utilizados no cálculo das tensões complexas, e conseqüentemente no cálculo das tolerâncias $\Delta\delta_{ij}$ e ΔV_{ij} , são medidos ou calculados. Se os fluxos utilizados são medidos, os valores para as tolerâncias serão calculados como segue:

$$\Delta P_{ij} = 3 * TOLT * MTR \quad (4.8)$$

$$\Delta Q_{ij} = 3 * TOLU * MUR \quad (4.9)$$

onde:

TOLT - precisão do medidor de fluxo de potência ativa;

MTR - valor real do fluxo de potência ativa na linha, obtido através de um programa previsor de carga;

TOLU - precisão do medidor de fluxo de potência reativa;

MUR - valor real do fluxo de potência reativa na linha obtida através de um programa previsor de carga.

O fator 3 (três) que aparece nas equações, indica que se admite desvios de até três desvios-padrão em uma medida.

Pelo processo do cálculo dos estados, a tolerância para o ângulo e magnitude de tensão em uma das barras sempre será conhecida, permitindo através das equações o cálculo para a barra cuja tolerância é desconhecida.

$$\Delta \delta_j = \sqrt{(\Delta \delta_{ij})^2 + (\Delta \delta_i)^2} \quad (4.10)$$

$$\Delta V_j = \sqrt{(\Delta V_{ij})^2 + (\Delta V_i)^2} \quad (4.11)$$

A margem de tolerância para a soma de várias quantidades medidas ou calculadas, é obtida pela aplicação do seguinte resultado da teoria de Probabilidades: “A variância da soma de variáveis aleatórias independentes, é igual a soma das respectivas variâncias” (MARCHIORI DA LUZ, 1991).

O cálculo dos fluxos de potência ativa e reativa calculados no teste LKC são feitos através do somatório de fluxos nas barras, portanto, para o cálculo das margens de tolerância é utilizada a Teoria de Probabilidades enunciada anteriormente. Para o cálculo das margens de tolerância associadas aos valores de fluxos calculados nos testes LKT o procedimento é o mesmo das margens de tolerância para os valores de tensões, considerando que os cálculos serão feitos separadamente para a parte ativa e reativa dos fluxos.

Realizados todos os cálculos de estados do sistema e, conseqüentemente todos os testes do processo de pré-filtragem, obtém-se uma planilha de resultados contendo:

- o número total de testes em que cada medida participou;
- o número total de testes cujos resultados são BONS;
- o número total de testes cujos resultados são RUINS;
- o saldo das notas obtidas para estas medidas.

A seguir será apresentado um exemplo incluindo a planilha de resultados.

4.3 - EXEMPLO ILUSTRATIVO

Foi simulado um erro grosseiro nas medidas de fluxo ativo e reativo no elemento 10, entre as barras 5 e 6, no sistema 14-barras IEEE. A planilha a seguir é um exemplo típico de resultados gerados pelo método de Pré-filtragem acima descrito.

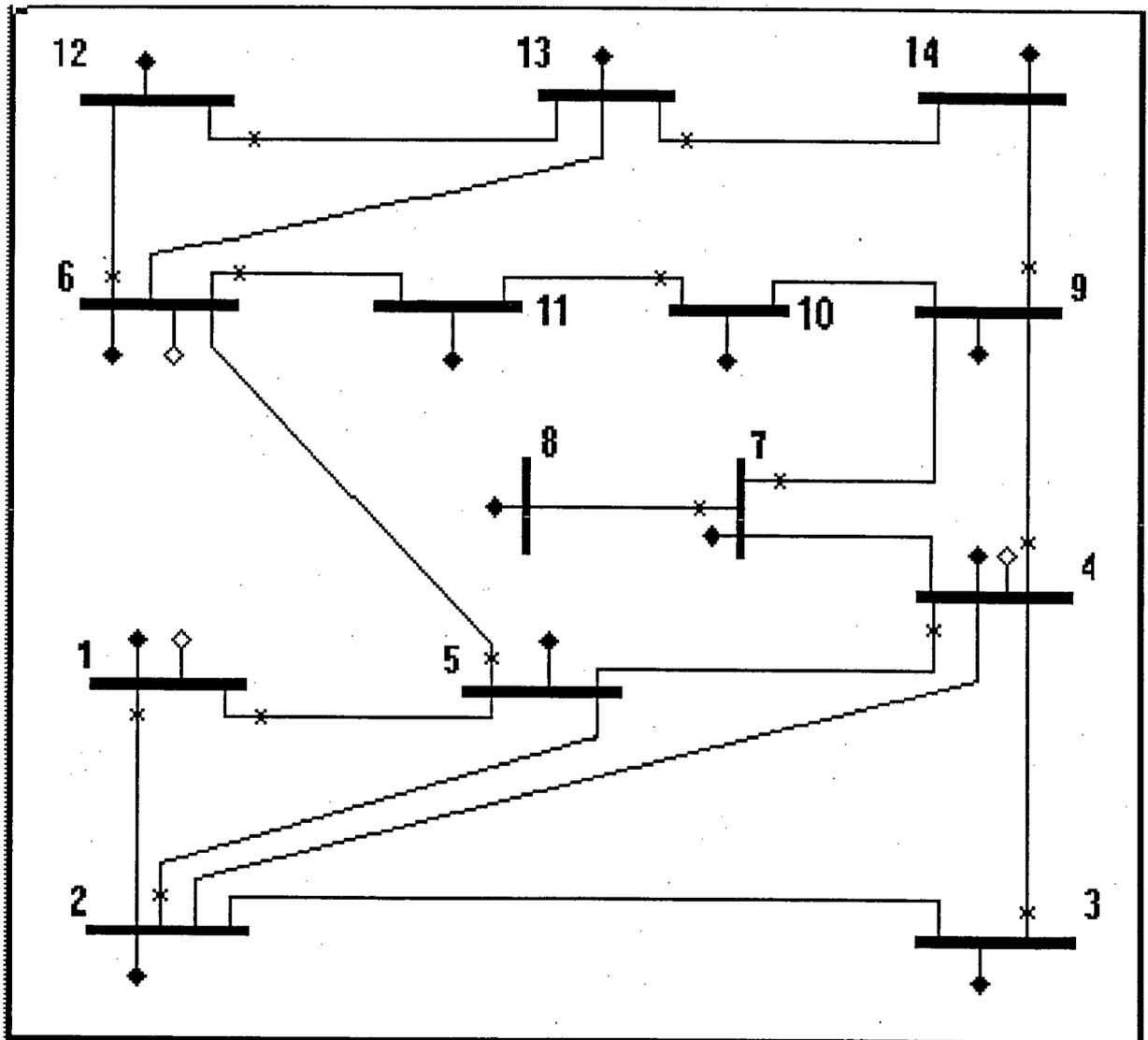


Figura 4.1 - Sistema IEEE - 14 barras

RELATÓRIO DE MEDIDAS E TESTES

TESTES RELATIVO A PARTE ATIVA

MEDIDA	BONS	RUINS	TOTAL	SALDO
T 1(1- 2)	4	5	9	-1
T 2(1- 5)	3	5	8	-2
T 3(2- 3)	4	0	4	4
T 4(2- 4)	3	5	8	-2
T 5(2- 5)	2	0	2	2
T 6(3- 4)	2	0	2	2
T 7(4- 5)	2	0	2	2
T 8(4- 7)	4	0	4	4
T 9(4- 9)	2	4	6	-2
T 10(5- 6)	0	6	6	-6
T 11(6- 11)	0	3	3	-3
T 12(6- 12)	3	1	4	2
T 13(6- 13)	1	3	4	-2
T 14(7- 8)	2	0	2	2
T 15(7- 9)	2	0	2	2
T 16(9- 10)	2	2	4	0
T 17(9- 14)	1	2	3	-1
T 18(10- 11)	1	1	2	0
T 19(12- 13)	2	0	2	2
T 20(13- 14)	1	1	2	0
P 1	1	0	1	1
P 2	1	0	1	1
P 3	1	0	1	1
P 4	1	0	1	1

MEDIDA	BONS	RUINS	TOTAL	SALDO
P 5	0	1	1	-1
P 6	0	1	1	-1
P 7	1	0	1	1
P 8	1	0	1	1
P 9	1	0	1	1
P 10	1	0	1	1
P 11	0	1	1	-1
P 12	1	0	1	1
P 13	1	0	1	1
P 14	0	1	1	-1

TESTES RELATIVO A PARTE REATIVA

MEDIDA	BONS	RUINS	TOTAL	SALDO
V 1	5	1	6	4
V 2	7	1	8	6
V 3	4	0	4	4
V 4	9	1	10	8
V 5	4	2	6	2
V 6	9	3	12	6
V 7	6	0	6	6
V 8	2	0	2	2
V 9	7	1	8	6
V 10	3	1	4	2
V 11	2	1	3	1
V 12	4	0	4	4
V 13	4	1	5	3
V 14	2	1	3	1

MEDIDA	BONS	RUINS	TOTAL	SALDO
U 1(1- 2)	3	0	3	3
U 2(1- 5)	4	0	4	4
U 3(2- 3)	2	0	2	2
U 4(2- 4)	2	0	2	2
U 5(2- 5)	2	0	2	2
U 6(3- 4)	2	0	2	2
U 7(4- 5)	2	0	2	2
U 8(4 - 7)	2	0	2	2
U 9(4 - 9)	3	0	3	3
U 10(5- 6)	0	2	2	-2
U 11(6- 11)	2	1	3	1
U 12(6- 12)	3	0	3	3
U 13(6- 13)	3	1	4	2
U 14(7- 8)	2	0	2	2
U 15(7- 9)	2	0	2	2
U 16(9- 10)	2	0	2	2
U 17(9- 14)	2	1	3	1
U 18(10- 11)	1	1	2	0
U 19(12- 13)	2	0	2	2
U 20(13- 14)	1	1	2	0
Q 1	1	0	1	1
Q 2	1	0	1	1
Q 3	1	0	1	1
Q 4	1	0	1	1
Q 5	0	1	1	-1
Q 6	1	0	1	1
Q 7	1	0	1	1
Q 8	1	0	1	1
Q 9	1	0	1	1

MEDIDA	BONS	RUINS	TOTAL	SALDO
Q 10	1	0	1	1
Q 11	0	1	1	-1
Q 12	1	0	1	1
Q 13	1	0	1	1
Q 14	0	1	1	-1

Pelos resultados apresentados, pode-se verificar que o erro grosseiro simulado, de 20 desvios-padrão sobre a medida de fluxo no elemento 10 do sistema, foi prontamente detectado. Outras simulações e seus resultados são apresentados em Marchiori da Luz (1991).

4.4 - CONCLUSÕES

O método de pré-filtragem foi desenvolvido para detecção e identificação de erros grosseiros em medidas. Seus resultados são satisfatórios e foram apresentados no trabalho de dissertação de Marchiori da Luz (1991). Este capítulo descreve a concepção do método, as condições básicas para sua utilização, as ferramentas utilizadas por ele e seus resultados.

Este trabalho considera a utilização do método de pré-filtragem para detecção de erros topológicos. No capítulo 2, foram descritos os sintomas dos erros de topologia em Sistemas de Potência, e as causas que levam seus efeitos a serem confundidos com os efeitos dos erros grosseiros múltiplos em medidas. Sem que nenhuma alteração tenha sido feita na concepção do

método de pré-filtragem, parte-se para simulação de erros topológicos no sistema com posterior execução do programa de pré-filtragem de medidas. A análise dos resultados da pré-filtragem é o que proporciona subsídios para diferenciar os efeitos dos erros grosseiros em medidas dos erros de topologia. Estes subsídios serão utilizados na constituição da Base de Conhecimento do Sistema Especialista.

CAPÍTULO 5

UM SISTEMA ESPECIALISTA PARA IDENTIFICAÇÃO DE ERROS TOPOLÓGICOS

5.1 - INTRODUÇÃO

A motivação para o desenvolvimento de um SE para identificação de erros de topologia surgiu das dificuldades encontradas em tratar estes erros com os métodos já conhecidos. A necessidade de obtenção desta solução em tempo real e a confiabilidade dos resultados obtidos são objetivos não completamente alcançados (LUGTU e outros, 1980, CLEMENTS e DAVIS, 1988, WU e LIU, 1989). Sabe-se também que outros pesquisadores já vêm utilizando SE na tentativa de solucionar tal problema (SINGH e GLAVITSCH, 1991).

O objetivo do desenvolvimento do Sistema Especialista para Identificação de Erros Topológicos - SEIDET - é de servir como apoio na identificação de tais erros, pois os efeitos destes confundem-se com os efeitos da presença de erros grosseiros múltiplos. O SEIDET trata dos erros topológicos de inclusão e exclusão de forma genérica, ou seja, ele pode ser aplicado para sistemas de qualquer dimensão. No entanto, para o tratamento do erro topológico *bus-split* o SEIDET requer a criação de regras específicas para cada sistema estudado, como será visto adiante.

É apresentado neste capítulo o desenvolvimento do SEIDET, suas fases de implementação e o detalhamento com a apresentação das principais regras da base de conhecimento do sistema. É analisado um exemplo de simulação e mostrado o arquivo de saída do caso simulado.

5.2 - DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA ESPECIALISTA

A linguagem utilizada neste trabalho foi o PROLOG, versão SWI-PROLOG 1.6 (WIELEMAKER, 1992). Esta versão é de domínio público e foi desenvolvida na Universidade de Amsterdam. O *Hardware* utilizado foi estação de trabalho, tipo Sun Sparc 1+. Neste trabalho, também foram utilizados programas escritos em Fortran 1.3 Sun, para obtenção de dados para o SEIDET. A solução encontrada para contornar as dificuldades de interface entre as linguagens PROLOG e Fortran foi a utilização de arquivos de dados intermediários. Parte dos resultados do programa de fluxo de potência são utilizados como dados para o programa de simulação de erros topológicos. Neste programa é montado um arquivo de dados que é utilizado, por sua vez, como entrada de dados para o programa de pré-filtragem de medidas e a saída deste será um arquivo de dados para o SEIDET.

No desenvolvimento deste SE algumas hipóteses foram adotadas:

1. Todas as medidas de potência são feitas em pares ativo-reativo, sejam elas de fluxo de potência nos elementos ou injeção de potência nas barras;
2. A redundância global e local deve ser garantida;

3. As injeções de Potência devem ser medidas em todas as barras do sistema, mesmo quando na barra não existe carga ou geração, neste último caso, podem ser utilizadas *pseudomedidas*, que são informações não obtidas por telemedição, sobre alguma grandeza de interesse. Exemplos de pseudomedidas são injeções nulas em barra de passagem, medidas de injeção calculadas através de um algoritmo de previsão de carga, etc.;
4. Todas as barras do sistema que possam sofrer erro de topologia do tipo *bus-split* devem constar da base de conhecimento;
5. Todos os elementos incluídos erroneamente no sistema são monitorados e o valor de seu fluxo de potência ativo igualado a zero;
6. Chama-se *topologia máxima* do sistema aquela onde encontram-se conectados todos os elementos existentes no sistema;
7. Chama-se *topologia básica* aquela anterior a qualquer detecção de erro, seja grosseiro ou topológico;
8. Chama-se *topologia corrente* aquela em que são detectados erros grosseiros e/ou topológicos, a *topologia corrente* pode ou não ser igual a *topologia máxima*;
9. O arranjo físico de algumas subestações do sistema permite a separação de determinadas barras que podem vir a operar como dois nós independentes. No entanto, em grande parte dos casos práticos esta flexibilidade não existe, isto é, as chaves e disjuntores nestes arranjos são intertravadas, o que implica na impossibilidade de sua abertura ou fechamento independente da abertura e fechamento de outras chaves, mantendo assim a configuração original da rede. Nestes casos não existe a possibilidade do erro de *bus-split*. Quando o arranjo da subestação

permite a ocorrência de *bus-split*, a identificação de tais barras deve constar na base de conhecimento. Neste caso os disjuntores de barras que permitem tal arranjo são modelados como elementos de baixa impedância. Isto permite ao SEIDET detectar o erro de *bus-split* como sendo um erro topológico de exclusão, simulando-se a abertura do disjuntor como a saída do elemento correspondente.

São exemplificados a seguir diferentes arranjos de subestações onde não é possível a ocorrência de *bus-split*, Figura 5.1, pois a existência de intertravamento em algumas barras não permite que mais de uma chave de transferência seja fechada ao mesmo tempo. Os casos em que a representação dos disjuntores pode ser feita através de elementos de baixa impedância são exemplificados na Figura 5.2, onde se verifica por exemplo que, se as barras P1 e P2 passarem a operar separadamente, a linha PAL (Palhoça) ficará conectada à barra P1.

Os arranjos de disjuntores de barras, de tal forma que podem proporcionar diferentes combinações, implicando em diferentes distribuições de elementos entre barras, são exemplificados na Figura 5.3. Estes casos não foram considerados pelo SEIDET, pois seria necessário outro tipo de modelamento para tais arranjos, como o sugerido no Capítulo 2, seção 2.2, considerando os elementos retirados da barra original como elementos excluídos, e estes elementos posteriormente incluídos na nova barra introduzida ao sistema, através da separação do disjuntor.

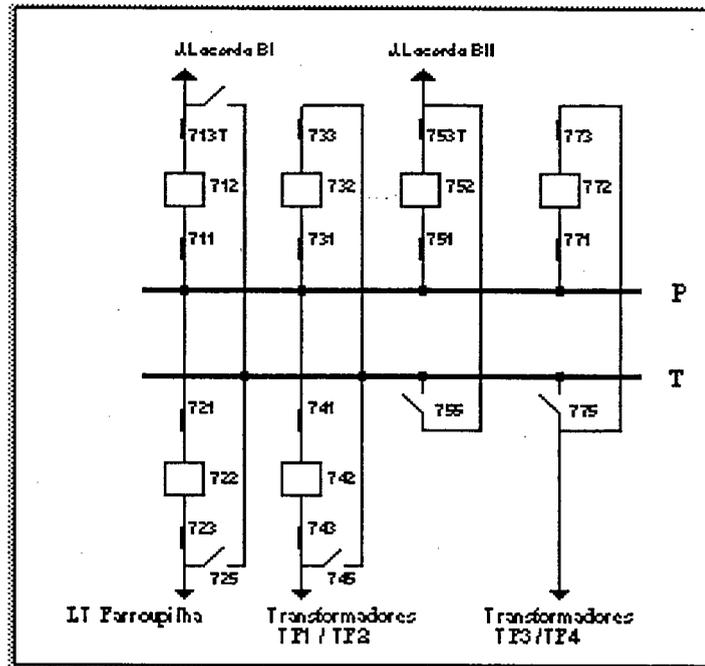


Figura 5.1 - Exemplo de Subestação onde não há possibilidade de ocorrência de *Bus-split* (Setor 230 Kv - Subestação de Siderópolis)

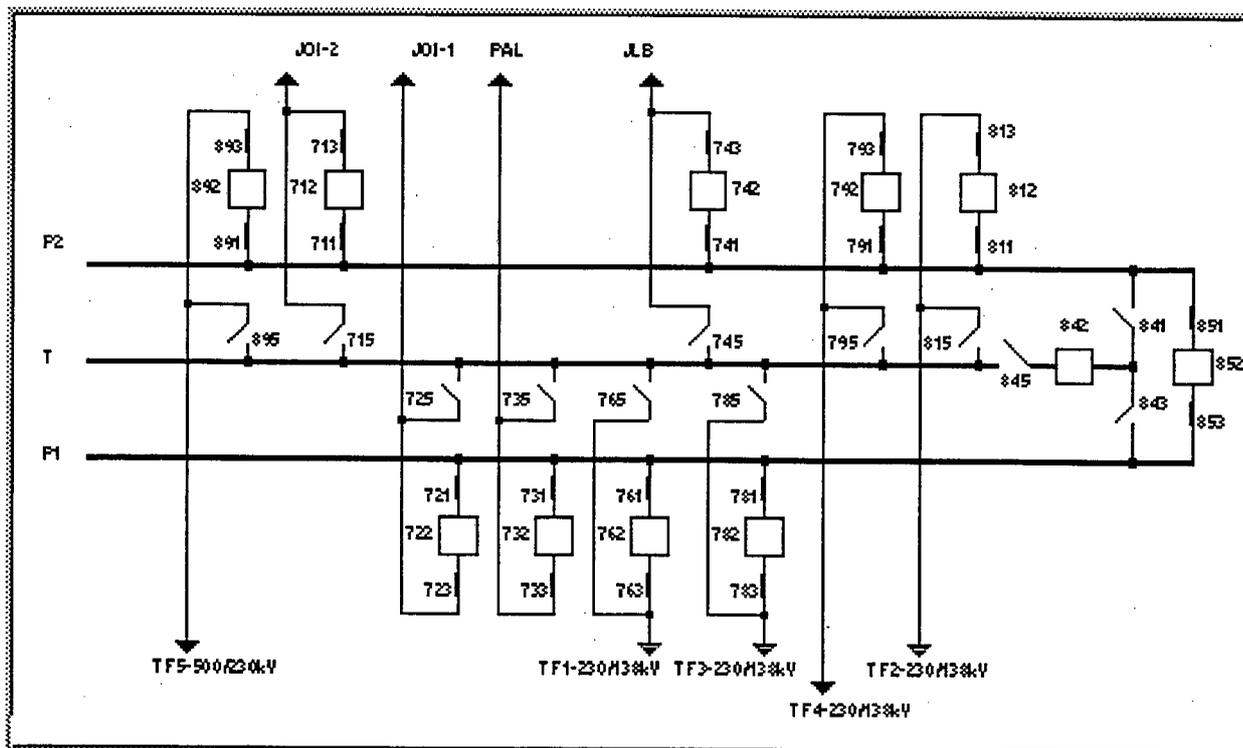


Figura 5.2 - Exemplo de Arranjo onde *Bus-split* pode ocorrer (Subestação Blumenau - Setor 230 kV).

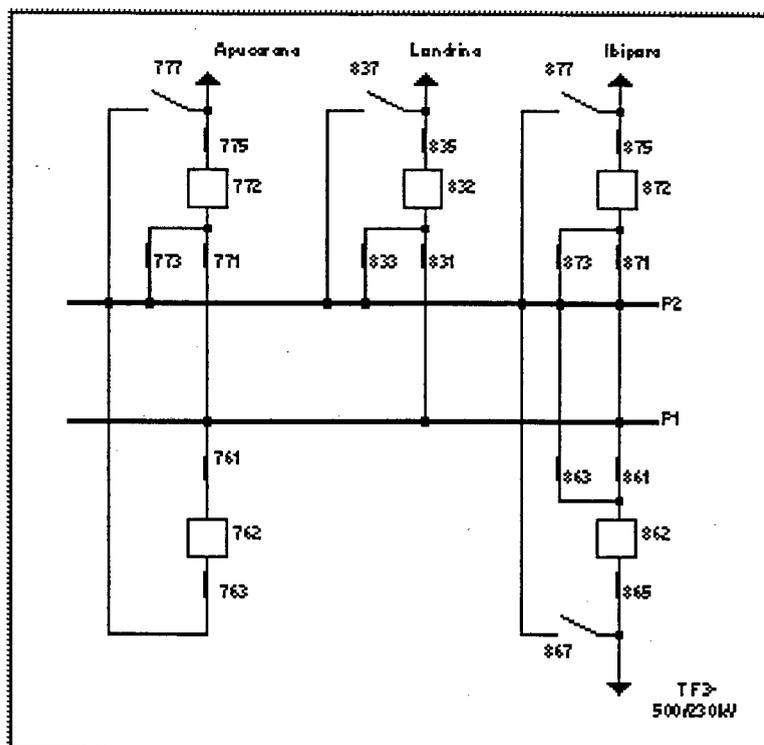


Figura 5.3 - Exemplo de Arranjo onde *Bus-split* pode ocorrer (caso não tratado pelo SEIDET, Subestação Londrina - 230 kV)

5.3 - IMPLEMENTAÇÃO

5.3.1 - Aquisição do Conhecimento

A fase de aquisição de conhecimento deu-se através de literatura técnica específica do assunto: Marchiori da Luz (1991) e Leão J.A. (1990). Para aquisição do conhecimento também foram utilizadas simulações e análise dos programas de simulação de erros topológicos e grosseiros,

INPNML, e pré-filtragem, PREFIL. A partir da análise dos resultados obtidos destas simulações pode-se verificar o comportamento do sistema na presença de erros topológicos e assim, adquirir sensibilidade na identificação das medidas suspeitas de erros topológicos.

5.3.2 - Representação do Conhecimento

O conhecimento obtido foi representado na forma de Sistemas de Produção, divididos em *fatos* e *regras* . Os *fatos* contém informações sobre:

- a topologia do sistema, através de seus elementos e barras;
- elementos e barras com as medidas e respectivas pontuações de saldo negativo na pré-filtragem.

As *regras* determinam as relações entre as medidas de fluxo com saldo negativo nos elementos e o comportamento do sistema na presença do erro que provoca a pontuação negativa. Adicionalmente tem-se as regras que relacionam as medidas de injeções de potência com saldo negativo nos teste de pré-filtragem. Pode-se descrever a seqüência de regras do programa da seguinte forma:

Erro de topologia de inclusão:

1. Identificam-se quais são as medidas existentes com saldo negativo, no procedimento da pré-filtragem, se houver;
2. Processamento das medidas de fluxo com saldo negativo:

- É verificado se o valor do fluxo ativo, medido no elemento em questão, é igual a zero (já que por hipótese o elemento suspeito de uma inclusão errônea tem seu valor de fluxo igual a zero);
 - É verificado se as extremidades do elemento em questão têm suas medidas de injeção com pontuação também de saldo negativo. Pelo menos uma das medidas deve constar entre as medidas de injeção com saldo negativo na lista de saída da pré-filtragem. Isto se deve ao fato do elemento, erroneamente incluído participar dos testes de consistência da pré-filtragem como um caminho para correntes somadas num nó. Também nos testes de tensão, onde se faz os cálculos de fluxos que circulam numa malha fechada, uma nova malha pode surgir com a inclusão errônea de um elemento. Desta forma, espera-se que apenas um par de medidas de injeção de potência, em uma das barras extremas do elemento incluído, surja na lista de saldo negativo da pré-filtragem;
 - Por fim, faz-se uma comparação entre as topologias básica e corrente.
3. Repete-se o mesmo procedimento partindo do processamento de medidas de injeção de potência com saldo negativo, se não existirem medidas de fluxo com saldo negativo;
 4. A relação entre o total de regras e o número de regras em que obtêm-se sucesso é denominado Índice de Confiança. Este índice será tratado com mais detalhes na seção 5.3.4. Ele será calculado para cada erro de topologia diagnosticado.

Erro de topologia de exclusão:

1. Identificam-se quais são as medidas existentes com saldo negativo, no procedimento da pré-filtragem, se houver;
2. Processamento das medidas de injeção com saldo negativo nos testes de pré-filtragem:
 - Quando ocorre um erro topológico de exclusão no sistema espera-se que as medidas de injeção de potência ativa e reativa nas duas barras extremas do elemento excluído tenham saldo negativo na pré-filtragem. Isto decorre da retirada de um elemento que era um caminho para circulação do fluxo do sistema. Desta forma, parte-se para análise das medidas de injeção de potência com saldo negativo. Verifica-se a exclusão errônea de elementos entre as barras cujas medidas de injeção de potência constam neste conjunto de medidas de saldo negativo.
 - Verifica-se a presença ou não de um elemento entre estas barras através da comparação entre as topologias básica e corrente do sistema de potência.
 - As sub-regras desta regra são funções das quantidades de medidas de injeção ativa ou reativa listadas com saldo negativo nos testes de pré-filtragem.
3. Cálculo do Índice de Confiança para o erro de topologia de exclusão.

Erro de topologia de *bus-split*:

1. O procedimento para identificação dos erros de *bus-split* segue a seqüência de procedimentos de identificação dos erros de topologia de exclusão;

2. Após detectada a exclusão, verifica-se a presença ou não do elemento no grupo de elementos modelados em substituição aos disjuntores de barras no sistema;
3. O Índice de Confiança do diagnóstico encontrado é determinado em função do Índice de Confiança do erro topológico de exclusão.

5.3.3 - Estrutura dos Programas utilizados

Foram utilizados programas em Fortran para:

- Execução de fluxo de potência (*NEWFLOW*);
- Simulação dos erros topológicos (*INPNML*);
- Pré-filtragem das medidas (*PREFIL*);
- Sistema Especialista para Identificação de Erros Topológicos (*SEIDET*).

A seqüência de utilização é mostrada na Figura 5.4:

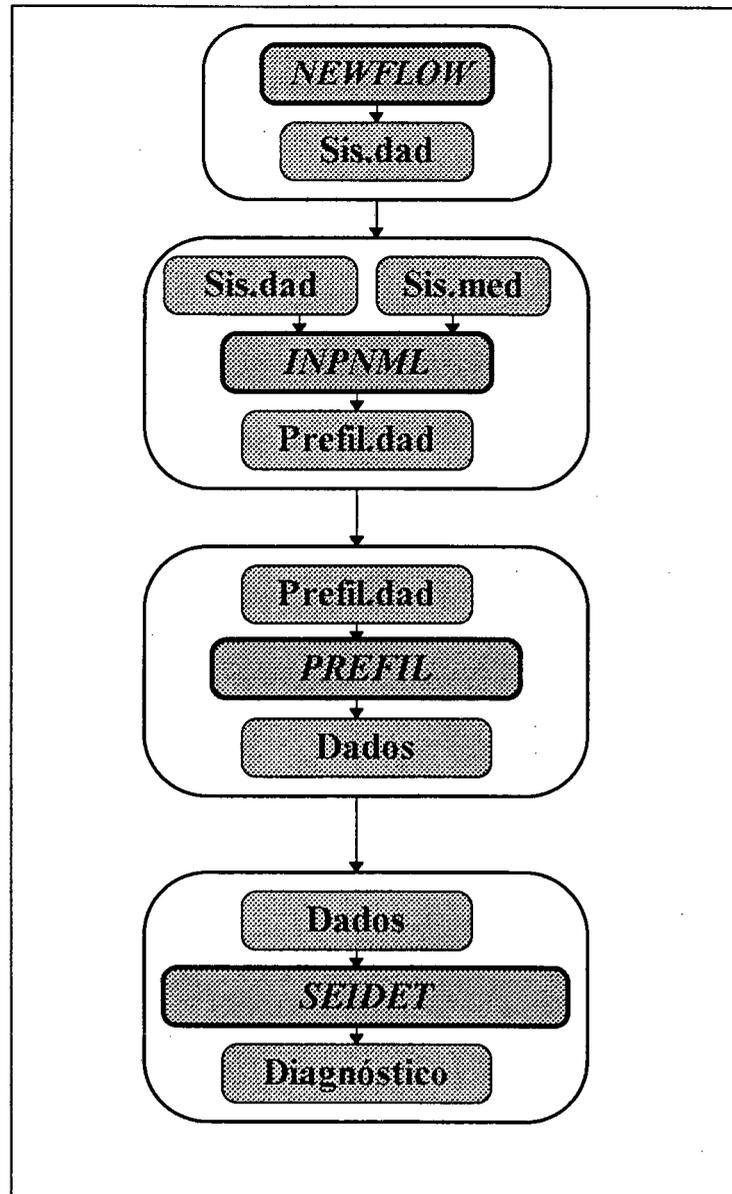


Figura 5.4 - Estrutura de utilização dos Programas

A Figura 5.4 permite observar a utilização dos arquivos de dados:

- *Sis.dad*: contém os dados de fluxo de carga do sistema e é utilizado como entrada de dados para o programa *INPNML*;

- *Sis.med*: contém o plano de medição do sistema, é utilizado pelo programa *INPNML* que simula erros grosseiros ou topológicos;
- *Prefil.dad*: é gerado por *INPNML* contendo o plano de medição, os parâmetros do sistema e os valores das medidas de módulo e ângulo de tensão, injeções e fluxos de potência para o programa de pré-filtragem de medidas;
- *Dados*: arquivo de saída do programa *PREFIL*. Contém as medidas que obtiveram saldo negativo na pontuação dos testes de consistência na pré-filtragem. Este arquivo é utilizado como entrada pelo *SEIDET*;
- *Diagnóstico*: contém o diagnóstico de elementos configurados erroneamente.

5.3.4 - Índices de Confiança

As incertezas do conhecimento podem ser representadas pelo tradicional e conhecido método de probabilidades bem como pela Teoria de Incertezas. No entanto, muitos problemas considerados não têm dados estatísticos disponíveis. As probabilidades determinadas sem dados suficientes tornam-se subjetivas, podendo introduzir erros lógicos numa análise do problema (LIU e outros - 1993).

O problema de identificação de erros topológicos, através da análise dos resultados da pré-filtragem, tem as características citadas no parágrafo anterior. Desta forma não se pode usar a definição clássica de probabilidades em termos da frequência de ocorrência de eventos, pois a quantidade de dados disponíveis para este cálculo é insuficiente.

Os dados obtidos através da pré-filtragem são considerados verdadeiros, já que o programa PREFIL foi previamente validado (MARCHIORI DA LUZ, 1991). Em outras palavras não se questiona neste trabalho a metodologia adotada em (MARCHIORI DA LUZ, 1991). As regras criadas para encontrar soluções através destes fatos não contêm incertezas, bem como as sub-regras que as compõem. No entanto, a combinação destas sub-regras tornam as regras incertas, já que algumas destas sub-regras podem falhar, tornando incerta a solução encontrada pela regra. Esta incerteza é traduzida pelo que foi definido como *Índice de Confiança*.

O Índice de Confiança é a relação entre a quantidade de sub-regras que compõem uma regra e são ativadas com sucesso, e o total de sub-regras que compõem esta regra.

$$\text{Índice de confiança} = \frac{\text{Número de Sub-regras que obtem sucesso}}{\text{Número total de sub-regras}}$$

No processo de validação do Sistema Especialista, o *Índice de Confiança* terá grande importância, já que ele proporciona ao grau de confiança de cada teste realizado.

5.4 - EXEMPLO ILUSTRATIVO

É apresentado o sistema IEEE - 30 barras, original, Figura 5.5. Para possibilitar a simulação de erro topológico de *bus-split* foram adicionados dois elementos, em substituição aos disjuntores de barras, e duas novas barras ao sistema. As barras escolhidas foram as barras 10 e 15, do sistema

original, Figura 5.5, e a nova configuração do sistema é mostrada nas Figuras 5.6 e 5.7. Nestas figuras, verifica-se que foram introduzidos os elementos 42 e 43, e as barras 31 e 32, respectivamente. Como os elementos 42 e 43 possuem baixa impedância, sua inclusão praticamente não afeta o estado do sistema.

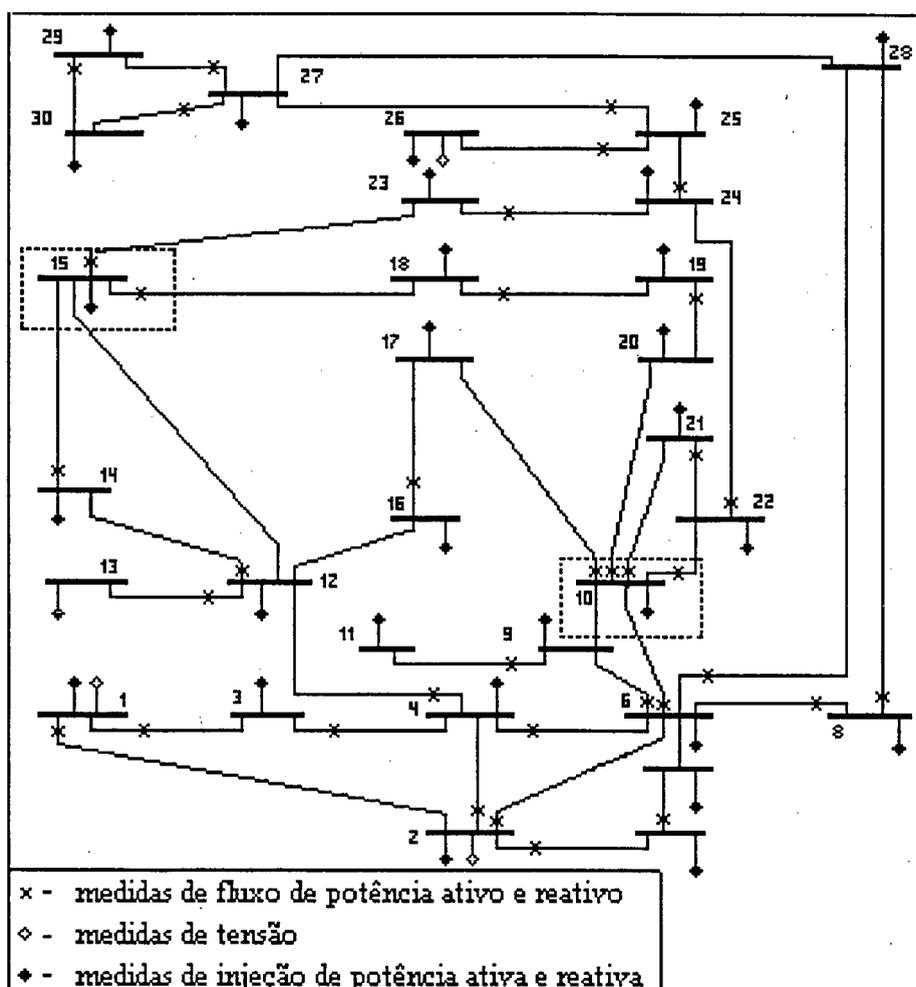


Figura 5.5 - Sistema IEEE-30 barras.

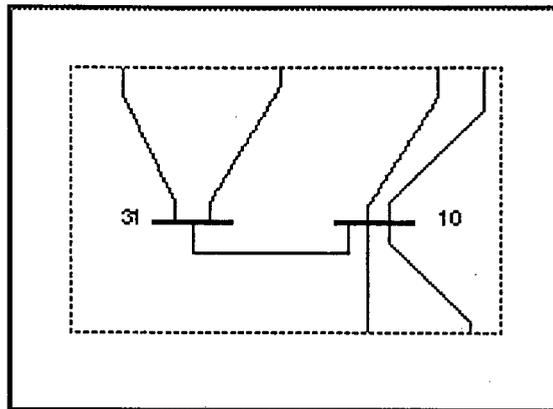


Figura 5.6 - Configuração de *bus-split* na barra 10.

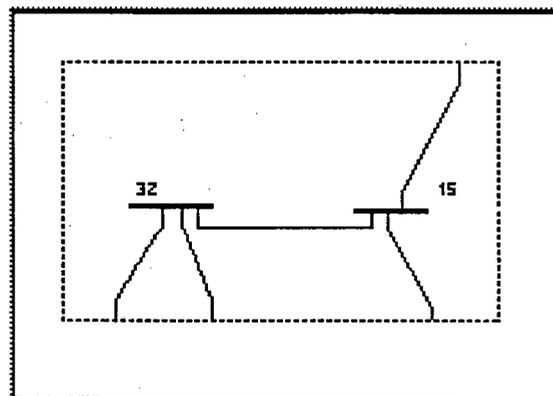


Figura 5.7 - Configuração de *bus-split* na barra 15.

No exemplo ilustrativo de erro topológico de *bus-split*, Figura 5.8, é excluído o elemento que substitui o disjuntor de barra da barra 10, (Figura 5.5), no modelo da rede. Nos testes de consistência da pré-filtragem são identificados como medidas portadoras de erros grosseiros as medidas de injeção de potência ativa e reativa nas barras 10 e 31. Todas as regras que determinam um erro topológico de exclusão são ativadas e obtêm sucesso. Após esta etapa, a regra que verifica se este elemento consta na Base de Conhecimento como disjuntor de barra é ativada e

também é realizada com sucesso. Assim, tem-se a identificação de erro topológico de *bus-split* com índice de confiança igual a 1,00.

Erro simulado:

Erro de topologia de *bus-split* na barra: 10

Resultado da Pré-filtragem:

Provável erro grosseiro na medida de injeção ativa
na barra:10

Provável erro grosseiro na medida de injeção reativa
na barra: 10

Diagnóstico do SEIDET :

Provável erro de *bus_split* entre as barras:31,10
Com índice de confiança: 1

Figura 5.8 - Arquivo de saída do programa SEIDET: simulação do erro de *bus-split* no disjuntor da barras 10.

No exemplo ilustrativo de erro topológico de exclusão, Figura 5.9, é simulada a exclusão do elemento entre as barras 2 e 4 (Figura 5.5), no modelo da rede. Nos testes de consistência da pré-filtragem são identificados como medidas portadoras de erros grosseiros as medidas de injeção de potência ativa e reativa nas barras 2 e 4. Todas as regras que determinam um erro

topológico de exclusão são ativadas e obtêm sucesso. Após esta etapa, a regra que verifica se este elemento consta na Base de Conhecimento como disjuntor de barra é ativada. Este procedimento não é realizado com sucesso. Assim tem-se a identificação de erro topológico de exclusão com índice de confiança igual a um.

Erro simulado:

Erro de topologia de exclusão da(s) linha(s): 3

Resultado da Pré-filtragem:

Provável erro grosseiro na medida de injeção ativa
na barra:2

Provável erro grosseiro na medida de injeção reativa
na barra:2

Diagnóstico do SEIDET

Provavel erro de exclusão da linha:3
entre as barras:4,2
Com índice de confiança: 1

Figura 5.9 - Arquivo de saída do programa SEIDET: simulação do erro topológico de exclusão do elemento 3.

No exemplo ilustrativo de erro topológico de inclusão, Figura 5.10, é incluído um elemento entre as barras 10 e 16 (Figura 5.5), no modelo da rede. Nos testes de consistência da pré-filtragem são identificados como medidas portadoras de erros grosseiros as medidas de injeção de potência

ativa e reativa na barra 16. Todas as regras que determinam um erro topológico de inclusão são ativadas e obtêm sucesso. Assim tem-se a identificação de erro topológico de inclusão com índice de confiança igual a um.

Erro simulado:

Erro de topologia de inclusão de linha entre as barras: 10 e 16

Resultado da Pre-filtragem:

Provável erro grosseiro na medida de injeção ativa
na barra: 16

Provável erro grosseiro na medida de injeção reativa
na barra: 16

Diagnóstico do SEIDET:

Provavel erro de inclusão da linha: 44
entre as barras: 16,10
Com índice de confiança: 1

Figura 5.10 - Arquivo de saída do programa SEIDET: simulação de inclusão de elemento entre as barras 10 e 16.

5.5 - VALIDAÇÃO

Para que o Sistema Especialista criado seja aceito como uma nova ferramenta na identificação de erros de topologia faz-se necessária a validação deste sistema. Busca-se com a validação o

funcionamento satisfatório do sistema frente as situações em que ocorrem erros de topologia. Devem ser previstas todas as situações que ocorrem em um sistema de potência real. Para tanto, é necessária a criação de simuladores que permitam simular estas situações, pois num sistema real sua ocorrência não pode ser prevista.

Tem-se disponível hoje, no Laboratório de Sistemas de Potência da UFSC, um simulador de Sistema de Potência do sistema real Celesc. Este simulador trabalha com uma curva de carga e possibilita a atualização do fluxo de carga de 5 em 5 segundos, possibilitando também, através de recursos gráficos diversas manobras no sistema.

Para validação do SEIDET seria necessário a incorporação ao simulador já existente de simuladores que possibilitem:

- Obtenção de dados SCADA;
- Configuração de redes;
- Estimação de estados;
- Pré-filtragem de medidas.

Para que estas etapas sejam atingidas, será necessário ainda algum tempo.

Após a etapa de protótipos seria necessária ainda a validação do sistema com sua aplicação em um sistema real, o que demandaria muito tempo, já que nem todas as funções dos Centros de Operações de Sistemas brasileiros estão em pleno funcionamento.

5.6 - CONCLUSÕES

Neste capítulo foi apresentada a estrutura do Sistema Especialista SEIDET, os principais fatos e regras de sua Base de Conhecimento e suas características. Existem características nas regras que as tornam genéricas para sistemas de quaisquer dimensão, isto no caso das regras para identificação de erros topológicos de inclusão e exclusão de elementos. Para o caso de identificação de erros topológicos do tipo *bus-split* as regras são específicas para cada sistema tratado.

Foram apresentados exemplos de cada tipo de erro topológico implementado, assim como a análise de ativação das regras e a obtenção dos respectivos índices de confiança, para cada erro simulado. Os resultados de outras simulações em sistemas de diferentes dimensões serão mostrados no capítulo seguinte.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS

6.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com a utilização do Sistema Especialista SEIDET para identificação de erros de topologia simulados em sistemas-teste. São apresentados inicialmente alguns detalhes sobre a implementação e as interfaces entre os programas utilizados para obtenção de dados para o SEIDET. Nas seções seguintes são apresentados os diagramas unifilares dos sistemas-teste utilizados, seus respectivos planos de medições e a localização das barras onde pode ocorrer erro de topologia do tipo *bus-split*. Os sistemas-teste utilizados foram:

- IEEE 30-barras (LEÃO, 1990);
- IEEE, 57-barras (PAI, 1979);
- Sistema Brasileiro das regiões Sul e Sudeste, reduzido para 75-barras (FREITAS, 1995).

6.2 - DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO

Para obtenção dos dados necessários para execução do Sistema Especialista foram utilizados vários programas, todos escritos em linguagem Fortran. A seqüência de utilização destes programas e a função que cada um desempenha nesta busca de dados é descrita a seguir.

6.2.1 - NEWFLOW

O programa NEWFLOW executa um fluxo de carga pelo método Newton-Raphson e necessita como dados de entrada os parâmetros do sistema, sua configuração, e seu carregamento. Na entrada de dados para execução do fluxo de carga, o sistema-teste é alterado em sua configuração para permitir a simulação do erro topológico de *bus-split*, ou seja, são introduzidos elementos de baixa impedância em substituição aos disjuntores de barras onde a separação destas barras permite uma configuração pré-determinada do sistema.

6.2.2 - INPNML

O programa INPNML simula as medidas analógicas a serem utilizadas para modelagem em tempo real de Sistemas de Potência. Para tal, utiliza os dados fornecidos pelo programa NEWFLOW, que incluem os parâmetros do sistema, os valores de módulo e ângulo de tensão, fluxos e injeções de potência. INPNML necessita também de um plano de medição que determine quais as variáveis que devem ser monitoradas. É através do programa INPNML que serão simulados os erros de topologia no sistema, sejam eles de inclusão, exclusão ou *bus-split*. A simulação pode ocorrer também com a contaminação das medidas por erros aleatórios e erros grosseiros simples ou múltiplos.

6.2.3 - PREFIL

A pré-filtragem das medidas é realizada pelo programa PREFIL que, através de testes de consistência, pontua todas as medidas realizadas no sistema. O saldo desta pontuação determina as medidas suspeitas de estarem contaminadas por erros grosseiros. As medidas que apresentarem saldo de pontuação negativo serão utilizadas como dados para o Sistema Especialista.

6.2.4 - SEIDET

O SEIDET é o Sistema Especialista que identifica os erros de topologia no Sistema de Potência, quando estes ocorrem. Somente as medidas de injeção e fluxo de potência de saldo negativo na pré-filtragem de medidas são processadas pelo SEIDET. Através de uma análise da localização destas medidas de fluxo e injeção de potência, são identificados os erros de topologia no sistema.

A seqüência dos programas utilizados é mostrada na Figura 6.1.

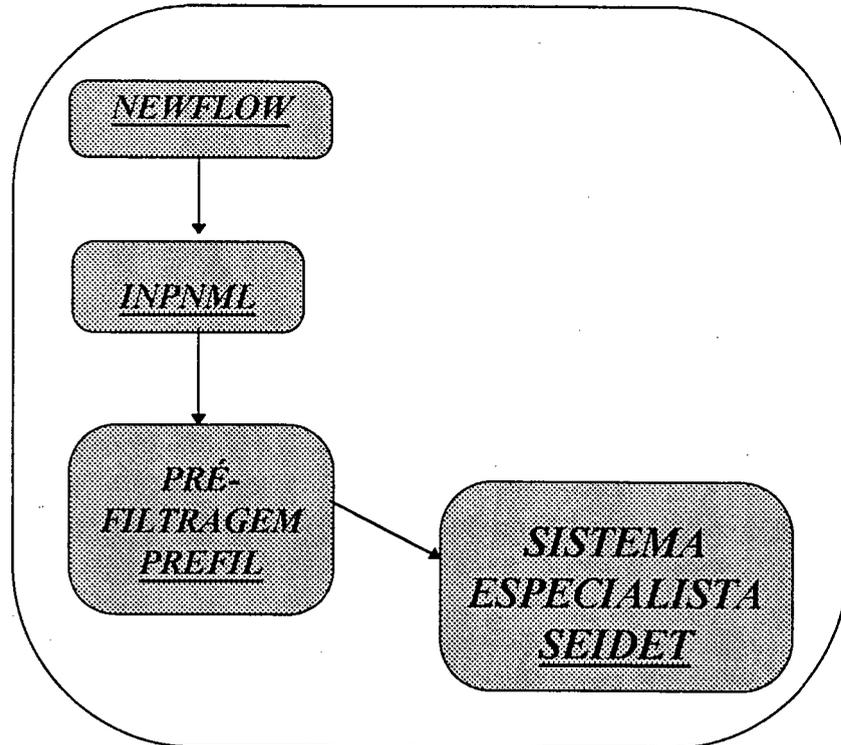


Figura 6.1 - Seqüência de programas utilizados

6.2.5 - Simulações

Para simulação dos erros de topologia de inclusão, a topologia corrente do sistema é a topologia original, incluindo os elementos que modelam os disjuntores de barras. A topologia máxima, portanto é aquela na qual se pode considerar a criação de novos elementos além da configuração original do Sistema de Potência, ou seja, além da topologia corrente.

6.3 - SISTEMAS-TESTE

Nesta seção são apresentadas os diagramas unifilares dos sistemas-teste utilizados nas simulações dos diferentes tipos de erros de topologia que podem ocorrer em um Sistema de Potência. São apresentados também, características de modelagem para simulação do erro topológico do tipo *bus-split*, que ocorrem nos três sistemas utilizados. As regiões selecionadas em destaque, nas Figuras 6.2, 6.3 e 6.4, são barras onde os disjuntores de barras foram modelados como elementos de baixa impedância. Nesta modelagem são criadas novas barras ao sistema que têm seus valores de medidas de injeção de potência monitorados.

6.3.1 - Sistema IEEE 30 barras

Na Figura 6.2 é apresentado o sistema IEEE-30 barras, original. Considerando a modelagem das barras para simulação do erro de *bus-split*, o sistema original tem sua configuração alterada para 32-barras. Os elementos que permanecem conectadas às barras originais são mostradas na Tabela 1. Os elementos que originalmente eram conectados às barras originais em questão, passam a ser conectados às novas barras criadas na rede.

Tabela 1 - Barras adicionadas para simulação de erro topológico de *bus-split* para Sistema 30-barras.

Barra original	Barra criada	Barra que continuam conectadas a barra original
10	31	13, 16, 20, 21
15	32	26, 28

A Figura 6.2 apresenta o diagrama unifilar do sistema, bem como, o plano de medição utilizado nas simulações. Pode-se também verificar a presença de medidas de injeção em todas as barras do sistema.

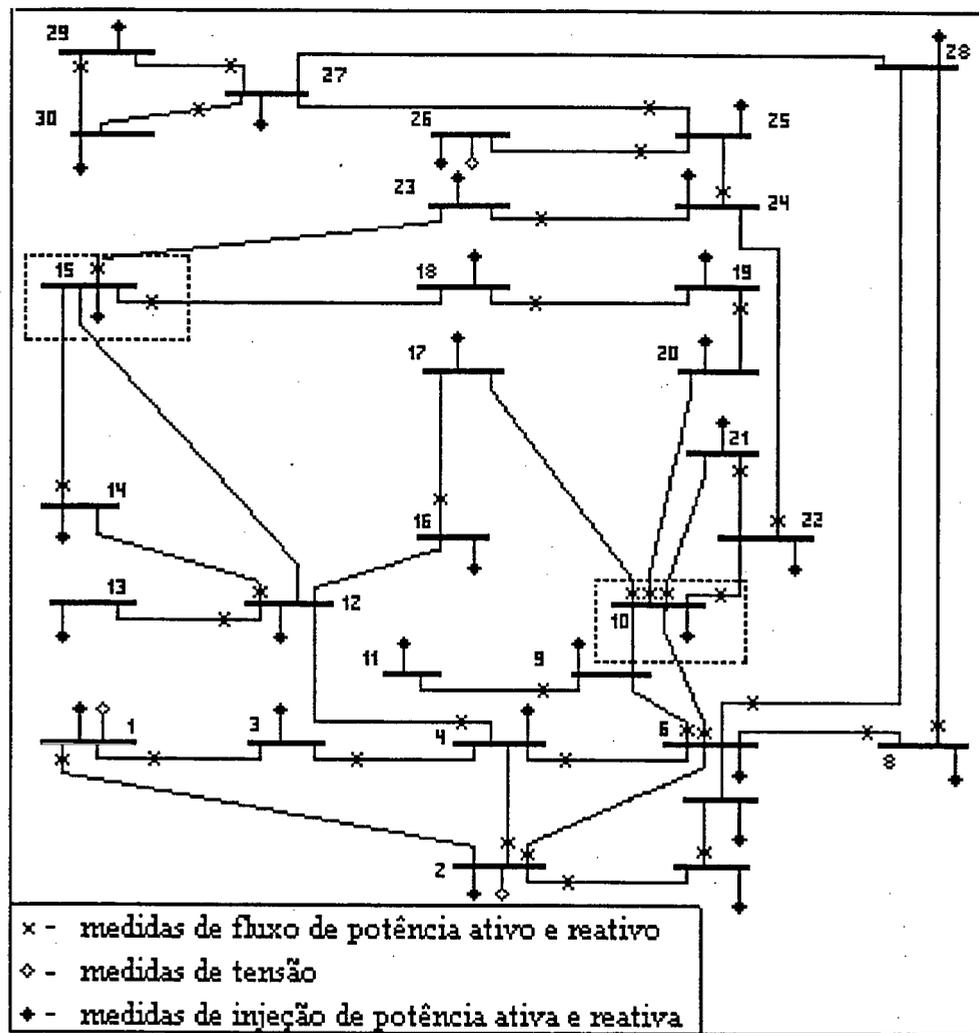


Figura 6.2 - Sistema teste IEEE-30 barras

6.3.2 - Sistema IEEE 57 barras

Na Figura 6.3 é apresentado o sistema IEEE-57 barras, original, bem como, o plano de medição utilizado para as simulações do Sistema Especialista. Para simulação do erro de topologia do tipo *bus-split*, tem-se a criação de novas barras, nas seções em destaque na Figura 6.3. Estas barras são criadas considerando a abertura do disjuntores de barras. São criados também, elementos que conectam as barras originais às novas barras do sistema. Desta forma o sistema é alterado para 59 barras, sendo que as barras que permanecem conectadas às barras originais são mostradas na Tabela 2. As barras que originalmente eram conectadas às barras originais em questão passam a ser conectados às novas barras criadas na rede.

Tabela 2 - Barras adicionadas para simulação de erro topológico tipo *bus-split* para Sistema 57-barras.

Barra original	Barra criada	Barras que continuam conectadas à barra original
13	58	9, 14, 49
4	59	5, 6

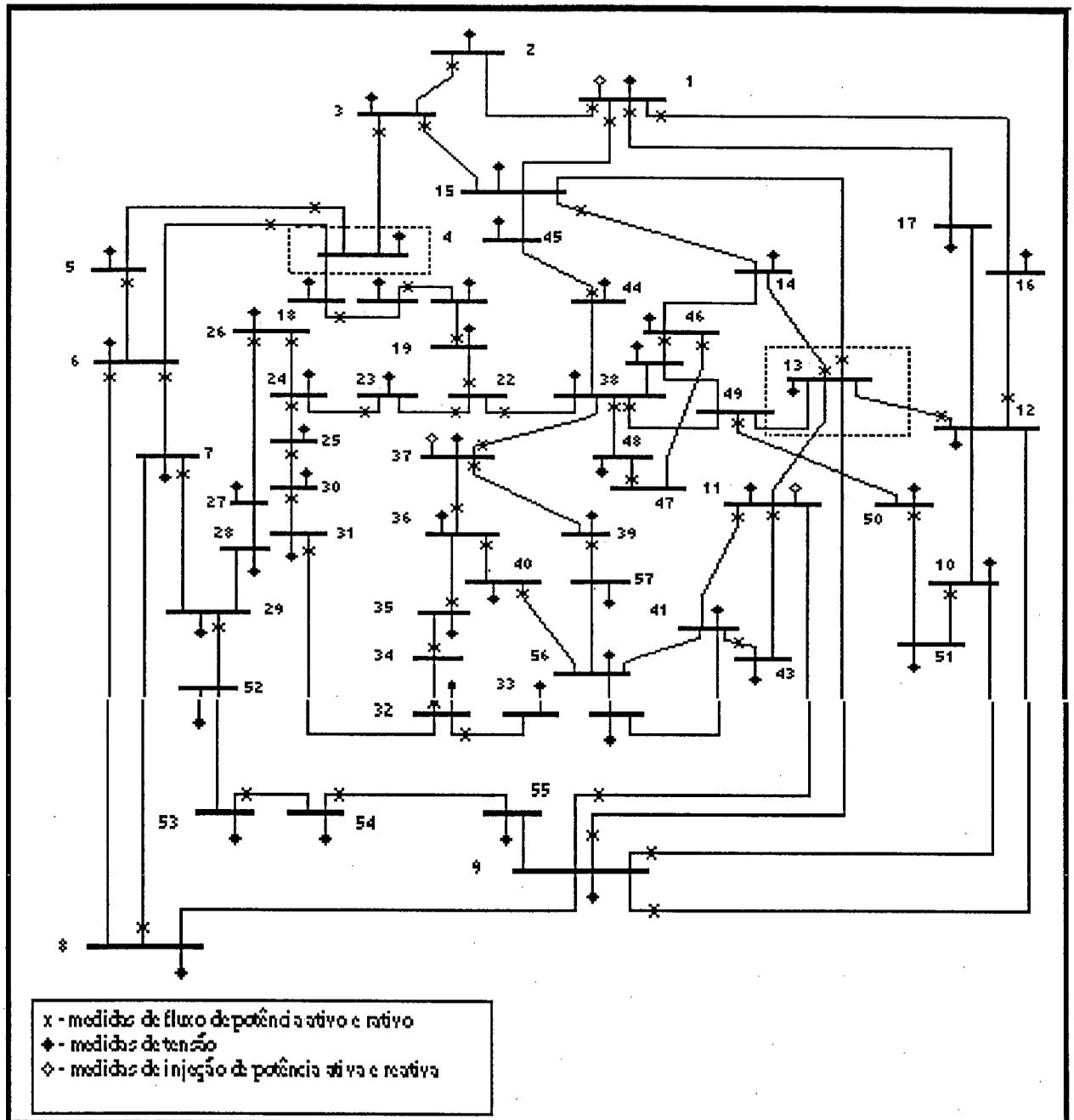


Figura 6.3 - Sistema -57 barras IEEE

6.3.3 - Sistema das Regiões Sul e Sudeste do Brasil

Na Figura 6.4 é apresentado o sistema Sul-Sudeste brasileiro reduzido de 75 barras e o plano de medição utilizado para as simulações do Sistema Especialista. As regiões selecionadas em destaque são as barras onde seus disjuntores foram modelados como elementos de baixa impedância. Considerando a nova configuração do sistema, tem-se 78-barras. Os elementos que permanecem conectadas à barra original são mostradas na Tabela 3. Os elementos que originalmente eram conectados à barra original em questão, passam a ser conectados à nova barra criada na rede.

Tabela 3 - Barras adicionadas para simulação de erro topológico de *bus-split* para Sistema 75-barras

Barra original	Barra criada	Barras que continuam conectadas à barra original
734	1200	733, 800
826	1300	637
749	1400	678, 820

6.4 - RESULTADOS

Algumas considerações sobre a apresentação dos resultados são descritas nesta seção. Estas observações são válidas para os três sistemas-teste utilizados:

- O índice de confiança de cada teste representa o quanto o resultado é confiável. Ele está relacionado a quantidade de regras ativadas com sucesso para cada tipo de erro de topologia simulado. Quando todas as condições das regras são satisfeitas, o Índice de Confiança é igual a 1,00.
- Foi considerado um limiar para o Índice de Confiança, abaixo do qual os resultados obtidos não são apresentados. Isto se justifica porque em alguns casos pequeno número de sub-regras são ativadas, mas não são suficientes para determinar a identificação do erro de topologia. Este limiar foi fixado em 0,50;
- Serão apresentados também os diagnósticos do programa PREFIL, já que o Sistema Especialista processa os resultados obtidos na pré-filtragem de medidas. Este diagnóstico apresenta apenas duas medidas que obtiveram os maiores saldos de pontuação negativa no conjunto de medidas de saldo negativo da pré-filtragem.

6.4.1 - Sistema IEEE-30 barras

Na Tabela 4 são apresentados os resultados obtidos nas simulações com o Sistema Especialista no sistema-teste IEEE 30-barras. Pode-se verificar na tabela apresentada, que todas as simulações realizadas foram diagnosticadas pelo Sistema Especialista com sucesso. Os altos valores do Índice

de Confiança são explicados pela boa redundância local, garantida para todas as barras do sistema.

Simbologia utilizada na Tabelas:

- mp - medida de injeção de potência ativa
- m_q - medida de injeção de potência reativa
- mt - medida de fluxo ativo
- mu - medida de fluxo reativo

Tabela 4 - Resultados Obtidos com Sistema IEEE 30-barras

Erro Simulado:	Diagnóstico do SEIDET:	Índice de Confiança:	Diagnóstico da Pré-filtragem:
Exclusão linha: 1 - 2	Exclusão linha: 1 - 2	1,00	mp barra 1 m _q barra 1
Exclusão linha: 1 - 3	Exclusão linha: 1 - 3	1,00	mp barra 1 m _q barra 1
Exclusão linha: 2 - 4	Exclusão linha: 2 - 4	1,00	mp barra 2 m _q barra 2
Exclusão linha: 2 - 5	Exclusão linha: 2 - 5	0,75	mp barra 2 m _q barra 2
Exclusão linha: 2 - 6	Exclusão linha: 2 - 6	1,00	mp barra 2 m _q barra 2
Exclusão linha: 3 - 4	Exclusão linha: 3 - 4	1,00	mp barra 3 m _q barra 3
Exclusão linha: 4 - 6	Exclusão linha: 4 - 6	0,75	mp barra 4 m _q barra 4

Erro Simulado:	Diagnóstico do SEIDET:	Índice de Confiança:	Diagnóstico da Pré-filtragem:
Exclusão linha: 6 - 7	Exclusão linha: 6 - 7	1,00	mp barra 6 mq barra 6
Exclusão linha: 6 - 8	Exclusão linha: 6 - 8	1,00	mt linha 8 - 28 mq barra 8
Exclusão linha: 6 - 9	Exclusão linha: 6 - 9	0,75	mp barra 6 mq barra 31
Exclusão linha: 6 - 10	Exclusão linha: 6 - 10	1,00	mp barra 6 mq barra 6
Exclusão linha: 6 - 28	Exclusão linha: 6 - 28	1,00	mp barra 6 mq barra 6
Exclusão linha: 8 - 28	Exclusão linha: 8 - 28	0,50	mp barra 8 mq barra 8
Exclusão linha: 9 - 11	Exclusão linha: 9 - 11	0,50	mp barra 9 mq barra 9
Exclusão linha: 17 - 31	Exclusão linha: 17 - 31	0,50	mp barra 17 mq barra 17
Exclusão linha: 12 - 32	Exclusão linha: 12 - 32	1,00	mp barra 12 mq barra 12
Exclusão linha: 16 - 17	Exclusão linha: 16 - 17	1,00	mp barra 16 mq barra 16
Exclusão linha: 20 - 31	Exclusão linha: 20 - 31	0,50	mp barra 20 mq barra 20
Exclusão linha: 10 - 21	Exclusão linha: 10 - 21	1,00	mp barra 10 mq barra 10
Exclusão linha: 10 - 22	Exclusão linha: 10 - 22	1,00	mp barra 10 mq barra 10
Exclusão linha: 12 - 13	Exclusão linha: 12 - 13	0,50	mp barra 12 mq barra 12

Erro Simulado:	Diagnóstico do SEIDET:	Índice de Confiança:	Diagnóstico da Pré-filtragem:
Exclusão linha: 12 - 14	Exclusão linha: 12 - 14	1,00	mp barra 12 mq barra 12
Exclusão linha: 12 - 32	Exclusão linha: 12 - 32	1,00	mp barra 12 mq barra 12
Exclusão linha: 12 - 16	Exclusão linha: 12 - 16	1,00	mp barra 12 mq barra 12
Exclusão linha: 14 - 15	Exclusão linha: 14 - 15	1,00	mp barra 14 mq barra 14
Exclusão linha: 18 - 32	Exclusão linha: 18 - 32	0,50	mp barra 18 mq barra 18
Exclusão linha: 15 - 23	Exclusão linha: 15 - 23	0,50	mp barra 23 mq barra 23
Exclusão linha: 16 - 17	Exclusão linha: 16 - 17	1,00	mp barra 16 mq barra 16
Inclusão linha: 1 - 13	Inclusão linha: 1 - 13	1,00	mt linha 12 - 13 mq barra 12
Inclusão linha: 3 - 12	Inclusão linha: 3 - 12	1,00	mt linha 3 - 12 mq barra 12
Inclusão linha: 10 - 16	Inclusão linha: 10 - 16	1,00	mp barra 16 mq barra 16
Inclusão linha: 16 - 20	Inclusão linha: 16 - 20	1,00	mt linha 16 - 20 mq barra 20
Inclusão linha: 26 - 17	Inclusão linha: 26 - 17	1,00	mt linha 26-27 mu linha 26-27
Inclusão linha: 1 - 4	Inclusão linha: 1 - 4	1,00	mq barra 7 mt linha 1-4
Inclusão linha: 23 - 27	Inclusão linha: 23 - 27	1,00	mt linha 23 - 27 mu linha 23 - 24

Erro Simulado:	Diagnóstico do SEIDET:	Índice de Confiança:	Diagnóstico da Pré-filtragem:
Inclusão linha: 19 - 22	Inclusão linha: 19 - 22	1,00	mt linha 19 - 22 mu linha 19 - 20
Inclusão linha: 12 - 23	Inclusão linha: 12 - 23	1,00	mt linha 23 - 24 mu linha 24 - 25
Inclusão linha: 15 - 26	Inclusão linha: 15 - 26	1,00	mp barra 26 mq barra 26
<i>Bus-split</i> linha: 10 - 31	<i>Bus-split</i> linha: 10 - 31	1,00	mp barra 10 mq barra 10
<i>Bus-split</i> linha: 15 - 32	<i>Bus-split</i> linha: 15 - 32	1,00	mp barra 15 mq barra 15

Na Tabela 5 é apresentado o tempo de processamento requerido pelo Sistema Especialista na identificação do erro topológico simulado. Neste valor não são considerados os tempos computacionais de execução dos programas em Fortran, que fornecem dados para o Sistema Especialista. Foi escolhido um caso representativo dentre todos os executados, que é apresentado a seguir:

Tabela 5 - Tempo transcorrido - Sistema IEEE 30 barras

Erro Topológico Simulado	Tempo transcorrido
Exclusão linha: 3 - 59	0,25 segundos

6.4.2 - Sistema-teste IEEE 57-barras

Na Tabela 6 são apresentados os resultados obtidos nas simulações com o Sistema Especialista para o sistema-teste IEEE 57-barras. Pode-se verificar na Tabela apresentada que, para este sistema-teste, apenas um erro topológico de exclusão de elemento entre as barras 21 e 22, não foi identificado. Isto ocorre em função deste erro não ter provocado alterações no sistema, detectáveis na pré-filtragem. Este fato se deve às condições de carregamento do Sistema de Potência.

Tabela 6 - Resultados obtidos com Sistema-teste 57 barras

Erro Simulado:	Diagnóstico do SEIDET:	Índice de Confiança:	Diagnóstico da Pré-filtragem:
Exclusão linha: 1 - 2	Exclusão linha: 1 - 2	1,00	mp barra 1 mq barra 1
Exclusão linha: 1 - 15	Exclusão linha: 1 - 15	1,00	mp barra 1 mq barra 1
Exclusão linha: 1 - 16	Exclusão linha: 1 - 16	0,75	mp barra 1 mq barra 16
Exclusão linha: 1 - 17	Exclusão linha: 1 - 17	1,00	mp barra 1 mq barra 1
Exclusão linha: 2 - 3	Exclusão linha: 2 - 3	1,00	mp barra 2 mq barra 2
Exclusão linha: 3-15	Exclusão linha: 3-15	1,00	mp barra 3 mq barra 3
Exclusão linha: 3 - 59	Exclusão linha: 3 - 59	1,00	mp barra 3 mq barra 3
Exclusão linha: 4 -5	Exclusão linha: 4 -5	1,00	mp barra 4 mq barra 4

Erro Simulado:	Diagnóstico do SEIDET:	Índice de Confiança:	Diagnóstico da Pré-filtragem:
Exclusão linha: 6 - 7	Exclusão linha: 6 - 7	0,75	mp barra 6 mq barra 7
Exclusão linha: 6 - 8	Exclusão linha: 6 - 8	1,00	mp barra 6 mq barra 6
Exclusão linha: 7 - 29	Exclusão linha: 7 - 29	1,00	mp barra 7 mq barra 7
Exclusão linha: 9 - 13	Exclusão linha: 9 - 13	0,75	mp barra 9 mq barra 13
Exclusão linha : 10 - 12	Exclusão linha : 10 - 12	1,00	mp barra 10 mq barra 10
Exclusão linha: 11 - 58	Exclusão linha: 11 - 58	0,50	mp barra 11 mq barra 11
Exclusão linha: 12 - 16	Exclusão linha: 12 - 16	1,00	mp barra 12 mp barra 12
Exclusão linha: 12 - 17	Exclusão linha: 12 - 17	1,00	mp barra 12 mq barra 12
Exclusão linha: 13 - 49	Exclusão linha: 13 - 49	1,00	mp barra 13 mq barra 13
Exclusão linha: 14 - 15	Exclusão linha: 14 - 15	1,00	mp barra 14 mq barra 14
Exclusão linha: 14 - 46	Exclusão linha: 14 - 46	1,00	mp barra 14
Exclusão linha: 15 - 45	Exclusão linha: 15 - 45	1,00	mp barra 15 mq barra 15
Exclusão linha: 18 - 19	Exclusão linha: 18 - 19	0,75	mp barra 18
Exclusão linha 18 - 59	Exclusão linha: 18 - 59	1,00	mp barra 18

Erro Simulado:	Diagnóstico do SEIDET:	Índice de Confiança:	Diagnóstico da Pré-filtragem:
Exclusão linha: 20 - 21	Exclusão linha: 20 - 21	0,50	mp barra 20 mq barra 20
Exclusão linha: 21 - 22	Não foi identificado	-	-
Exclusão linha: 29 - 52	Exclusão linha: 29 - 52	1,00	mp barra 29 mq barra 29
Exclusão linha: 37 - 39	Exclusão linha: 37 - 39	1,00	mp barra 37 mq barra 39
Exclusão linha: 28 - 29	Exclusão linha: 28 - 29	1,00	mp barra 28 mq barra 28
Inclusão linha: 6 - 18	Inclusão linha: 6 - 18	1,00	mp barra 18
Inclusão linha: 33 - 42	Inclusão linha: 33 - 42	1,00	mt linha 33 - 42 mq barra 31
Inclusão linha: 45 - 46	Inclusão linha: 45 - 46	1,00	mp barra 46 mq barra 46
Inclusão linha : 8 - 52	Inclusão linha : 8 - 52	1,00	mt linha 52 - 53 mq barra 52
Inclusão linha: 14 - 17	Inclusão linha: 14 - 17	1,00	mq barra 17
Inclusão linha: 9 - 52	Inclusão linha: 9 - 52	1,00	mt linha 9 - 52 mu linha 29 - 52
Inclusão linha: 2 - 46	Inclusão linha: 2 - 46	1,00	mt linha 46 - 47 mu linha 46 - 47
Inclusão linha: 11 - 19	Inclusão linha: 11 - 19	1,00	mt linha 19 - 20 mu linha 21 - 22
Inclusão linha: 13 - 16	Inclusão linha: 13 - 16	1,00	mt linha 13 - 16 mu linha 13 - 16
Inclusão linha: 9 - 55	Inclusão linha: 9 - 55	1,00	mt linha 9 - 55 mu linha 4 - 6

Erro Simulado:	Diagnóstico do SEIDET:	Índice de Confiança:	Diagnóstico da Pré-filtragem:
Inclusão linha: 22 - 45	Inclusão linha: 22 - 45	1,00	mt linha 22 - 45 mq barra 20
Inclusão linha: 34 - 55	Inclusão linha: 34 - 55	1,00	mt linha 34 - 55
Inclusão linha: 2 - 4	Inclusão linha: 2 - 4	1,00	mt linha 9 - 55 mu linha 4 - 6
Bus-split linha: 4 - 59	Bus-split linha: 4 - 59	1,00	mp barra 4 mq barra 4
Bus-split linha: 13 - 58	Bus-split linha: 13 - 58	1,00	mp barra 13 mq barra 13

Na Tabela 7 é apresentado o tempo de processamento do Sistema Especialista na identificação do erro topológico simulado para o sistema-teste 57 barras. Também neste caso não foram considerados os valores dos tempos computacionais de execução dos programas em Fortran. Foi escolhido um caso representativo dentre todos os simulados, que é apresentado a seguir:

Tabela 7 - Tempo transcorrido - Sistema IEEE 57 barras

Erro Topológico Simulado	Tempo transcorrido
Inclusão linha: 2 - 46	0,30 segundos

6.4.3 - Sistema-teste Sul-Sudeste Brasileiro - 75 barras

Na Tabela 8 são apresentados os resultados obtidos nas simulações com o Sistema Especialista no sistema-teste Sul-Sudeste Brasileiro - 75 barras. Pode-se verificar na Tabela apresentada, que

para este sistema-teste, todas as simulações realizadas foram diagnosticadas pelo Sistema Especialista, com sucesso.

Tabela 8 - Resultados obtidos com Sistema-teste Sul-Sudeste brasileiro

Erro Simulado:	Diagnóstico do SEIDET:	Índice de Confiança:	Diagnóstico da Pré-filtragem:
Exclusão linha: 3 - 209	Exclusão linha: 3 - 209	1,00	mp barra 3 mq barra 3
Exclusão linha: 93 - 181	Exclusão linha: 93 - 181	1,00	mp barra 93 mq barra 93
Exclusão linha: 93 - 243	Exclusão linha: 93 - 243	1,00	mp barra 93 mq barra 93
Exclusão linha: 98 - 208	Exclusão linha: 98 - 208	0,75	mp barra 98 mq barra 98
Exclusão linha : 165 - 186	Exclusão linha : 165 - 186	1,00	mp barra 165 mq barra 165
Exclusão linha: 172 - 176	Exclusão linha: 172 - 176	0,50	mp barra 172 mq barra 172
Exclusão linha: 181 - 182	Exclusão linha: 181 - 182	1,00	mp barra 181 mq barra 181
Exclusão linha: 208 - 217	Exclusão linha 208 - 217	1,00	mp barra 208 mq barra 208
Exclusão linha: 213 - 812	Exclusão linha: 213 - 812	1,00	mp barra 213 mq barra 213
Exclusão linha: 568 - 748	Exclusão linha: 568 - 748	0,50	mp barra 748 mq barra 748
Exclusão linha: 637 - 826	Exclusão linha: 637 - 826	1,00	mp barra 637

Erro Simulado:	Diagnóstico do SEIDET:	Índice de Confiança:	Diagnóstico da Pré-filtragem:
Exclusão linha: 678 - 749	Exclusão linha: 678 - 749	1,00	mp barra 678
Exclusão linha: 732 - 748	Exclusão linha: 732 - 748	1,00	mp barra 732 mq barra 732
Exclusão linha: 739 - 750	Exclusão linha: 739 - 750	1,00	mt linha 742-748 mq barra 733
Exclusão linha: 748 - 766	Exclusão linha: 748 - 766	1,00	mp barra 748 mq barra 748
Exclusão linha: 749 - 820	Exclusão linha: 749 - 820	1,00	mp barra 749 mq barra 749
Exclusão linha: 782 - 824	Exclusão linha: 782 - 824	1,00	mp barra 782 mq barra 782
Exclusão linha: 820 - 826	Exclusão linha: 820 - 826	1,00	mp barra 820 mq barra 820
Exclusão linha: 1031 - 1036	Exclusão linha: 1031 - 1036	0,67	mp barra 1036 mq barra 1036
Inclusão linha: 7 - 172	Inclusão linha: 7 - 172	1,00	mp barra 172 mq barra 172
Inclusão linha: 35 - 162	Inclusão linha: 35 - 162	1,00	mp barra 162 mq barra 162
Inclusão linha: 213 - 782	Inclusão linha: 213 - 782	1,00	mq barra 782
Inclusão linha: 569 - 736	Inclusão linha: 569 - 736	1,00	mt linha 569-736
Inclusão linha: 3 - 101	Inclusão linha: 3 - 101	1,00	mq barra 101
Inclusão linha: 80 - 186	Inclusão linha: 80 - 186	0,57	mq barra 186

Erro Simulado:	Diagnóstico do SEIDET:	Índice de Confiança:	Diagnóstico da Pré-filtragem:
Inclusão linha: 182 - 780	Inclusão linha: 182 - 780	1,00	mq barra 748
Inclusão linha: 678 - 808	Inclusão linha: 678 - 808	1,00	mu linha 739 - 794
Inclusão linha: 706 - 794	Inclusão linha: 706 - 794	1,00	mu linha 794 - 1200
Inclusão linha: 712 - 714	Inclusão linha: 712 - 714	1,00	mq barra 714
Inclusão linha: 710 - 722	Inclusão linha: 710 - 722	1,00	mp barra 722 mq barra 722
Inclusão linha: 749 - 800	Inclusão linha: 749 - 800	1,00	mu linha 748 - 1400
Bus-split linha: 734 - 1200	Bus-split linha: 734 - 1200	1,00	mp barra 734 mq barra 734
Bus-split linha: 826 - 1300	Bus-split linha: 826 - 1300	1,00	mp barra 826 mq barra 826

Na Tabela 9 é apresentado o tempo de processamento do Sistema Especialista na identificação do erro topológico simulado para o sistema-teste 75 barras. As condições dos testes dos sistemas anteriores são reproduzidas para este sistema-teste. O resultado é apresentado a seguir:

Tabela 9 - Tempo transcorrido - Sistema 75 barras

Erro Topológico Simulado	Tempo transcorrido
Exclusão linha: 172 - 176	0,23 segundos

6.5 - CONCLUSÕES

Neste capítulo foram apresentados os resultados de identificação de erros de topologia em Sistemas de Potência. Estes resultados foram obtidos com a utilização do Sistema Especialista - SEIDET. Para utilização deste Sistema Especialista, foram feitas considerações a respeito da distribuição de medidas no plano de medição e sobre a configuração do sistema.

Para obtenção de dados para o Sistema Especialista, foram utilizados os programas em Fortran apresentados na Seção 6.2. A interface entre estes programas e o Sistema Especialista foi feita via arquivos de dados. A seqüência de execução dos programas foi apresentada na Seção 6.2.4.

Os resultados apresentados foram satisfatórios, já que a maioria dos erros topológicos simulados foram identificados. Aqueles que não foram identificados pelo Sistema Especialista também não tiveram medidas de fluxo e injeção de potência identificadas como errôneas na pré-filtragem. A eficiência do método também pode ser analisada pelos valores do Índice de Confiança, que em sua maioria foram iguais a 1,00.

Quanto ao tempo de execução do Sistema Especialista, pode-se verificar que o mesmo independe da dimensão do sistema. Como foi mostrado o tempo de processamento ele varia na ordem de 10^{-2} segundos entre os sistemas-teste utilizados nas simulações. Isto se deve ao fato do Sistema Especialista utilizar dados advindos da pré-filtragem, cujo número independe da dimensão do sistema-teste utilizado.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

7.1 - CONCLUSÕES

Este trabalho propõe um método para identificação de erros de topologia em Sistemas de Potência. A implementação do método utiliza técnicas de Sistemas Especialistas, em razão das dificuldades existentes no tratamento do problema através de métodos já conhecidos. Estes últimos são geralmente baseados na utilização dos resultados da Estimação de Estados. As dificuldades no tratamento dos erros de topologia decorrem do fato de que seus efeitos nos resultados da Estimação de Estados são similares aos produzidos por erros grosseiros múltiplos em medidas.

O Sistema Especialista utiliza dados fornecidos pela pré-filtragem de medidas para análise e posterior identificação de erros de topologia. A pré-filtragem de medidas, por sua vez, utiliza técnicas de busca em grafos e as Leis de Kirchhoff para avaliar a consistência entre os valores de injeções e fluxos de potência reais e seus respectivos valores medidos. Busca portanto a detecção e identificação de erros grosseiros em medidas. A inclusão ou exclusão errônea de elementos tem como resultados na pré-filtragem a identificação de medidas de injeções e fluxos de potência como portadoras de erros grosseiros. A detecção destas medidas ocorre nas barras terminais dos

elementos que sofrem tal inclusão ou exclusão errônea. Através da análise destas medidas errôneas foram criadas heurísticas para identificação dos erros de topologia, que formam a base para elaboração das regras do Sistema Especialista. Tais regras são distintas para cada erro topológico analisado. Para o erro de topologia do tipo inclusão, normalmente estão presentes como medidas contaminadas por erros grosseiros pelo menos um par ativo-reativo de medida de injeção na barra terminal do elemento erroneamente incluído. Para o erro de topologia do tipo exclusão, as medidas que surgem como contaminadas por erros grosseiros nos testes de pré-filtragem são as de injeção nas duas barras extremas do elemento erroneamente excluído. Considerando estas características dos resultados da pré-filtragem, bem como características da própria configuração do sistema de potência, tem-se as regras que identificam os erros de topologia de inclusão e exclusão de elementos.

Para identificação de erros de topologia do tipo *bus-split*, são utilizadas as mesmas regras de identificação dos erros de topologia de exclusão. Isto ocorre porque conexões entre segmentos de barras são modeladas como elementos de baixa impedância. Quando ocorre a identificação de erro de exclusão destes elementos, são ativadas regras específicas que o identificam como erro do tipo *bus-split*. Estas regras específicas são dependentes do sistema-teste utilizado, pois a localização das conexões modeladas para erro de topologia de bus-split varia de acordo com a rede elétrica.

7.1.1 - Apreciação dos Resultados

Os resultados obtidos através de simulações com o SEIDET foram apresentados no Capítulo 6. Foram utilizados três sistemas-teste com objetivo de analisar o desempenho do método proposto. Os resultados obtidos são satisfatórios, pois todos os erros simulados foram identificados, inclusive para os testes realizados com o sistema equivalente de 75 barras da rede interligada do Sul-Sudeste do Brasil. Em função do fato de que a metodologia utilizada não faz uso de operações com matrizes de grandes dimensões, o tempo de processamento é relativamente pequeno e praticamente independente da dimensão do sistema, já que os dados utilizados pelo SEIDET restringem-se à vizinha do região onde ocorre o erro de topologia.

O sucesso obtido nos testes pode ser avaliado através do Índice de Confiança. Estes índices apresentam o valor igual a 1,00 quando todas as regras para identificação do erro são ativadas com sucesso. Este índice é menor quando alguma regra ou sub-regra falha. Isto ocorre pela insuficiência de dados advindos da pré-filtragem de medidas. Quando a pré-filtragem deixa de detectar medidas errôneas, isto em geral é consequência da redundância local do elemento, bem como da própria configuração do sistema de potência. Outro fator que pode influenciar nos resultados é o nível de carregamento do sistema de potência.

7.2 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com sugestões para trabalhos futuros, e aprimoramentos no método proposto tem-se:

- Simulação de erros de topologia múltiplos;
- Implementação da metodologia citada no Capítulo 2 (WU e LIU - 1989), para representação de erros de topologia do tipo *bus-split*;
- Considerar também como erro de topologia de exclusão a abertura de apenas uma extremidade da linha de transmissão, através de incorporação no Sistema Especialista de regras de decisão apropriadas para esta situação;
- Incorporação de um procedimento combinatório baseado no conceito de árvore binária, conforme proposto em (MONTICELLI, 1986), para realizar a triagem de diagnósticos em casos nos quais os índices de confiança determinados pelo método proposto neste trabalho não apontam com nitidez a causa real da anomalia detectada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(AMARAL, 1987) - AMARAL S. - “Métodos para Processamento de Erros Grosseiros Múltiplos em Estimadores de Estado Seqüenciais - Ortogonais” - Dissertação de Msc., UFSC, Florianópolis, SC, Nov. 1987.

(ASSADIAN e outros, 1994) - ASSADIAN M., GODDARD R.J., HONG H.W., FRENCH D. - “Field Operational Experiences with on Line State Estimator” - IEEE Trans. PWRS, Vol. 9, No. 1, Feb, 1994 - pp 50 - 56.

(BONANOMI E GRAMBERG, 1983) - BONANOMI P., GRAMBERG G. - “Power System Data Validation and State Calculation by Network Search Techniques” - IEEE Trans. PWRS, Vol. PAS-102, No 1, Jan, 1983 - pp. 238 - 249.

(CLEMENTS e DAVIS, 1988) - CLEMENTS K. A., DAVIS P. W. - “Detection and Identification of Topology Errors in Electric Power Systems” - IEEE Trans. PWRS, Vol. 3, No. 4, Nov, 1988 - pp 1748 - 1753.

- (FREIRE, 1989) - FREIRE L. M. - "Identificação de Erros Topológicos na Estimação Estática de Estado em Sistemas de Energia Elétrica" - Dissertação de MSc., UNICAMP, Campinas, SP, 1989.
- (FREITAS, 1995) - FREITAS F. D. - "Ajuste de Estabilizadores de Sistemas de Potência via Controle Ótimo com restrições Estruturais" - Tese de Doutorado, UFSC, Florianópolis, SC, Março - 1995.
- (HANDSCHIN e outros, 1975) - HANDSCHIN E., SCHWEPPE F.C. KOHLAS J., FIECHTER A. - "Bad Data Analysis for Power System State Estimation" - IEEE Trans. PWRS, Vol. PAS-94, No. 2, Mar/Apr, 1975 - pp 329 -337.
- (HUNEAULT e outros, 1994) - HUNEAULT M., ROSU C., MANOLIU R., GALIANA F.D. - "A Study of Knowledge Engineering Tools in Power Engineering Applications" - IEEE Trans. PWRS, Vol.9, No. 4, Nov, 1994 - pp 1825 - 1832.
- (KOGLIN e outros - 1986) - KOGLIN H-J, TH. NEISIUS, G.BEIßLER AND K. D. SCHMITT - - "Bad Data Detection and Identification" - Electrical Power & Energy Systems, Vol.12, No. 2, April 1990, pp. 94-103.

(LEÃO J.A. - 1990) - LEÃO J. A. - “Erros Topológicos na Estimação de Estados em Sistemas de Potência: Uma Abordagem Geométrica, Detectabilidade e Identificação” - Dissertação de MSc, UFSC, Florianópolis, SC, 1990.

(LIU e outros, 1993) - LIU C. C., TOMSOVIC K., KIRSCHEN D., MARATHE H., MOMOH J., WOLLWENBERG B., LIU C. C., TALUKDAR S., ROSENWALD G. - “A Tutorial Course on Knowledge-Based System Techniques with Applications to Power Systems” - IEEE Power Engineering Society, Oct, 1993.

(LUGTU e outros, 1980) - LUGTU R. L., HACKETT D. F., LIU K. C., MIGHT D. D. - “Power System State Estimation: Detection of Topological Errors” - IEEE Trans. PWRS, - Vol.PAS-99, No 6, Nov/Dec, 1980 - pp 2406-2411.

(OMAR, 1992) - OMAR N. - “Introdução aos Sistemas Especialistas” - Minicurso - 9º CBA - UFES - Vitória/ES - Brasil , 1992 - pp 52 - 61.

(MARCHIORI DA LUZ, 1991) - MARCHIORI DA LUZ J. - “Um Método Sistemático para Pré-filtragem de Medidas na Estimação de Estados em Sistemas Elétricos de Potência” - Dissertação de Msc, UFSC, Florianópolis, SC, 1991.

(MAZI e outros, 1986) - MAZI A. A., WOLLENBERG B. F., HESSE M. H. - “Corrective Control of Power System Flows by Line and Bus-Bar Switching” - IEEE Trans. PWRS, Vol. 1, No. 3, Aug, 1986 - pp 258 - 264.

- (MILI e outros, 1984) - MILI, L., VAN CUTSEM, T., RIBBENS-PAVALLE, M. - "Hypothesis Testing Identification - A New Method of Bad Data Analysis in Power System State Estimation", IEEE Trans. on PA&S, Vol. PAS-103, No.11, 1984.
- (MILI e outros, 1985) - MILI, L., VAN CUTSEM, T., RIBBENS-PAVALLE, M. - "Bad Data Identification Methods in Power System State Estimation", IEEE/PES 1985 Winter Meeting, New York, 1985.
- (MONTICELLI, 1986) - MONTICELLI A., WU F. F., YEN M. - "Multiple Bad Data Identification for State Estimation by Combinatorial Optimization" - IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.1, No.3, Jul. - pp. 361 - 369.
- (PAI, 1979) - PAI, M. A. - "Computer Techniques in Power Systems Analysis", Tata McGraw-Hill, New Delhi, 1979.
- (PRAIS e BOSE , 1988) - PRAIS M., BOSE A. - "A Toplogy Processor that Network Modifications Over Time" - IEEE Trans. PWRS, - Vol. 3, No. 3, Aug, 1988 - pp. 992 - 1998.
- (SAKAGUCHI, 1988) - SAKAGUCHI T., TANAKA H., UENISHI K., GOTOH T., SEKINE Y. - "Prospects of Expert Systems in Power System Operation" - Electrical Power & Energy Systems, Vol. 10, No. 2, Apr. 1988 - pp 71 - 82.

- (SASAKI e outros - 1989) - SASAKI H., KAWAHARA K., TAKASAKI K., YORINO N., YOKOYAMA R., KITAGAWA M., SUGIHARA H. - "A Novel Scheme for Validation and Verification of Rule Bases in Expert Systems" - Second Symposium on Expert Systems Application to Power Systems, Jul, 1989. - pp 416 - 422
- (SCHWEPPE e ROM, 1970) - SCHWEPPE, F. C.; ROM, D. B., - "Power System Static State Estimation, Part II - Approximate Model", IEEE Trans. on PA&S, Vol. PAS-89, No.1, 1970.
- (SINGH e GLAVITSCH, 1991) - SINGH N., GLAVITSCH H. - "Detection and Identification of Topological Errors in Online Power System Analysis" - IEEE Trans. PWRS, Vol. 6, No.1, Feb, 1991 - pp 324 - 330.
- (SINGH e OESCH, 1994) - SINGH N., OESCH F. - "Practical Experience With Rule-based On-line Topology Error Detection" - IEEE Trans. PWRS, Vol. 9, No.2, May, 1994 - pp 841 - 847
- (SIMÕES COSTA e LEÃO, 1993) - SIMÕES COSTA A., LEÃO J. A. (1993) - "Identification of Topology Errors in Power System State Estimation" - IEEE Trans. PWRS, Vol.8, No.4, Nov, 1993 - pp 1531 - 1538.

(TORRES e SILVA, 1993) - TORRES G. L. E SILVA A.P.A - “Aplicação de Sistemas Inteligentes em Engenharia de Potência” - Revista da Sociedade Brasileira de Automática - Vol.5 Out/Nov 1994 - Mini-Cursos do 10º Congresso Brasileiro de Automática e 6º Congresso Latino Americano de Controle Automático.

(WIELEMAKER , 1992) - WIELEMAKER J. - “SWI-Prolog 1.6 - Reference Manual” - University of Amsterdam - 1992.

(WU e LIU, 1989) - WU F.F. LIU W.H.E. - “Detection of Topology Errors by State Estimation” - IEEE Trans. PWRs, Vol. 4, No.1 - Feb, 1989 - pp 176 - 183.