

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

REPRESENTAÇÃO DE PARTES PARCIALMENTE OBSER-
VÁVEIS DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

ANTONIO CHAVES PIZZOLANTE

Orientador: Alcir José Monticelli

Tese de Mestrado apresentada à
Faculdade de Engenharia da Uni-
versidade Estadual de Campinas

AGRADECIMENTOS

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho e em especial

a Alcir José Monticelli pela orientação,

a Brian Stott (do Cepel) pela colaboração,

ao colega Sigmar Maurer Deckmann pelas discussões e sugestões,

aos colegas Carlos Alberto F. Murari e Vivaldo F. da Costa pela ajuda prestada,

a Srta. Elza Aoki pelo trabalho datilográfico,

a Elizabeth Giner P. pelo trabalho de revisão,

desejo expressar os meus agradecimentos.

Este trabalho faz parte de um Projeto sobre Equivalentes Externos, que contou com o apoio técnico e financeiro do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL (Grupo ELETROBRÁS).

ÍNDICE

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO..... 1

CAPÍTULO II

FUNÇÕES DE SEGURANÇA NO CONTROLE EM TEMPO-REAL DE SISTEMAS DE POTÊNCIA..... 3

2.1. Controle Hierárquico e Observabilidade em Sistemas de Potência..... 3

2.1.1. Controle Hierárquico..... 3

2.1.2. Observabilidade..... 4

2.2. Definições..... 7

2.2.1. Segurança no Sistema de Potência..... 7

2.2.2. Estados do Sistema..... 9

2.2.3. Mudanças de Estado..... 9

2.3. Funções que dependem apenas de Informações do Sistema Observável..... 11

2.3.1. Obtenção da Topologia da Rede e Estimação de Estado do Sistema Observável..... 11

2.3.2. Monitoramento do Estado do Sistema..... 12

2.3.3. Previsão de Demanda..... 12

2.4. Representação de Regiões Parcialmente Observáveis dos Sistemas de Potência..... 13

2.5. Funções que dependem da Representação do Sistema Observável..... 14

2.5.1. Análise de Segurança..... 14

2.5.2. Controle de Emergência..... 17

2.5.3. Controle Restaurativo..... 17

CAPÍTULO III

MODELOS PARA REPRESENTAÇÃO DE REGIÕES PARCIALMENTE OBSERVÁVEIS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA..... 19

3.1. Equivalente Externo.....	19
3.2. Fluxo de Carga Equivalente.....	20
3.3. Ajuste do Modelo Externo.....	21
3.4. Desenvolvimento de Modelos para Representar Regi- ões Parcialmente Observáveis.....	23
3.4.1. Modelos de Fluxo de Carga Equivalente (F.C.E.).....	23
3.4.1.1. Fluxo de Carga Equivalente com 90% das Injeções Externas.....	23
3.4.1.2. Fluxo de Carga Equivalente com 0% das Injeções Externas.....	24
3.4.1.3. Conclusões.....	25
3.4.2. Modelos de Equivalentes Externos.....	26
3.4.2.1. Fluxo de Carga Equivalente com 0% das Injeções Externas e Redução das Barras de Carga Externas.....	26
3.4.2.2. Equivalente WARD.....	27
3.4.2.3. Equivalente WARD-Estendido.....	31

CAPÍTULO IV

TESTES E RESULTADOS.....	41
4.1. Introdução.....	41
4.2. Descrição das Redes Testadas.....	41
4.3. Resultados Obtidos.....	46
4.4. Perda Temporária de Observabilidade.....	52

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES.....	54
-----------------	----

APÊNDICE A

MODELOS EQUIVALENTES PARA UM SISTEMA DE QUATRO BAR- RAS.....	58
A.1. Descrição da Rede e Condições de Operação.....	58

A.2. Fluxo de Carga Equivalente com 90% das Injeções Externas.....	59
A.3. Fluxo de Carga Equivalente com 0% das Injeções Externas.....	60
A.4. Fluxo de Carga Equivalente com 0% das Injeções Externas e Redução das Barras de Carga Externas.....	61
A.5. Equivalente WARD.....	61
A.6. Equivalente WARD-Estendido.....	62
A.7. Resultados.....	66

APÊNDICE B

OBTENÇÃO DE CIRCUITOS EQUIVALENTES ATRAVÉS DO MÉTODO DE ELIMINAÇÃO DE GAUSS.....	68
B.1. Método de Eliminação de Gauss.....	68
B.2. Obtenção de Redes Equivalentes através da Redução de Circuitos.....	72

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	75
---------------------------------	----

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos tem-se dado ênfase à segurança nos sistemas interligados de energia elétrica; o objetivo é garantir a continuidade e a qualidade do serviço de atendimento das cargas; modernos centros de controle executam várias funções avançadas com essa finalidade.

Os sistemas interligados constituem-se de um grande número de subestações e linhas de transmissão pertencentes a várias companhias, que fornecem energia a cargas distribuídas por extensas áreas; a execução de determinadas funções de controle e de planejamento só é viabilizada com o uso de modelos equivalentes para representar as partes dos sistemas interligados que não são totalmente observáveis pelos centros de controle. A obtenção destes modelos equivalentes não é ainda um problema resolvido, neste trabalho estudam-se métodos com o objetivo de usá-los na representação de determinadas partes dos sistemas interligados.

No Capítulo II apresentam-se funções de controle que são executadas em tempo-real, visando melhorar a segurança e a confiabilidade dos sistemas de energia elétrica. Subdividem-se estas funções em dois grupos: aquelas que para sua execução dependem de uma representação do sistema externo e outras cuja execução não depende deste tipo de representação. Neste capítulo de finem-se (sob o ponto de vista de controle em tempo-real de sistemas de potência) alguns termos como: observabilidade, estados operativos do sistema, mudanças de estado, etc...

No Capítulo III descrevem-se modelos de equivalentes usados para representar partes parcialmente observáveis dos sistemas de energia elétrica. Estes modelos são, basicamente, de dois tipos: equivalentes externos do tipo WARD e modelos de fluxo de carga equivalente.

No Capítulo IV mostram-se os resultados dos testes realizados com os modelos apresentados; usaram-se, nos testes, quatro sistemas, dois dos quais representam o sistema interligado da região Sudeste do Brasil.

No Capítulo V são apresentadas as conclusões.

No Apêndice A usam-se os seis modelos equivalentes, apresentados anteriormente, para representar a parte externa de um sistema de quatro barras. Mostram-se, também, em detalhes, os resultados de um teste, onde se simulou contingência em uma das linhas da parte interna deste sistema e representou-se a parte externa por um dos modelos equivalentes.

No Apêndice B descreve-se o método de eliminação de Gauss e o seu uso na obtenção de circuitos equivalentes.

CAPÍTULO II

FUNÇÕES DE SEGURANÇA NO CONTROLE EM TEMPO-REAL DE SISTEMAS DE POTÊNCIA

2.1. Controle Hierárquico e Observabilidade em Sistemas de Potência

2.1.1. Controle Hierárquico

Um sistema interligado constitui-se de vários sistemas individuais pertencentes a companhias que atuam em regime de monopólio no mercado de fornecimento de energia elétrica para uma determinada região. Os sistemas individuais são interligados com o objetivo de diminuir seus custos operacionais, aumentar a segurança e a confiabilidade, e melhorar a qualidade de serviço de atendimento das cargas. Essa interligação, por outro lado, acarreta maiores problemas operacionais, que, para serem resolvidos, exigem a utilização de formas de controle mais complexas, uso intensivo de computadores, meios de comunicação avançados e operadores bem treinados.

A escolha de um determinado tipo de estrutura de controle depende fundamentalmente da especificidade da situação, pois, deve ser considerada, em cada caso, a necessidade de se dosar convenientemente o uso de: computadores, operadores e meios de comunicação. Numa das possíveis estruturas de controle, tem-se dois níveis de hierarquia. O nível hierárquico I, corresponde ao Centro Nacional de Despacho, que recebe informações das várias partes do sistema

interligado, através de seus Centros Regionais de Controle (nível hierárquico II), e as processa definindo normas gerais de operação para cada sistema individual. A Fig. - 2.1 ilustra esse tipo de estrutura. Baseando-se nessas normas gerais, os Centros Regionais definem a forma de operação para os seus sistemas.

2.1.2. Observabilidade

Uma parte de um sistema de potência é considerada observável se são disponíveis informações suficientes para se estimar o estado nas suas barras. As informações necessárias para se fazer esse cálculo são de dois tipos:

- a) topológicas: "status" dos disjuntores e chaves trifásicas, parâmetros das linhas de transmissão e dos transformadores;
- b) operacionais: injeções de potência, magnitudes das tensões nas barras e fluxos de potência.

Os dados operacionais caracterizam-se por estarem mudando continuamente; para que os centros de controle consigam mantê-los atualizados, é necessário se dispor de um grande número de canais de comunicação. Por outro lado, as mudanças na configuração da rede não são tão frequentes e, por isso, pode-se obter os dados topológicos "off-line" e atualizá-los conforme ocorram mudanças importantes.

Considerando-se as dificuldades de obtenção em tempo-real de informações operacionais, cada Centro Regional de Controle (C.R.C.) recebe essas informações apenas de algumas regiões do sistema interligado. Essas regiões, consideradas observáveis para o

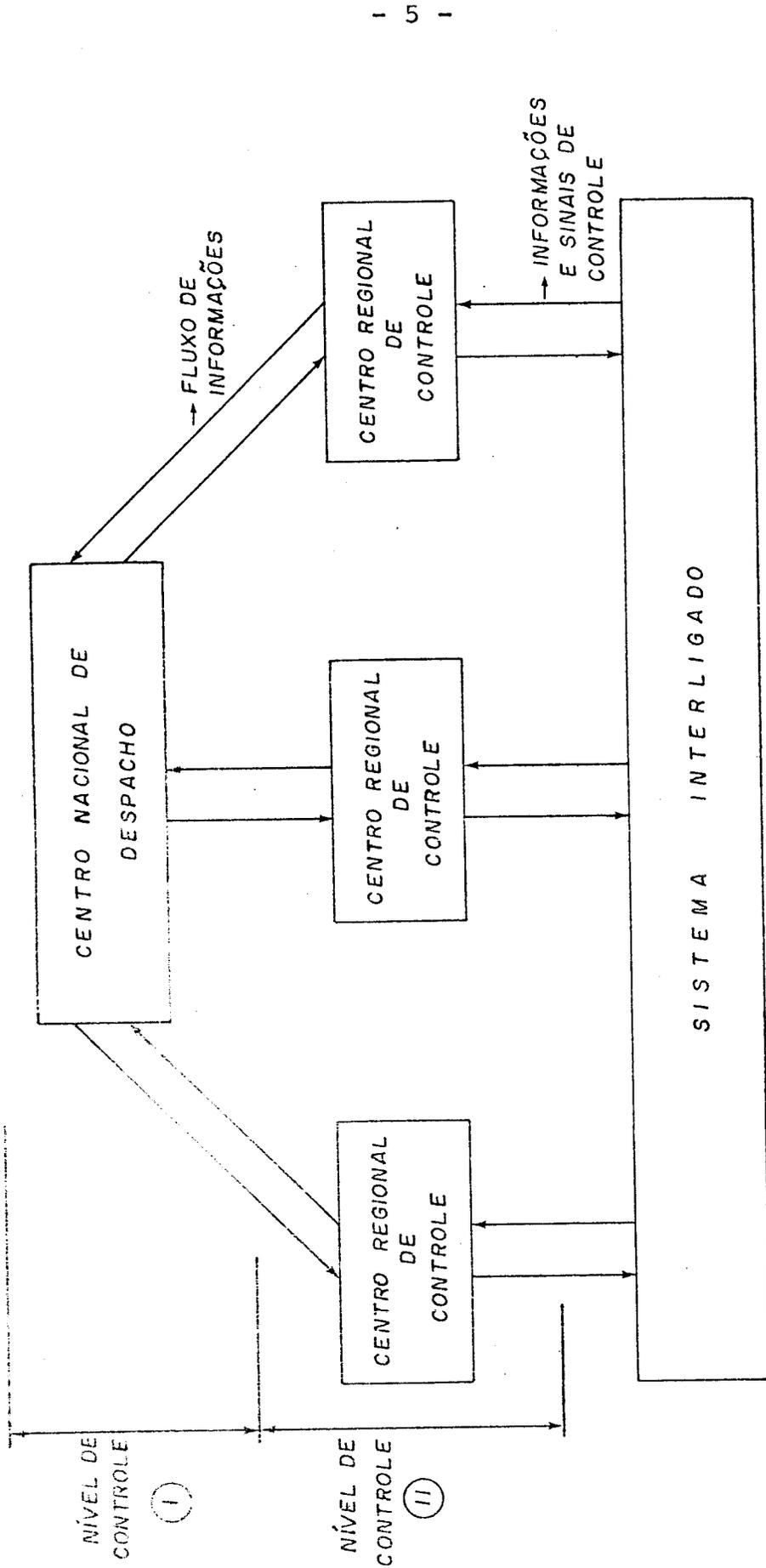


Fig. 2.1 - Estrutura de Controle em Tempo-Real em Dois Níveis para um Sistema Elétrico de Potência

respectivo Centro Regional, compreendem as partes do sistema sob seu controle, que operam em tensões mais altas, das barras de geração, e às vezes, de algumas subestações importantes dos sistemas vizinhos. As outras partes do sistema interligado: subsistemas de baixa tensão (distribuição) e sistemas vizinhos (sob controle de outros Centros Regionais), são considerados não observáveis.

No esquema de controle com dois níveis de hierarquia, apresentado anteriormente, o Centro Nacional de Despacho (C.N.D.) recebe informações detalhadas do sistema interligado através dos C.R.C.. Desta forma, todo o sistema interligado (gerações e sistemas de transmissão) é observável pelo C.N.D.. Um problema possível, é a perda temporária de canais de comunicação entre o C.N.D. e um dos C.R.C.; a região correspondente a esse C.R.C. deixará de ser observável pelo C.N.D..

A Fig. - 2.2 apresenta um sistema interligado constituído de três partes: sistema interno, fronteira e sistema externo. Do ponto de vista do Centro de Controle, o seu sistema interno e a fronteira correspondem à parte do sistema interligado que lhe é observável. Por sua vez, o seu sistema externo corresponde às outras partes do sistema interligado que não lhe são observáveis.

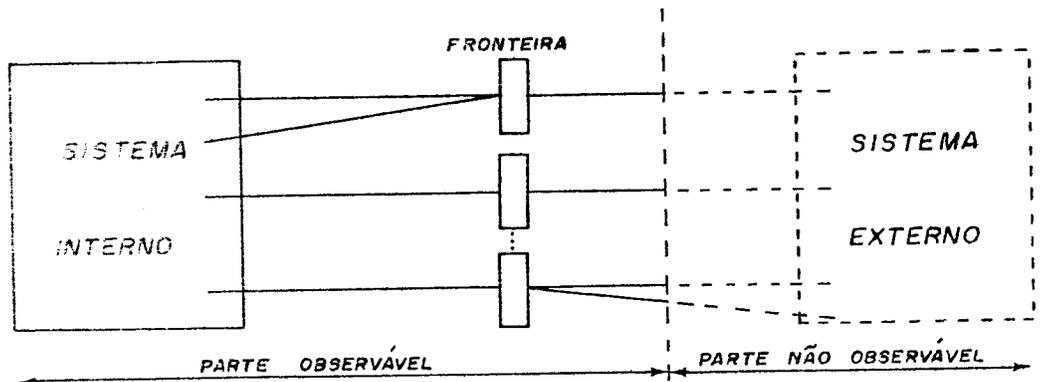


Fig. 2.2 - Divisão do Sistema Interligado

2.2. Definições

2.2.1. Segurança no Sistema de Potência

Um sistema de potência muda continuamente de estado, conforme as variações de suas cargas. Estas variações podem ser bruscas, principalmente quando ocorrem contingências, ou mesmo, devido às próprias ações de controle. Conforme o estado do sistema, o funcionamento dos equipamentos que o compõem pode ficar comprometido, daí a necessidade de se acompanhar os sucessivos estados de operação, bem como a de prever, a partir do estado de funcionamento atual, o estado futuro.

Esse acompanhamento pode ser feito através de centros de controle, equipados com computadores, que recebem informações atualizadas sobre magnitudes de tensões e/ou injeções de potência em algumas barras, e fluxos de potência em algumas linhas de transmissão; processam-nas, e apresentam os resultados ao operador, através de equipamentos que permitem fácil visualização do estado operativo de cada componente do sistema.

De posse dessas informações, o operador pode tomar decisões que aumentem a segurança e a confiabilidade do sistema. A tendência é fazer com que várias das funções executadas pelo operador passem a ser feitas automaticamente, através de uma malha fechada de controle.

Este tipo de controle torna-se necessário à medida que os sistemas se interligam mais e mais, e as decisões para mantê-los em segurança ficam cada vez mais difíceis de serem tomadas; pois o número de componentes controlados é bastante grande e as opções

de controle devem levar em consideração, não apenas o estado atual do sistema, mas também o possível estado futuro.

O objetivo principal do sistema de potência é o atendimento das cargas dentro de padrões que definem uma boa qualidade de serviço, ou seja, tensões e frequência devem estar dentro de faixas de variação pré-determinadas e não deve haver interrupção do fornecimento. Além disso, o equipamento de geração e transmissão deve ficar livre de sobrecargas e o custo do KW fornecido ao consumidor deve ser o menor possível.

Esses objetivos podem ser colocados em termos de restrições; para isso se definem três conjuntos de restrições:

Restrições de Carga - representam as injeções de potência ativa e reativa nas barras de carga e as injeções de potência ativa nas barras de geração; podem ser expressas em termos de equações do tipo $G(\underline{x}, \underline{u}, T) = 0$, onde \underline{x} é o vetor das variáveis dependentes, \underline{u} é o vetor das variáveis de controle e T representa a topologia do sistema;

Restrições de Operação - representam os limites impostos às magnitudes das tensões nodais, aos fluxos de potência aparente nas linhas de transmissão e transformadores e às injeções de potência reativa nos nós de geração; podem ser expressas em termos de inequações do tipo $H(\underline{x}, \underline{u}, T) \leq 0$;

Restrições de Segurança - exigem que todas as restrições de carga e de operação sejam obedecidas, mesmo após a ocorrência de uma das contingências possíveis; podem ser expressas em termos de inequações do tipo $S(\underline{x}, \underline{u}, T) \leq 0$.

2.2.2. Estados do Sistema

Baseando-se nos três conjuntos de restrições definidos; de carga, de operação e de segurança, podem-se caracterizar quatro estados operativos do sistema de potência:

Normal Seguro - Neste estado são obedecidos os três conjuntos de restrições: de carga, de operação e de segurança;

Normal Inseguro ou Alerta - São obedecidas as restrições de carga e de operação; nem todas as restrições de segurança são obedecidas;

Emergência - Quando pelo menos uma das restrições de operação deixa de ser obedecida;

Restaurativo - As restrições de operação são obedecidas, mas pelo menos uma das restrições de carga não é obedecida.

2.2.3. Mudanças de Estado

As mudanças de estado no sistema devem-se a:

eventos (evolução natural das cargas e/ou possíveis contingências) ou ações voluntárias de controle. A transição entre os quatro estados anteriormente definidos está ilustrada na Fig. - 2.3.

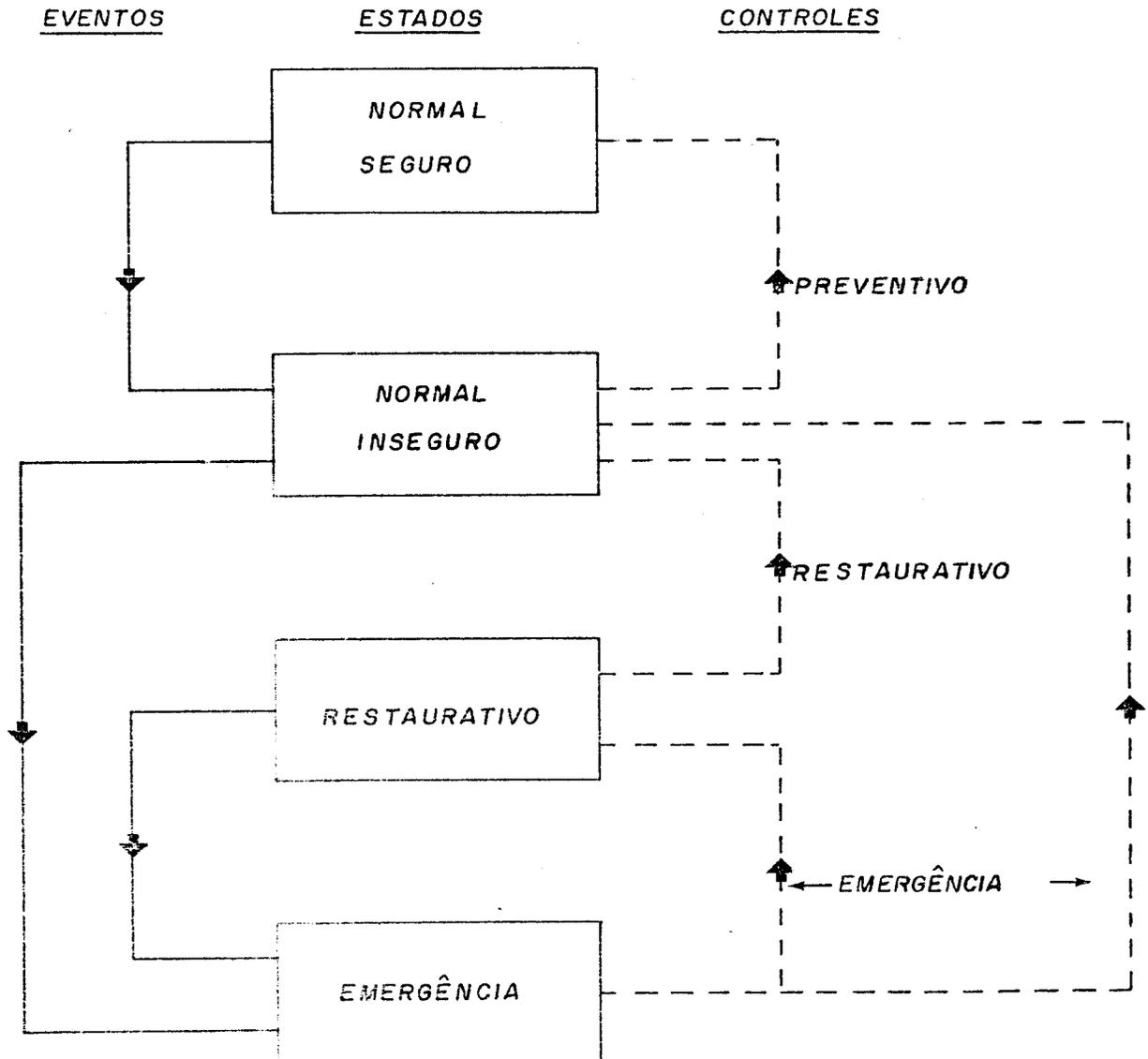


Fig. 2.3 - Estados Operativos do Sistema e Transições entre Estados devidas a Eventos e Ações de Controle

2.3. Funções que dependem apenas de Informações do Sistema Observável

Para garantir a segurança do sistema interligado executam-se em tempo-real várias funções de controle. Algumas destas funções podem ser realizadas no sistema interno, independentemente de se dispor de informações sobre o sistema externo. Por exemplo, uma empresa integrante de um sistema interligado pode obter um estado estimado para suas barras usando apenas dados obtidos em seu próprio sistema. O mesmo ocorrendo na obtenção de uma configuração para sua rede, na previsão de demanda e na monitoração do estado. Existem, no entanto, outras funções que para serem realizadas dependem de representação, mesmo que aproximada, do sistema externo.

2.3.1. Obtenção da Topologia da Rede e Estimação do Estado do Sistema Observável

Dada a grande variedade de equipamentos envolvidos na coleta e transmissão de dados, existe a possibilidade de haver dados com erros grosseiros; para resolver esse problema faz-se uma filtragem preliminar nos dados recebidos. Esta filtragem é realizada verificando-se a consistência dos dados através de cálculos como: lei de nós, fluxos de carga simplificados, ou mesmo, simples comparações do "status" de disjuntores e chaves trifásicas com informações analógicas dos fluxos nas linhas a eles conectadas.

A partir do "status" das chaves trifásicas e disjuntores pode-se obter, através de um configurador, a topologia da rede que está em operação, e também definir os equipamentos que estão em funcionamento.

Dispondo-se da configuração da rede; dos parâmetros das linhas e transformadores; dos dados sobre

magnitudes de tensões e injeções de potência em algumas barras, e dos fluxos de potência em algumas linhas, podem-se utilizar técnicas de estimação de estado que, aproveitando-se de redundância nos dados disponíveis e usando correlação estatística, fornecem um "melhor" vetor estimado para as barras do sistema observável.

2.3.2. Monitoramento do Estado do Sistema

Dispondo-se das características de cada equipamento do sistema; da configuração e parâmetros da rede de transmissão, e do estado das barras, fornecido pelo estimador de estado, torna-se possível calcular todas as variáveis de interesse do sistema interligado e comparar os valores obtidos com os valores que expressam as restrições operacionais do sistema. Além disso, podem ser verificados os intercâmbios entre áreas, atendimento da demanda, etc...

Caso o estado operativo seja normal, a próxima etapa é a análise de segurança (estática), senão, aciona-se um dos dois tipos de controle: emergência e restaurativo; conforme o estado de operação do sistema.

2.3.3. Previsão de Demanda

A previsão, a curto prazo, da carga (MW, MVAR) do sistema é necessária para que se possa prever a geração tão próxima quanto possível da demanda de energia elétrica. Além disso, é essencial para a execução de outras funções de controle em tempo-real (p. ex., despacho econômico e análise de contingências), que necessitam de um conhecimento antecipado

do comportamento das cargas. A possibilidade do operador fazer, por exemplo, análise de contingências, com base em um estado de operação previsto, lhe dá condições de executar, em tempo hábil, manobras que evitem situações críticas.

Uma previsão individual de carga para cada barramento pode ser feita a partir de uma previsão da carga total do sistema, e usando-se fatores de distribuição de potência. Para que as previsões obtidas sejam confiáveis, é necessário, que, tanto o arquivo de dados para o "programa de previsão de carga", como os fatores de distribuição de potência, sejam periodicamente atualizados. Isto pode ser feito utilizando-se, por exemplo, os resultados do estimador de estado.

2.4. Representação de Regiões Parcialmente Observáveis dos Sistemas de Potência

Na execução de determinadas funções de controle, por exemplo: análise de contingências, análise de curto circuito, fluxo de carga ótimo, planejamento da operação, etc.... é necessário representar, não apenas o sistema interno e a fronteira, mas também as outras partes do sistema interligado (sistema externo); pois, nessas funções, as reações do sistema externo às mudanças ocorridas no sistema interno desempenham um papel fundamental.

Na análise de contingências ocorrem situações que evidenciam a necessidade de representação do sistema externo, quando, por exemplo, são simuladas contingências em linhas de transmissão do sistema interno, cujas saídas causam variações significativas nos fluxos de intercâmbio. Tais variações podem ser interpretadas como reações do sistema externo. Nas simulações essas reações só ocorrerão se o sistema externo estiver representado.

A representação do sistema externo é feita através de modelos equivalentes que, apesar de serem uma simplificação do sistema real, devem simular as suas reações às mudanças que ocorram no sistema interno.

Na obtenção dos modelos equivalentes consideram-se, principalmente, os seguintes aspectos:

- (i) disponibilidade de informações, em tempo-real;
- (ii) tempo de computação e área de memória do computador disponíveis para a execução das funções de controle;
- (iii) precisão necessária para os resultados;
- (iv) necessidade ou não de executar as funções de controle inclusive para algumas partes do sistema externo.

Neste trabalho é dada ênfase a modelos equivalentes para uso em tempo-real, no entanto, pode-se também usá-los em estudos "off-line".

2.5. Funções que dependem da Representação do Sistema Observável

2.5.1. Análise de Segurança

A análise de segurança consiste de duas funções: a análise de contingências e o controle preventivo. O objetivo da análise de contingências é verificar se o estado normal do sistema é seguro ou não, baseando-se em um conjunto de contingências possíveis. Através do controle preventivo define-se a ação preventiva a ser tomada quando o sistema é considerado inseguro.

Neste trabalho, a preocupação maior é com a análise de contingência estática, ou seja, a análise do sistema baseia-se em uma situação de regime permanente. Na análise de contingências, primeiramente define-se uma lista de contingências prováveis, baseando-se na configuração da rede e no estado do sistema, atuais ou futuros. Posteriormente simulam-se estas contingências e verifica-se quais delas podem causar emergências. Na lista de contingências prováveis incluem-se todas as contingências simples (saída de cada componente importante do sistema: geradores, cargas, linhas de transmissão e transformadores) e algumas contingências múltiplas. Esta lista deverá ser atualizada conforme ocorram mudanças importantes na rede de transmissão ou no estado do sistema interno. As contingências são selecionadas manualmente pelo operador, baseando-se na experiência de operação do sistema e estudos realizados "offline"; apenas algumas funções auxiliares, tais como atualização dos dados do sistema e reordenação da lista, são realizadas automaticamente pelo computador. Considerando-se que o número de contingências a ser testado é geralmente grande, pode-se fazer as simulações em dois estágios: (a) usando-se métodos simplificados, simulam-se as contingências e obtêm-se as mais críticas; (b) faz-se um estudo mais detalhado para estas contingências mais críticas.

O método de fluxo de carga DC e os fatores de distribuição são os métodos tradicionalmente usados na análise de contingências. O método de fluxo de carga desacoplado rápido [1] apresenta características que o tornam recomendável para o uso em análise de contingências. No entanto, outros métodos de fluxo de carga AC, como o método de Newton-Raphson e o fluxo de carga AC linearizado [2] também podem ser utilizados.

No controle preventivo, as ações tomadas para tornar o sistema seguro são do tipo: aumento da reserva girante, reescalonamento de gerações (MW e MVAR), modificações na estrutura da rede e mudanças nos "taps" dos transformadores. As ações de controle preventivo podem ser formuladas como um problema de fluxo de carga ótimo acrescido das restrições de segurança, formalizado, por exemplo, da seguinte maneira:

Minimizar:

$F(\underline{x}, \underline{u}, T)$ função objetivo

sujeito a:

$G(\underline{x}, \underline{u}, T) = 0$	restrições de carga
$H(\underline{x}, \underline{u}, T) \leq 0$	restrições de operação
$S(\underline{x}, \underline{u}, T) \leq 0$	restrições de segurança

onde:

G, H e S	são funções vetoriais
F	é uma função escalar
\underline{x}	é um vetor das variáveis dependentes
\underline{u}	é um vetor das variáveis de controle
T	representa a topologia do sistema

Isto representa um problema de programação não linear bastante grande. Uma das maneiras de amenizar o problema é usar modelos equivalentes reduzidos, para

representar o sistema externo, além de utilizar métodos de programação linear.

Uma das dificuldades do controle preventivo em tempo-real é decidir realizar ou não as ações de controle definidas. Considerando-se, por exemplo, que o sistema está operando a um custo mínimo, a ação de controle sempre implicará em um custo adicional. É preciso verificar se compensa alterar o ponto de operação do sistema para torná-lo seguro, ou assume-se o risco de ocorrer uma emergência. Para se tomar essa decisão não existem regras claramente definidas, por isso, é muito difícil automatizar totalmente o controle preventivo.

2.5.2. Controle de Emergência

O objetivo do controle de emergência é levar o sistema do estado de emergência para o estado normal. Isto pode ser conseguido, por exemplo, através de reprogramação nas gerações (MW, MVAR), modificações na estrutura da rede e, em casos mais críticos, através do desligamento de cargas. Pode-se também usar os programas do controle de emergência de uma forma preventiva, para planejar ações a serem tomadas caso ocorram determinados estados de emergência.

As ações de controle, acima citadas, podem ser obtidas através da resolução de problemas de otimização do tipo apresentado anteriormente para o controle preventivo.

2.5.3. Controle Restaurativo

O objetivo deste controle é levar o sistema de um estado restaurativo para um estado normal (seguro

ou inseguro), através de ações como: religamento de cargas, de linhas de transmissão ou de unidades de geração. Isto implica em problemas de estabilidade transitória e de sincronização de máquinas, entre outros. Essas ações de controle são difíceis de serem formalizadas matematicamente. Talvez o controle restaurativo totalmente automatizado seja uma das funções de implementação mais complexa. Um procedimento possível é testar a ação de controle definida, usando-se um modelo de fluxo de carga, antes de aplicá-la ao sistema real (Fluxo de carga do operador).

A restauração automática de circuitos pode ser realizada com relativa facilidade, desde que se disponha, em tempo-real, da configuração da rede.

CAPÍTULO III

MODELOS PARA REPRESENTAÇÃO DE REGIÕES PARCIALMENTE OBSERVÁVEIS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

3.1. Equivalente Externo

Para determinadas partes do sistema interligado não é possível se dispor de informações operacionais atualizadas, e mesmo que fosse, não seria viável representar detalhadamente essas regiões, pois, isso tornaria muito grande a dimensão do sistema em estudo. Considerando-se essas dificuldades, tem-se dado ênfase ao desenvolvimento de modelos de equivalentes externos que não necessitem, para sua formação, de informações operacionais e que apresentem algum tipo de redução em relação à representação completa do sistema de potência.

A maioria dos equivalentes externos é constituída por um circuito equivalente passivo, que é ligado às barras de fronteira, e por injeções de potência ativa e reativa nas fronteiras. Estas injeções representam os fluxos de potência (intercâmbios) provenientes das cargas e gerações do sistema externo. O circuito equivalente é geralmente obtido através da redução da rede externa, cuja configuração e parâmetros consideram-se conhecidos, mesmo em tempo-real.

Em função da maneira como se obtêm os equivalentes externos, às vezes surgem alguns problemas que normalmente não aparecem nos modelos de fluxo de carga equivalente. Por exemplo, ligações equivalentes com relações X/R muito pequenas, ou com impedâncias série muito grandes, ou com admitâncias "shunt" muito grandes. Estes parâmetros com valores anormais tendem a dificultar, e por vezes impedir, a convergência de alguns métodos de fluxo de carga. Tendo em vista problemas deste tipo é importante que o equivalente externo, além de fornecer resultados precisos, seja bem condicionado.

Dadas as próprias características de modelagem, os equivalentes externos são mais adequados à representação de regiões permanentemente não observáveis.

3.2. Fluxo de Carga Equivalente

Uma possibilidade de representação de regiões parcialmente observáveis dos sistemas interligados é através de um modelo de fluxo de carga completo, onde a configuração e parâmetros da rede são os mesmos do caso básico e as informações operacionais são obtidas, por exemplo, através de um programa de previsão de demanda. Sob o aspecto de informações necessárias para sua constituição, esse modelo é compatível com o tipo de informações que os centros de controle normalmente dispõem em tempo-real. No entanto, não se pode usá-lo para representar todo o sistema externo, uma vez que ele não oferece nenhum tipo de economia sob o ponto de vista computacional. O modelo de Fluxo de Carga Equivalente pode ser usado para representar:

- regiões normalmente observáveis, com as quais temporariamente perdeu-se contato;
- regiões permanentemente não observáveis.

No segundo caso inclui-se a utilização de zonas de amortecimento ("buffer-zone") [3].

A manutenção da identidade das barras e linhas da região representada é uma característica importante do modelo, uma vez que possibilita realizar funções avançadas de controle, inclusive para as regiões substituídas pelo modelo. Entretanto, isto só será possível se os dados fornecidos pelo programa de previsão de demanda forem confiáveis, o que nem sempre poderá ser conseguido.

Outra aplicação que pode ser dada ao modelo de fluxo de carga equivalente é no desenvolvimento de circuitos equivalentes

tes, pois, seu uso permite supor diferentes graus de conhecimento sobre a parte do sistema que é modelada, e definir a importância ou não da representação dos elementos que compõem o circuito externo.

3.3. Ajuste do Modelo Externo

Tal qual foi descrito anteriormente, Capítulo II, um sistema de potência pode ser dividido em três partes: sistema interno, barras de fronteira e sistema externo. Na execução das funções de controle em tempo-real que necessitam de uma representação do sistema externo, este pode ser substituído por um modelo equivalente.

Considerando-se conhecido o estado do caso básico, $\underline{V}_F^0 < \underline{\Theta}_F^0$, das barras de fronteira (fornecido pelo estimador de estado, ou pela própria solução da rede completa), pode-se rodar um fluxo de carga para um sistema constituído da fronteira e de um circuito equivalente, substituindo o sistema externo (como é mostrado na Fig. - 3.1). Verifica-se que o estado obtido para as barras de fronteira, $\underline{V}_F < \underline{\Theta}_F$, não é o mesmo que aquele fornecido pelo estimador de estado, isto ocorre porque o circuito equivalente é apenas uma aproximação do sistema externo.

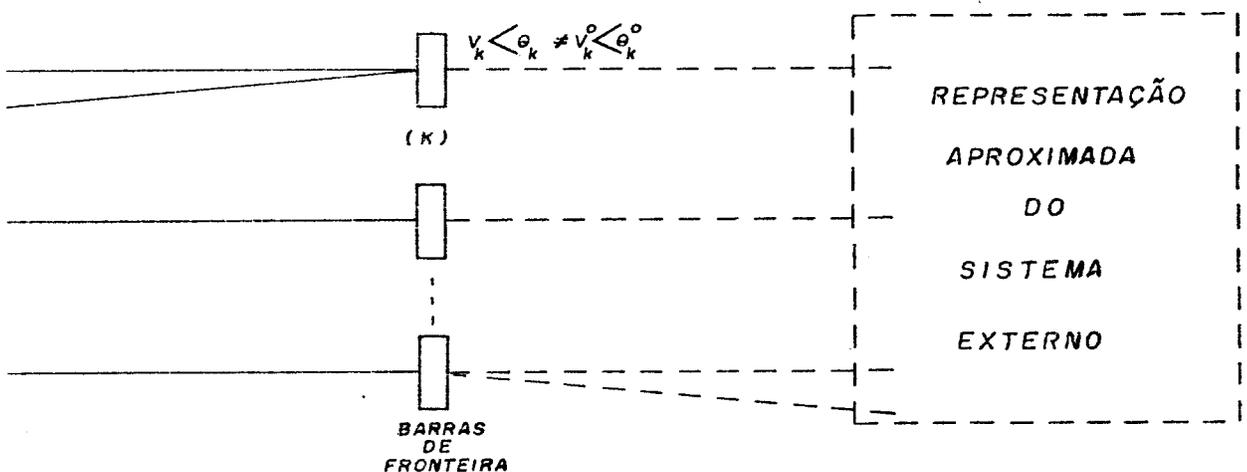


Fig. 3.1 - Representação Parcial do Sistema Externo

Uma maneira de se fazer com que, na resolução do fluxo de carga, o estado nas barras de fronteira resulte o mesmo que aquele fornecido pelo estimador de estado, consiste em introduzir injeções equivalentes na fronteira, que são calculadas considerando-se temporariamente essas barras tipo "slack", com tensões especificadas nos valores fornecidos pelo estimador de estado. As injeções calculadas para essas barras, $P_F^{eq} + j Q_F^{eq}$, são os "ajustes" necessários para que o circuito, usado para representar o sistema externo, reproduza na fronteira as mesmas condições do caso básico. A Fig. - 3.2 ilustra essa situação.

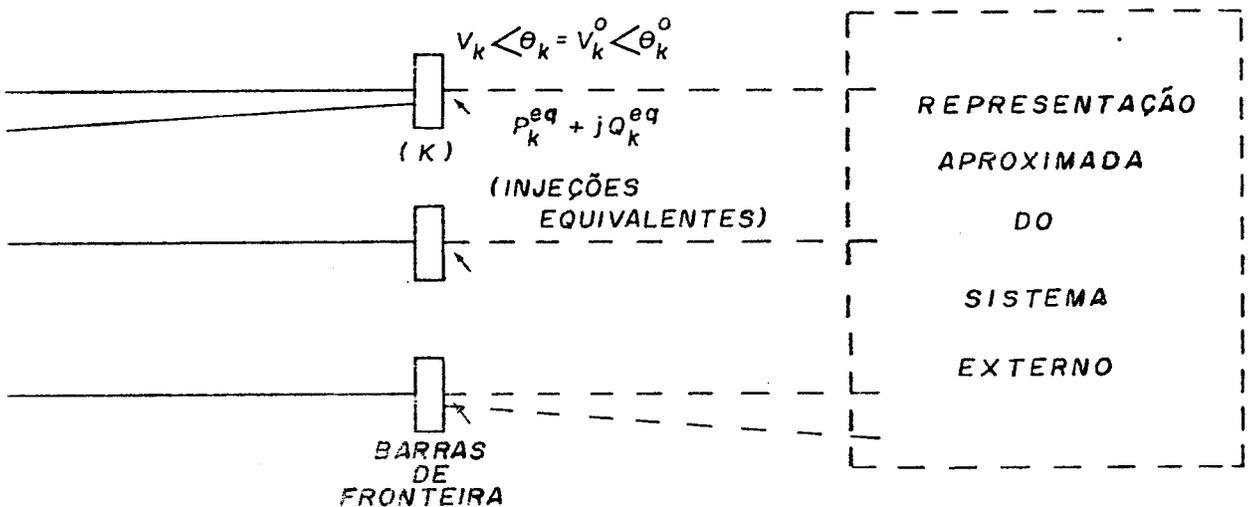


Fig. 3.2 - Representação Completa do Sistema Externo

Dessa forma pode-se fazer com que "qualquer" circuito equivalente consiga reproduzir as condições do caso básico. Uma vez calculadas as injeções equivalentes, as barras de fronteira são reconvertidas para seus tipos originais, PQ ou PV, e as injeções equivalentes são mantidas nas fronteiras durante as simulações. As alterações que ocorrem nos intercâmbios, por causa das reações naturais do sistema externo, deverão, nas simulações, ser supridas pelo circuito equivalente. Assim, pode-se concluir que o circuito equivalente representará o sistema externo apenas para as variações incrementais que ocorram em torno do caso básico.

3.4. Desenvolvimento de Modelos para Representar Regiões Parcialmente Observáveis

Anteriormente, quando se definiu o modelo de fluxo de carga equivalente, foi dito que esse modelo permite verificar que informações sobre o sistema externo são mais importantes para a obtenção de um bom equivalente. Neste parágrafo apresentam-se modelos de fluxo de carga equivalente, considerando-se diferentes graus de precisão nas informações sobre o sistema externo. Além disso, são analisados vários equivalentes externos do tipo WARD, inclusive o equivalente WARD-Estendido. Os vários modelos para o sistema externo são apresentados de maneira que se evidencie ou não a importância da representação dos elementos que compõem o sistema externo.

Em todos os modelos apresentados, é realizado um ajuste através de injeções na fronteira, tal qual foi anteriormente descrito.

Para analisar as reações dos vários tipos de representação propostos, simularam-se contingências em linhas do sistema interno.

3.4.1. Modelos de Fluxo de Carga Equivalente

3.4.1.1. Fluxo de Carga Equivalente com 90% das Injeções Externas (FCE - 90%)

Neste modelo, a rede externa (configuração e parâmetros) usada é a mesma do caso básico e consideram-se as injeções das barras externas iguais a 90% de seus valores do caso básico. Esta imprecisão é uma simulação de possíveis erros introduzidos nos valores das injeções externas por um al-

goritmo de previsão de carga. Como, em tempo-real, não se dispõem de informações das magnitudes das tensões nas barras PV e das derivações dos transformadores ("taps"), do sistema externo, consideram-se, nas simulações, seus valores iguais a 1. (p.u.).

Sobre o sistema interno e fronteira considera-se haver conhecimento detalhado.

Nas Tabelas 4.3 e 4.5 são mostrados os resultados obtidos quando se usa este modelo. Como pode ser visto, os resultados são bastante precisos. O resultado exato é obtido ao se usar, nas simulações, o próprio sistema externo, em vez de uma representação aproximada.

Neste método, é importante observar, que os valores das grandezas dentro da região não-observável só serão confiáveis se a estimativa de demanda, ou um outro procedimento qualquer, fornecer resultados de boa qualidade. Se isto for verdadeiro poderá ser possível executar as funções avançadas de controle em tempo-real mesmo para essas regiões.

3.4.1.2. Fluxo de Carga Equivalente com 0% das Injeções Externas (FCE - 0%)

Neste modelo supõe-se conhecida apenas a configuração da rede externa

do caso básico. Considera-se não existir informações, referentes ao caso básico, sobre as barras externas e sobre os "tap's" dos transformadores. Nas simulações, todas as injeções nas barras externas são consideradas nulas; as magnitudes das tensões das barras PV externas e os "tap's" dos transformadores são considerados iguais a 1.(p.u.).

Analisando-se os resultados obtidos, para as grandezas da região observável, Tabelas 4.3 e 4.5 pode-se tirar informações importantes sobre a representação de regiões não observáveis e definir outros testes que devem ser feitos. Quanto aos valores das grandezas dentro da região não observável, eles não apresentam significado prático, devido às aproximações feitas nos valores das injeções externas.

3.4.1.3. Conclusões

Além dos testes realizados com modelos FCE - 90% e FCE - 0%, cujos resultados resumidos encontram-se nas Tabelas 4.3 e 4.5 outros testes foram feitos utilizando-se modelos de fluxo de carga equivalente, considerando diferentes margens de erro nas injeções externas e também considerando ou não os "shunts" externos nos modelos. A partir desses testes concluiu-se que:

- (i) as reações do modelo usado para representar o sistema externo dependem basicamente da configuração da rede externa;
- (ii) o nível de carregamento do sistema externo não é um fator essencial na determinação de suas reações a mudanças ocorridas no sistema interno. Em particular, as variações no suporte de reativos das barras PV (explicitamente representadas nos modelos) dependem muito pouco das injeções de potência e magnitudes das tensões dessas barras no caso básico.

3.4.2. Modelos de Equivalentes Externos

3.4.2.1. Fluxo de Carga Equivalente com 0% das Injeções Externas e Redução das Barras de Carga Externas (FCE - PV)

Este modelo é o mesmo que o FCE - 0%, onde as barras PQ externas são barras passivas ($P = 0$, $Q = 0$), com a diferença que no FCE - PV essas barras PQ externas são eliminadas. Isto pode ser feito montando-se uma matriz admitância nodal para o sistema externo mais fronteira e, posteriormente, reduzindo-a através da eliminação das barras PQ externas, usando o método de redução de Gauss.

Como a obtenção do FCE - PV implica em uma redução do circuito externo, há perda de identidade de barras do sistema externo, o que lhe tira uma das principais características.

Dos resultados obtidos (Tabelas 4.3 e 4.5 pode-se concluir que: a eliminação das barras PQ externas não altera o grau de precisão dos resultados.

3.4.2.2. Equivalente WARD (W)

Os métodos de equivalentes, apresentados em 1949 por J.B. WARD [4], são uma aplicação direta da redução de circuitos, e foram sugeridos tendo-se em vista a sua aplicação em estudos feitos com analisadores de redes. No entanto, desde que sejam introduzidas algumas adaptações e melhorias, estes métodos podem ser utilizados na obtenção de equivalentes externos estáticos, para uso em funções de controle em tempo-real.

A seguir descreve-se a forma de obtenção de um equivalente tipo WARD usado para representar partes não observáveis de um sistema interligado, no controle em tempo-real :

- (i) desligam-se as cargas e geradores do sistema externo;
- (ii) obtém-se a matriz admitância nodal $[Y]$ para o sistema externo

e barras de fronteira:

$$[Y] = \begin{array}{|c|c|} \hline Y_{EE} & Y_{EF} \\ \hline Y_{FE} & Y_{FF} \\ \hline \end{array} \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{SISTEMA EXTERNO} \\ \text{FRONTEIRA} \end{array}$$

A matriz $[Y]$ é formada a partir das admitâncias da rede externa (ligações fronteira - fronteira fazem parte da rede interna);

- (iii) faz-se a redução da matriz $[Y]$ através da eliminação dos nós correspondentes às barras externas (método de eliminação de Gauss), obtém-se $[y^{\text{reduzida}}]$:

$$[y^{\text{reduzida}}] = \begin{array}{|c|c|} \hline \text{hatched} & \text{hatched} \\ \hline 0 & y_{FF}^{\text{eq}} \\ \hline \end{array}$$

A matriz $[y_{FF}^{\text{eq}}]$ corresponde às ligações entre as barras de fronteira;

- (iv) efetua-se o ajuste do equivalente ao estado do caso básico das barras de fronteira (fornecido

pelo estimador de estado), calculando-se $P_k^{eq} + j Q_k^{eq}$ para cada barra de fronteira (k)

A Fig. - 3.3 mostra o sistema interno e fronteira com as ligações equivalentes, obtidas pelo processo de redução, interligando as barras de fronteira e com os ajustes calculados em (iv).

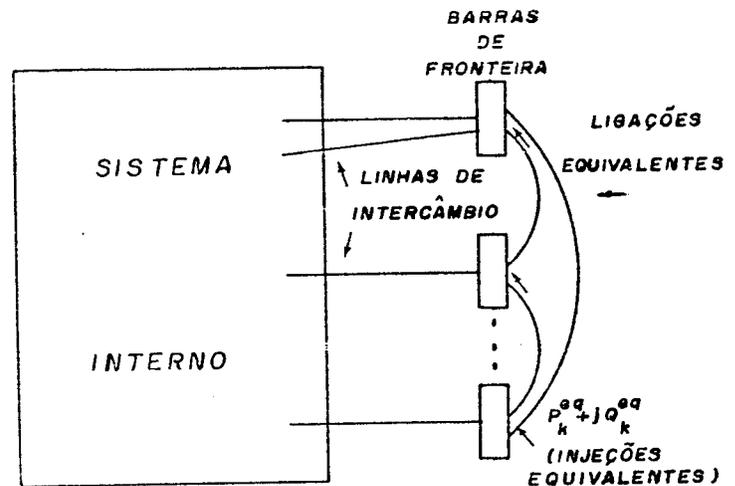


Fig. 3.3 - Sistema Interligado com Re presentação da parte Exter na pelo Equivalente WARD

O equivalente WARD, assim obtido, apresenta, na maioria dos casos, resultados bons para os fluxos de potência ativa e resultados ruins para os fluxos de potência reativa. Em algumas situações, contingências no sistema IEEE-118 (no capítulo IV descre-

vem-se este e outros sistemas usados nos testes), os resultados são muito ruins tanto para os fluxos de reativos como para os fluxos de ativos e magnitudes das tensões; esta imprecisão deve-se, em parte, a admitâncias "shunt" com grande valor numérico que aparecem nas barras de fronteira em função do processo de redução. Este tipo de problema também foi detectado por W.F. Tinney, vide Ref. [5]. Em outros sistemas, IEEE-30 e sistema interligado da região Sudeste do Brasil, este problema não chega a ser tão crítico, pois, ou os "shunts" externos são desprezíveis (IEEE-30), ou existem capacitores e reatores no sistema externo cujos efeitos parcialmente se cancelam durante o processo de redução, evitando o aparecimento de admitâncias com grande valor numérico nas barras de fronteira.

A maneira de se evitar esse problema consiste em se obter a matriz $[Y]$ para o sistema externo mais fronteira sem considerar qualquer tipo de ligação "shunt". Assim, no circuito equivalente obtido pela redução de $[Y]$, não aparecem elementos "shunt". Justifica-se esse procedimento pelo fato de que os elementos "shunt" têm um efeito local, e portanto não faz sentido transferi-los para as barras de fronteira.

Com essa modificação na obtenção do equivalente WARD, os resulta-

dos para o sistema IEEE-118, não são tão ruins quanto os anteriores, mesmo assim a sua reação reativa não é boa, isto pode ser verificado na Tab. - 4.5. Este problema ocorre devido à não representação das fontes externas de reativos; as barras PV externas são eliminadas como se fossem barras passivas, ignorando-se o efeito destas barras sobre a fronteira.

3.4.2.3. Equivalente WARD-Estendido

Considerando-se que o equivalente WARD apresenta, na maioria dos casos, bons resultados para os fluxos de ativos, e que há necessidade de se representar os efeitos incrementais das fontes externas de reativos, introduz-se, neste equivalente, uma extensão com o objetivo de melhorar as suas reações reativas.

O equivalente WARD-Estendido constitui-se basicamente de:

- (i) circuito equivalente obtido da redução da matriz $[Y]$, montada sem se considerar qualquer elemento "shunt" da rede externa; evita-se assim o aparecimento de elementos "shunt" nas fronteiras;
- (ii) injeções de potência nas barras de fronteira $(P_F^{eq} + j Q_F^{eq})$; des

ta forma, representa-se o efeito estático das gerações e cargas do sistema externo;

- (iii) injeções complementares de reativos nas barras de fronteira (ΔQ_F^C), proporcionais às variações dessas barras em relação aos valores do caso básico ($\Delta V_F = V_F - V_F^O$); com estas injeções procura-se corrigir a reação reativa do circuito equivalente obtido em (i) e simular a reação reativa incremental das barras PV externas.

Obtêm-se as injeções complementares, $[\Delta Q_F^C]$, através da comparação entre a reação reativa "correta", $[\Delta Q_F]$, do sistema externo, e a reação, $[\Delta \tilde{Q}_F]$, do circuito equivalente do modelo WARD (W).

$$[\Delta Q_F^C] = [\Delta Q_F] - [\Delta \tilde{Q}_F] \quad (1)$$

Os cálculos de $[\Delta Q_F]$ e $[\Delta \tilde{Q}_F]$ baseiam-se nas relações de sensibilidade Q-V do sistema.

Sendo $V_F^O \angle \theta_F^O$ o vetor dos estados das barras de fronteira no caso básico, e $V_F \angle \theta_F$ o vetor dos estados das barras de fronteira pós-contingência; as diferenças $[\Delta V_F] = [V_F - V_F^O]$ e $[\Delta \theta_F] = [\theta_F - \theta_F^O]$ correspondem às variações nas magnitudes das tensões

e nos ângulos das barras de fronteira, em relação ao caso básico. Quando se usa a forma polar do método de Newton, a relação entre $[\Delta \underline{V}_{-F}]$, $[\Delta \underline{\theta}_{-F}]$ e as injeções de reativos nas fronteiras $[\Delta \underline{Q}_{-F}]$ é dada por:

$$[\Delta \underline{Q}_{-F}] = [J_{FF}] \cdot [\Delta \underline{\theta}_{-F}] + [L_{FF}] \cdot \left[\frac{\Delta \underline{V}_{-F}}{\underline{V}_{-F}} \right] \quad (2)$$

Onde $[J_{FF}]$ e $[L_{FF}]$ são as matrizes de sensibilidade, obtidas da matriz jacobiano do sistema externo mais fronteira, reduzida até a fronteira.

Baseando-se no princípio de desacoplamento MW- θ /MVAR-V, pode-se desprezar o efeito das variações nos ângulos das barras de fronteira $[\Delta \underline{\theta}_{-F}]$ sobre as injeções de reativos nessas barras $[\Delta \underline{Q}_{-F}]$; a equação (2) fica:

$$[\Delta \underline{Q}_{-F}] = [L_{FF}] \cdot \left[\frac{\Delta \underline{V}_{-F}}{\underline{V}_{-F}} \right] \quad (3)$$

A equação (3) representa, de forma linearizada, as reações reativas do sistema externo quando ocorrem mudanças nas magnitudes das tensões das barras de fronteira.

As reações reativas do circuito equivalente do modelo WARD (W), devi-

do às variações nas magnitudes das tensões das barras de fronteira, podem ser obtidas através da seguinte equação:

$$\begin{bmatrix} \Delta \tilde{Q}_{-F} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{L}_{FF} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\Delta V_{-F}}{V_{-F}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

A matriz de sensibilidade $\begin{bmatrix} \tilde{L}_{FF} \end{bmatrix}$ é função do circuito equivalente e do estado das barras de fronteira.

Utilizando-se as equações anteriores, pode-se obter a relação entre as injeções complementares e as variações das magnitudes das tensões nas barras de fronteira:

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_{-F}^C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta Q_{-F} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta \tilde{Q}_{-F} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{FF} - \tilde{L}_{FF} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\Delta V_{-F}}{V_{-F}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Considerando que as matrizes $\begin{bmatrix} L_{FF} \end{bmatrix}$ e $\begin{bmatrix} \tilde{L}_{FF} \end{bmatrix}$ precisariam ser recalculadas a cada iteração, são introduzidas simplificações (as mesmas usadas no método de Fluxo de Carga Desacoplado Rápido, [1]), e passa-se a trabalhar com as matrizes $\begin{bmatrix} B_{FF} \end{bmatrix}$ e $\begin{bmatrix} \tilde{B}_{FF} \end{bmatrix}$, que dependem apenas de dados da rede externa e das ligações entre as barras de

fronteira, cujas características permanecem constantes. Obtém-se, assim, a equação:

$$\left[\frac{\Delta Q_F^C}{V_F} \right] = \left[B_{FF}'' - \tilde{B}_{FF}'' \right] \cdot \left[\Delta V_F \right] \quad (6)$$

A matriz $\left[B_{FF}'' \right]$ é obtida pela redução da matriz $\left[B'' \right]$, que é calculada em função da rede externa; neste cálculo não se consideram os "shunts" e, as linhas e colunas correspondentes às barras PV, são omitidas. A matriz $\left[\tilde{B}_{FF}'' \right]$ é obtida a partir do circuito equivalente do modelo WARD. A matriz $\left[B_{FF}'' - \tilde{B}_{FF}'' \right]$ tem as seguintes características:

- (i) os termos da diagonal correspondem essencialmente às admitâncias "shunt" ligadas às barras de fronteira, obtidas pela redução de $\left[B'' \right]$, que podem ser escritas como: $\text{diag} \left[B_F^{SH} \right]$.
- (ii) os termos fora da diagonal resultam da diferença entre as ligações equivalentes série obtidas pela redução de $\left[B'' \right]$ e $\left[\tilde{B}'' \right]$. Essas ligações são diferentes pois, em $\left[B'' \right]$ considera-se a existência das barras PV externas; o mesmo não ocorre em $\left[\tilde{B}'' \right]$.

Através da equação (6) calculam-se as injeções complementares de reativos, nas barras de fronteira, que deverão corrigir a reação do equivalente WARD em termos de potência reativa. Nos testes realizados com esse equivalente, WARD - Estendido (WE1), Tabelas 4.3 e 4.4, observou-se sensíveis melhorias nos fluxos de reativos e nas magnitudes das tensões.

As injeções complementares de reativos $\left[\frac{\Delta Q_F}{V_F} \right]$ podem ser decompostas em duas parcelas: (A) e (B).

$$\left[\frac{\Delta Q_F^C}{V_F} \right] = \underbrace{\text{diag} \left[B_F^{SH} \right]}_{(A)} \cdot \left[\Delta V_{-F} \right] +$$

$$\underbrace{\left[B_{FF}'' - \tilde{B}_{FF}'' \right]}_{(B)} - \text{diag} \left[B_F^{SH} \right] \cdot \left[\Delta V_{-F} \right]$$

No caso de não se considerar a parcela (B) no cálculo destas injeções complementares, elas poderão ser automaticamente fornecidas às barras de fronteira por barras PV-fictícias, com $V = V_k^0$ e $P = 0$, ligadas a cada barra de fronteira (k) através de admitâncias $(0 + j B_k^{SH})$, onde B_k^{SH} é o elemen-

to k-k da matriz diag $\begin{bmatrix} B \\ F \end{matrix}^{SH}$. No caso básico estas injeções são iguais a zero, mas conforme ocorram mudanças nas magnitudes das tensões das barras de fronteira as injeções assumirão um valor proporcional a essa variação, simulando assim, o efeito das barras PV externas que foram eliminadas.

Na Fig. - 3.4, é mostrado esquematicamente o equivalente WE2.

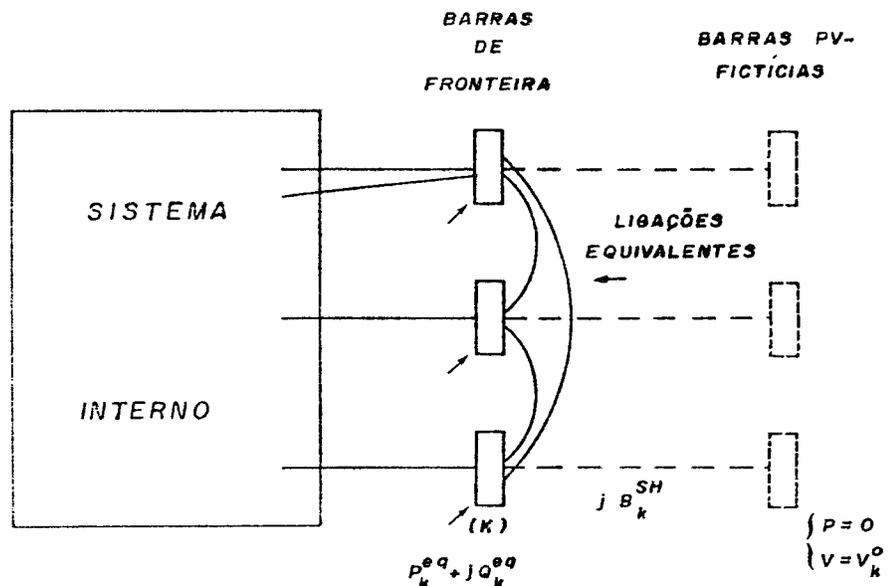


Fig. 3.4 - Sistema Interligado com Representação da Parte Externa pelo Equivalente WE2

A possibilidade de se desprezar a parcela (B) no cálculo de $\begin{bmatrix} \Delta Q_F^C \\ -F \\ V_F \end{bmatrix}$

baseia-se em: nos sistemas reais as barras de fronteira podem estar fracamente ligadas entre si, isto é, através de ligações com admitâncias série pequenas. Neste caso deverá haver uma predominância da parcela (A). Outra possibilidade consiste nas barras de fronteira estarem fortemente interligadas. Neste caso as variações nas magnitudes das tensões destas barras serão aproximadamente iguais e os efeitos dos elementos fora da diagonal de $\left\{ \left[B_{FF}'' - \tilde{B}_{FF}'' \right] - \text{diag} \left[B_F^{SH} \right] \right\}$ irão cancelar-se e a contribuição da parcela (A) será mais significativa. De qualquer forma, há uma pequena perda em termos de precisão, o que no entanto é compensado pela grande simplicidade do equivalente obtido.

Outra maneira de se fornecer as injeções complementares de reativos para as barras de fronteira, é através de admitâncias "shunt" ligadas a essas barras. O valor destas admitâncias pode ser obtido comparando-se a variação na injeção de reativos em uma barra de fronteira (k), fornecida por uma barra PV-fictícia ou por uma admitância "shunt", para uma variação de magnitude de tensão ΔV_k (em relação ao caso-básico).

Na equação (8) tem-se a variação na injeção de reativos em uma barra de fronteira (k) fornecida por uma barra PV-fictícia a ela ligada, através de uma admitância $j B_k^{SH}$, para uma

variação na sua magnitude de tensão, em relação ao caso-básico, de ΔV_k :

$$\frac{\Delta Q_k}{V_k^0} = -B_k^{SH} \cdot \Delta V_k \quad (8)$$

Na equação (9) tem-se a variação na injeção de reativos fornecida por uma admitância "shunt" de valor $j B_k^{SH}$ a uma barra de fronteira (k), para o mesmo ΔV_k .

$$\frac{\Delta Q_k}{V_k^0} = -2 \cdot B_k^{SH} \cdot \Delta V_k \quad (9)$$

O que se observa é que as quantidades de reativos serão iguais se o valor da admitância "shunt" for metade do valor da admitância da ligação fictícia. As equações (8) e (9) são obtidas através de linearizações em torno do caso-básico, mas isso não chega a alterar a conclusão anterior, pois, os efeitos da não-linearidade no cálculo das injeções ΔQ_k , normalmente são desprezíveis (termos de segunda ordem em ΔV_k). A Fig. - 3.5 ilustra esta outra versão do equivalente WARD-Estendido (WE2).

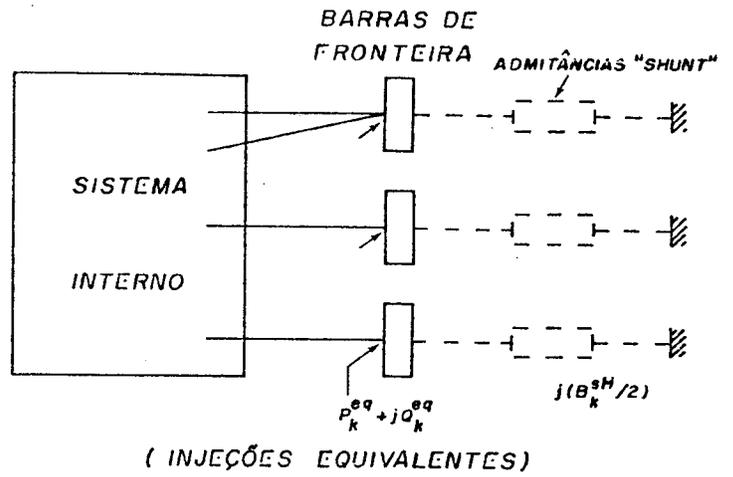


Fig. 3.5 - Sistema Interligado com Representação do Sistema Externo pelo Equivalente WE2

CAPÍTULO IV

TESTES E RESULTADOS

4.1. Introdução

Com o objetivo de estudar o comportamento dos seis modelos apresentados anteriormente (FCE-90%, FCE-0%, FCE-PV, W, WE1 e WE2), usados para representar partes não-observáveis de sistemas interligados, foram realizados testes numéricos para quatro sistemas: IEEE-30, IEEE-118 e duas versões do sistema interligado da região Sudeste do Brasil. Os testes consistiram em simular contingências de linhas de transmissão e transformadores da parte interna dos sistemas e comparar as reações dos modelos equivalentes com as do próprio sistema externo; nos testes, o estado e a configuração de todo o sistema interligado são considerados conhecidos. Escolheram-se contingências que causam maiores reações ativas (MW) e reativas (MVAR) da parte externa do sistema (geralmente, interligações importantes localizadas perto da fronteira). Em todos os modelos utilizaram-se injeções de potência nas barras de fronteira e através delas se reproduziram as condições do caso básico nestas barras. Na resolução dos fluxos de carga utilizou-se o método desacoplado rápido [1,6]

4.2. Descrição das Redes Testadas

(a) IEEE-30

A parte interna deste sistema é formada pelas barras: 1 a 9, 11, 13 e 28, que operam em 132KV ; quinze barras, que operam em 33KV , constituem a parte externa; as barras de fronteira (10, 12 e 27) estão localizadas do lado de baixa tensão dos

transformadores que interligam estes subsistemas. Os "shunts" externos das linhas de transmissão e de barras são desprezíveis, e não existem barras PV externas. Com o objetivo de se verificar melhor a reação reativa dos modelos usados, transformou-se duas barras externas (21 e 30) em barras PV. A Fig. - 4.1 ilustra algumas características deste sistema; outros detalhes são mostrados na Tab. - 4.2.

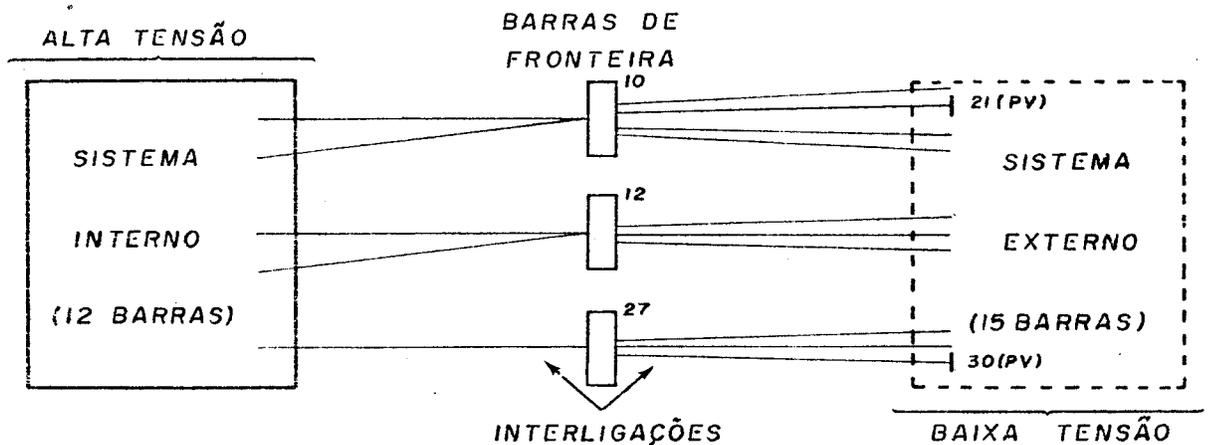


Fig. 4.1 - Subdivisão feita no IEEE-30

Nos testes simularam-se três contingências para este sistema: duas simples nas linhas 4-6 e 3-4; e uma dupla nas linhas 2-6 e 4-6.

(b) IEEE-118

Este sistema foi subdividido em 35 barras internas: 1 a 23, 25 a 32, 113 a 115 e 117 (subsistema A da Ref. [7]) e 80 barras externas (subsistemas B e C da Ref. [7]); as barras de fronteira são: 24, 33, 34 e 38. As barras de fronteira 24 e 33 foram transformadas para o tipo PQ visando-se evidenciar as

reações reativas externas. Nos testes simularam-se três contingências simples em linhas críticas: 30-38, 26-30 e 23-25. Mais detalhes sobre este sistema são mostrados na Tab. - 4.2.

Sistema Interligado da Região Sudeste do Brasil

(c) Versão I - FURNAS

Este sistema é constituído por sete áreas, correspondentes às companhias: FURNAS, CEMIG, CESP, LIGHT (S.P.), ESCELSA, CPFL e CELG, quatro outras áreas que são radiais com FURNAS foram eliminadas; as condições de operação usadas são as de pico de carga previsto para julho de 1979. A parte interna é constituída pelo sistema de FURNAS que tem 70 barras e opera em tensões de 500, 345, 220 e 138KV; as companhias que formam a parte externa possuem interligações entre si, tal qual pode ser visto na Fig. - 4.2.

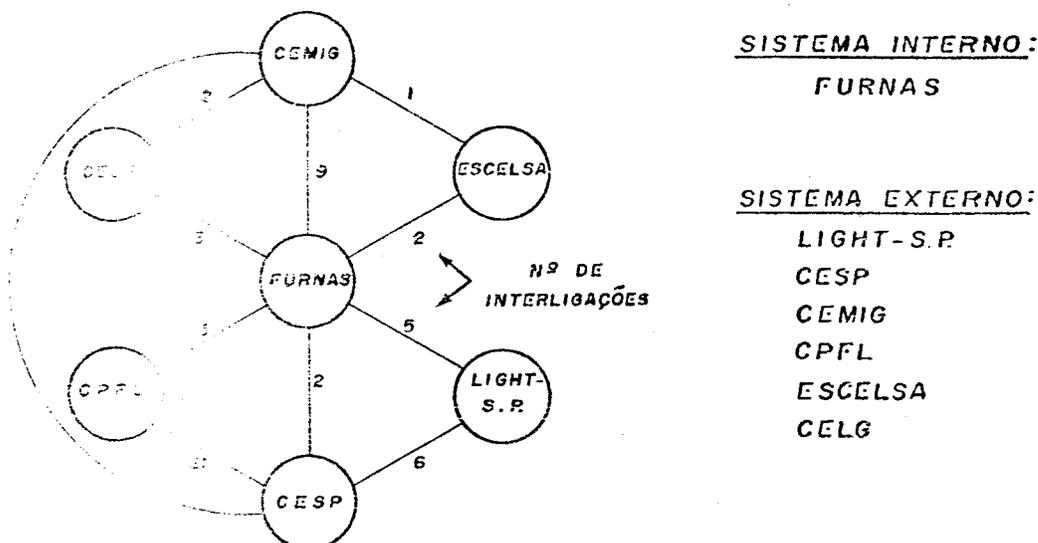


Fig. 4.2 - Sistema Interligado da Região Sudeste do Brasil (Versão I - FURNAS)

Nos testes simularam-se três contingências simples em linhas que interligam o sistema interno à fronteira, respectivamente: FURNAS (345KV) - PIMENTA (345KV), GUARULHOS (345KV) - D. NORDESTE-1 e MARIMBONDO (500KV) - ÁGUA VERMELHA (500KV).

(d) Versão II - SUDAT

Nesta versão do sistema interligado da região sudeste do Brasil considerou-se o sistema interno como sendo o sistema formado pela rede de 345 - 500KV e as barras de geração (13.8KV), que alimentam diretamente esta rede. Desta forma, fazem parte do sistema interno barras de FURNAS, LIGHT-S.P., CEMIG e CESP; as barras destas companhias que operam em tensões menores que 345KV e as barras das outras companhias constituem o sistema externo. A fronteira foi definida no lado de baixa tensão dos transformadores que ligam os sistemas interno e externo. A Fig. - 4.3 ilustra a subdivisão feita neste sistema.

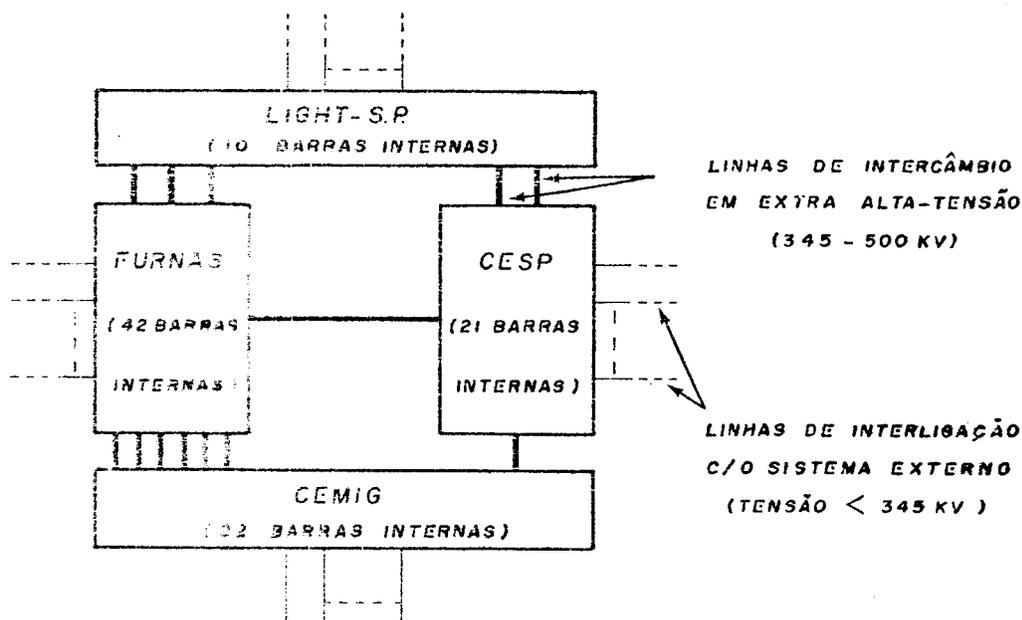


Fig. 4.3 - Parte Interna do Sistema Interligado da Região Sudeste do Brasil (Versão II - SUDAT)

Simularam-se as seguintes contingências simples em linhas de transmissão e trafo deste sistema:

ESPÉCIE	BARRA INICIAL	BARRA FINAL	FLUXO BÁSICO (MW)
linha	ESTREITO (345)	P. CALDAS (345)	400
trafo	GUARULHOS (345)	GUARULHOS (230)	600
linha	MARIMBONDO (500)	A. VERMELHA (500)	160
trafo	TAQUARIL (138)	TAQUARIL (345)	200
trafo	S. BÁRBARA (440)	S. BÁRBARA (138)	300

Tabela - 4.1 Contingências - Sistema SUDAT

A Tabela 4.2 resume algumas características dos quatro sistemas usados nos testes.

NÚMERO DE:	SISTEMA:	IEEE		REGIÃO SUDESTE	
		a	b	c	d
barras	total	30	118	645	645
	externas	15	79	557	508
linhas	total	42	186	1019	1019
	externas	22	134	901	832
barras PV	total	7	51	57	57
	externas	2	37	48	39
geração (MW)	total	301	4137	14531	14531
	externa	0	3110	9480	2098
carga (MW)	externa	88	2675	11369	11329
barras de fronteira		3	4	22	42
intercâmbios		5	4	24	50

Tabela - 4.2 Características das Redes Testadas

4.3. Resultados Obtidos

Neste item, apresentam-se os resultados dos testes realizados com os seis modelos equivalentes descritos. Simularam-se, ao todo, quatorze contingências em linhas de transmissão e transformadores; foram usados quatro sistemas de teste. O resultado exato foi obtido simulando-se contingências no sistema completo operando nas condições de carga do caso-básico. Os erros foram calculados comparando-se os valores exatos de determinadas grandezas (fluxos de potência em linhas de transmissão e transformadores, cujos valores mudaram bastante em relação ao caso-básico, e magnitudes das tensões nas barras terminais destes elementos) com aqueles obtidos quando se substitui o sistema externo por um dos seis equivalentes.

A Tab. - 4.3 mostra, de forma estatística, os resultados das cinco contingências simuladas no sistema SUDAT, foram utilizados os seis modelos equivalentes apresentados para representar a parte externa deste sistema. Na Tab. - 4.5 encontram-se os resultados estatísticos, para cinco dos modelos equivalentes, obtidos simulando-se contingências nos quatro sistemas de teste; na Fig. - 4.5, estes mesmos resultados são mostrados em forma de histograma. Para que se possa ter uma idéia do tipo de contingência testada e da magnitude das grandezas envolvidas, é mostrada a Tab. - 4.4, onde estão os resultados dos seis modelos equivalentes para uma das contingências mais críticas do sistema SUDAT. A Fig. - 4.4 apresenta alguns detalhes desta contingência.

Nas tabelas e figuras, os modelos são identificados pelo seguinte código:

CASO BÁSICO - solução sem contingência para o sistema completo

EXATO - solução pós-contingência para o sistema completo

FCE-90% - Fluxo de Carga Equivalente com 90% das Injeções Externas (3.4.1.1)

FCE-0% - Fluxo de Carga Equivalente com 0% das Injeções Externas (3.4.1.2)

FCE-PV - FCE-0% com Redução das Barras PQ Externas (3.4.2.1)

W - Equivalente WARD (3.4.2.2)

WE1 - Equivalente WARD-Estendido com Compensação Reativa Completa (3.4.2.3)

WE2 - Equivalente WARD-Estendido com Compensação Reativa Independente (3.4.2.2)

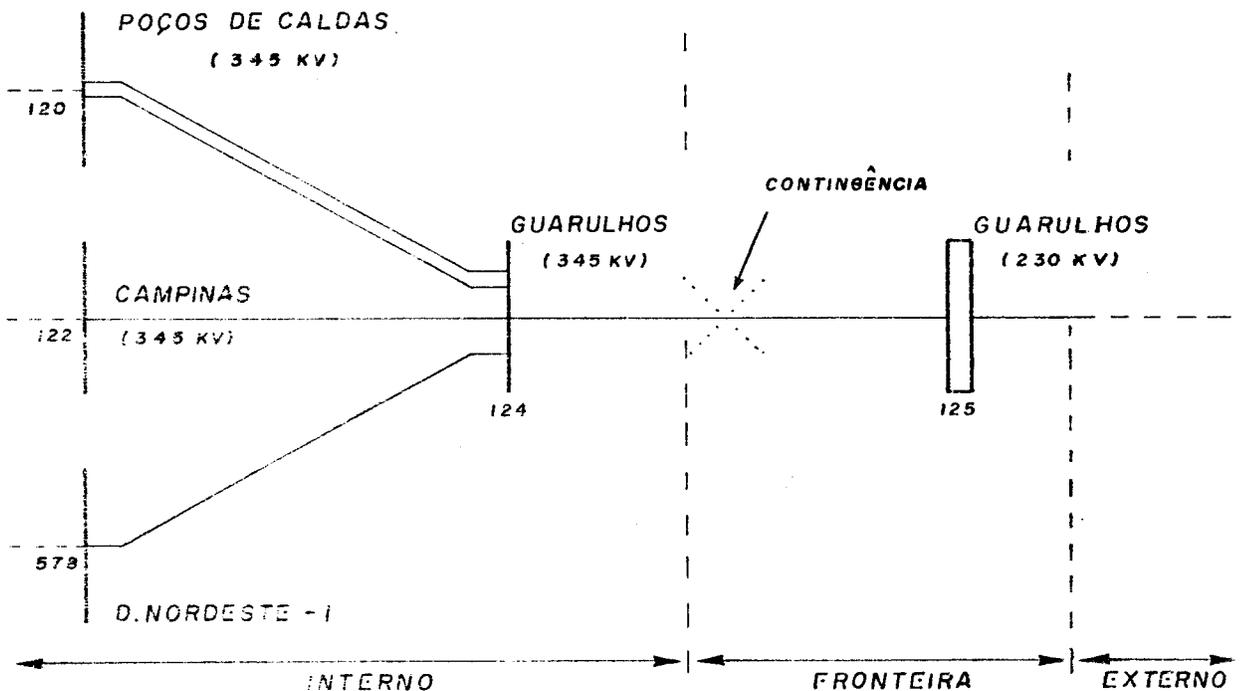


Fig. 4.4 - Contingência Crítica no Sistema SUDAT

MÉTODO USADO		FCE-90%	FCE-0%	FCE-PV	W	WE1	WE2
ERROS NOS TENSORES (% DO NOMINAL)	MÉDIO	.00	.08	.08	.90	.09	.20
	MÁXIMO	.00	.50	.50	4.33	.22	1.10
ERROS NOS FLUXOS DE ATIVOS-MW (% DOS FLUXOS-MVA)	MéDio	.01	.05	.08	.25	.08	.10
	Máximo	.04	.17	.38	.62	.34	.30
ERROS NOS FLUXOS DE REATIVOS-MVAR (% DOS FLUXOS-MVA)	MéDio	.03	.17	.19	1.03	.20	.20
	Máximo	.11	.64	.68	3.44	.72	.90

Tabela - 4.3 Análise Estatística das Contingências (Sistema Sudeste Brasileiro - Versão II - SUDAT)

	CASO BÁSICO	EXATO	FCE-90%	FCE-0%	FCE-PV	W	WE1	WE2
TENSORES	V ₁₂₀	1.010	1.005	1.006	1.006	.998	1.006	1.006
	V ₁₂₂	.997	.991	.992	.992	.982	.992	.992
	V ₁₂₄	1.017	1.002	1.004	1.004	.991	1.004	1.004
	V ₅₇₈	1.017	1.000	1.000	1.002	.987	1.002	1.002
Fluxos de Potência Ativa (MW)	P _{120/124}	621.0	492.2	492.2	491.8	495.0	492.2	492.4
	P _{122/124}	337.6	223.0	223.0	222.6	223.7	222.8	223.0
	P _{578/124}	-331.4	-702.7	-702.7	-702.0	-705.9	-702.6	-703.0
Fluxos de Potência Reativa (MVAR)	Q _{120/124}	-122.5	-97.4	-97.9	-100.1	-82.3	-99.9	-100.0
	Q _{122/124}	-107.2	-75.5	-75.7	-77.0	-67.4	-78.9	-78.9
	Q _{578/124}	33.7	55.1	55.5	58.1	39.7	58.0	58.2

Tabela - 4.4 Resultados para uma Contingência Crítica
(Sistema Sudeste Brasileiro - Versão II)

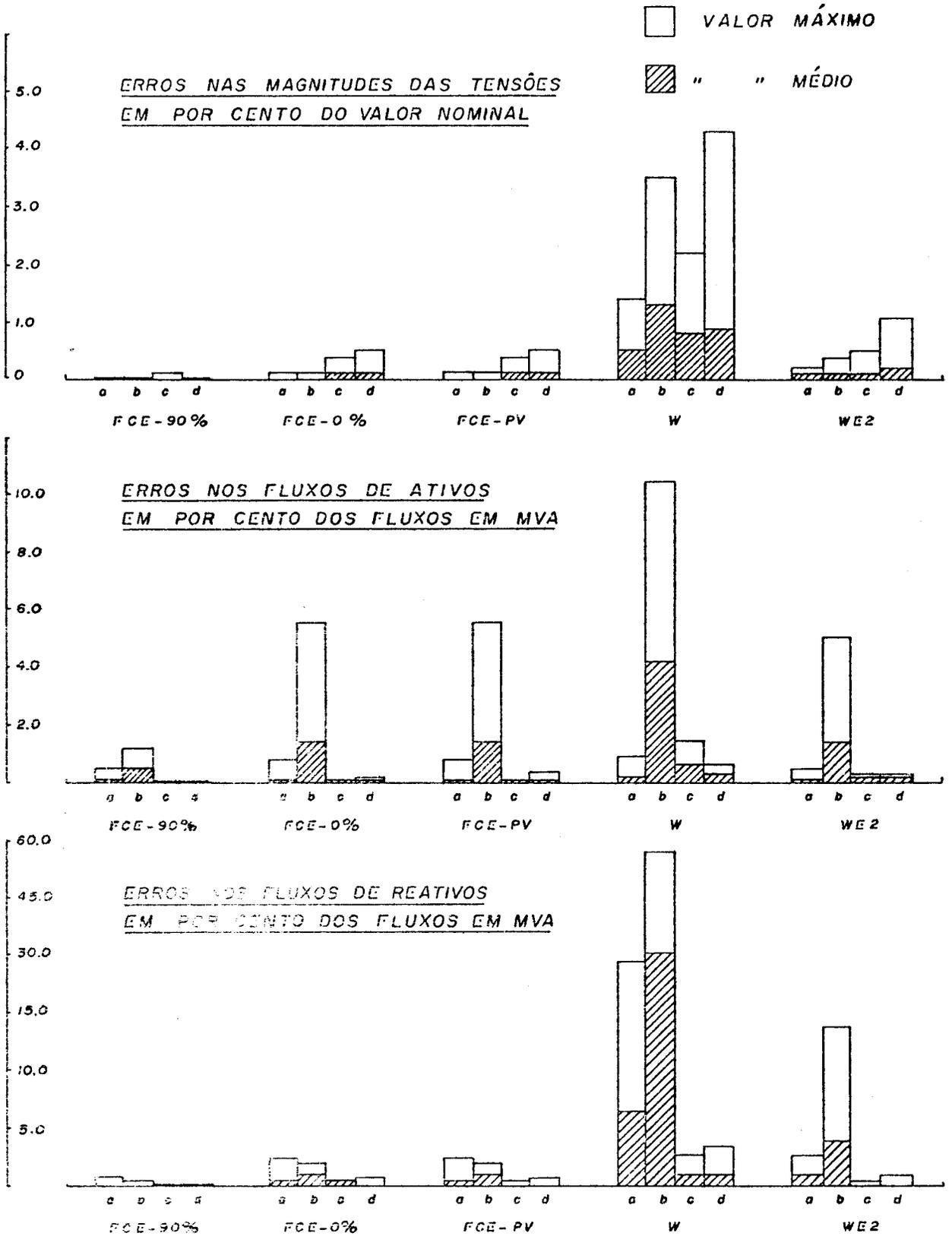


FIG. - 4.5- RESULTADOS DOS TESTES PARA QUATRO SISTEMAS: a, b, c, e d

TIPO DE ERRO +	MODELO +	SISTEMA							
		IEEE 30		IEEE 118		FURNAS		SUDAT	
		ERRO		ERRO		ERRO		ERRO	
		MÉDIO	MAX.	MÉDIO	MAX.	MÉDIO	MAX.	MÉDIO	MAX.
ERROS NAS MAGNITUDES DAS TENSÕES (% DO NOMINAL)	FCE-90%	0.0	0.0	.01	.10	.01	.10	0.0	0.0
	FCE-0%	.02	.10	.04	.10	.10	.38	.08	.50
	FCE-PV	.02	.10	.04	.10	.09	.38	.08	.50
	W	.50	1.40	1.30	3.50	.80	2.20	.90	4.30
	WE2	.10	.20	.10	.40	.10	.50	.20	1.10
ERROS NOS FLUXOS ATIVOS (% DO FLUXO MVA)	FCE-90%	.07	.50	.47	1.19	.01	.02	.01	.04
	FCE-0%	.10	.80	1.39	5.61	.07	.12	.05	.17
	FCE-PV	.10	.80	1.39	5.61	.07	.12	.08	.38
	W	.20	.90	4.20	10.50	.60	1.50	.30	.60
	WE2	.10	.50	1.40	5.10	.10	.30	.10	.30
ERROS NOS FLUXOS REATIVOS (% DO FLUXO MVA)	FCE-90%	.14	.80	.10	.47	.04	.07	.03	.11
	FCE-0%	.49	2.37	1.11	1.85	.11	.36	.17	.64
	FCE-PV	.49	2.37	1.11	1.85	.11	.36	.19	.68
	W	6.50	27.80	30.60	57.10	1.30	2.40	1.00	3.40
	WE2	.90	2.70	3.80	13.60	.20	.60	.20	.90

Tabela - 4.5 Resultados Estatísticos (considerando os quatro Sistemas de Teste)

4.4. Perda Temporária de Observabilidade |8|

Na estrutura de controle com dois níveis hierárquicos, mostrada na Fig. - 2.1, o processo de troca de informações entre o Centro Nacional de Despacho (C.N.D.) e cada um dos Centros Regionais de Controle (C.R.C.) é bastante complexo e envolve um grande número de equipamentos, em vista disto, a possibilidade de ocorrerem perdas de canais de informação deve ser prevista.

Um caso, bastante grave, de falta de informações ocorre quando há perda de contato entre o C.N.D. e um dos C.R.C. ou entre um C.R.C. e parte de sua área de controle. Este tipo de ocorrência poderá prejudicar, e, em determinadas situações, impedir a execução de funções avançadas de controle, não só para a área temporariamente não-observável, mas para toda a parte interna do sistema interligado.

Uma das formas de resolver este problema consiste em se obter as injeções de potência nas barras, das quais não se têm informações, através de um programa de previsão de demanda, e trabalhar com a área temporariamente não-observável como se ela continuasse observável. No entanto, se não for possível obter uma boa previsão de demanda, a solução consiste em se considerar esta área como sendo não-observável, redefinir os sistemas interno, fronteira e externo, e realizar as funções de controle para a parte do sistema que continuou observável.

Realizaram-se testes com o sistema SUDAT com o objetivo de se verificar as possíveis conseqüências da perda de canais de informação no controle de sistemas interligados. Os centros de controle das quatro companhias que constituem a parte interna deste sistema (LIGHT-S.P., CESP, CEMIG e FURNAS) foram identificados com os centros de controle regionais do esquema mostrado na Fig. - 2.1; simulou-se perda de contato entre o C.N.D. e cada um destes C.R.C. (um por vez); a parte temporariamente não-observável e a parte normalmente não-observável (externa) foram representadas por um modelo FCE-0%. Os testes consistiram na simulação de contingências em linhas de transmissão e transformadores

localizados na região que permaneceu observável.

Dos resultados obtidos, conclui-se que apenas a perda de comunicação entre o C.N.D. e o C.R.C. de FURNAS dá origem a erros consideráveis nas reações das áreas representadas pelo FCE-0%. Isto pode ser explicado pelo fato que a parte interna de FURNAS representa, aproximadamente, metade das barras internas do sistema SUDAT, além de ser o principal elo de interligação entre os outros sistemas. A perda de comunicação entre o C.N.D. e os C.R.C. da CESP, LIGHT-S.P. e CEMIG apresentou resultados na mesma faixa de precisão dos obtidos nos testes anteriores, onde apenas as partes normalmente não-observáveis foram representadas pelo modelo FCE-0% (Tab. - 4.5)

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Neste trabalho estudou-se a representação de partes parcialmente observáveis dos sistemas interligados de energia elétrica. Foram utilizados, basicamente, dois tipos de métodos: equivalentes externos do tipo WARD e modelos de fluxo de carga equivalente. Apresentaram-se resultados daqueles modelos que, dentre os estudados, tiveram melhores características de precisão e confiabilidade.

A escolha de um dos modelos vai depender da aplicação que se deseja fazer. Na execução de funções destinadas ao controle ou ao planejamento dos sistemas de energia elétrica ocorrem situações onde não há interesse específico em relação a parte não observável do sistema, necessita-se, apenas, representar as suas reações a mudanças que ocorram na parte observável. Às vezes, além de ser necessário representar as reações da parte não observável, é importante manter a identidade de algumas de suas barras, linhas de transmissão e transformadores, pois, deseja-se realizar estudos nesta parte do sistema. Pode-se também reter algumas barras externas quando for necessário monitorar os seus estados, ou então a sua eliminação implicaria em grande diminuição de esparsidade das matrizes reduzidas.

Os modelos do tipo fluxo de carga equivalente permitem simular vários graus de conhecimento do sistema externo. Isto possibilita verificar que informações do sistema externo são mais importantes para a obtenção de um modelo equivalente que represente com exatidão as suas reações. A forma como se apresenta os modelos neste trabalho salienta este aspecto. Nas simulações, variou-se o grau de exatidão das informações operacionais do sistema externo, através de aumento do erro, em relação aos valores do caso básico, nas injeções de potência nas suas barras e

considerando-se ou não a representação explícita dos elementos "shunt" do sistema externo e das barras PV externas. Verificou-se que:

- (i) as reações do sistema externo dependem mais da configuração e parâmetros da rede externa, do que dos valores das injeções de potência, das magnitudes das tensões das barras PV e dos "taps" dos transformadores do sistema externo. Verifica-se este fato através dos resultados dos modelos FCE - 0% e FCE - 90%. No modelo FCE - 0%, embora as injeções nas barras externas tenham sido consideradas nulas, e, os "tap's" dos transformadores e as magnitudes nas tensões das barras PV externas tenham sido considerados iguais a 1. pu, os resultados são bastante precisos;
- (ii) a representação das barras PV externas é fundamental para a reação reativa do modelo equivalente. Isto fica bastante claro comparando-se as reações dos modelos: FCE - PV, W e WE. Quando eliminaram-se as barras PV externas (modelo W) e não se fez nenhum tipo de representação para elas, os erros nos fluxos de reativos e nas magnitudes das tensões tornaram-se bastante grandes. No modelo FCE - PV, onde não se eliminam as barras PV e no modelo WE, onde elas são eliminadas mas se faz uma representação para elas, os resultados melhoraram consideravelmente;
- (iii) os "shunts" têm um efeito local, e não se deve considerar os "shunts" externos quando da obtenção de uma rede equivalente, através de um processo de redução pelo método de eliminação de GAUSS, vide Apêndice B. Caso não se tome este cuidado, é possível que, em alguns sistemas, após o processo de redução, apareçam elementos "shunt" com grande valor numérico nas barras de fronteira, Ref. [5], e as ligações equivalentes obtidas tenham seus valores deteriorados pelo efeito dos "shunts"; ambos os fatos geralmente tornam os modelos imprecisos.

No que se refere ao uso de modelos reduzidos, para representar as reações do sistema externo a mudanças ocorridas no sistema interno, recomenda-se a utilização do equivalente WARD-Estendido. A sua versão WE1 fornece resultados muito precisos, mas tem o inconveniente de não ser possível colocá-la totalmente na forma de circuito, o que dificulta, às vezes, sua adaptação a um programa de fluxo de carga. A sua versão WE2 apresenta resultados um pouco menos precisos, mas ainda na mesma faixa de precisão que a versão WE1, e é extremamente simples, podendo ser adaptada, sem maiores dificuldades, a qualquer programa de fluxo de carga. Ambas as versões têm a característica de fornecerem um modelo reduzido e preciso do sistema externo. O modelo FCE - PV fornece resultados muito precisos e também apresenta o conveniente de ser um modelo reduzido do sistema externo.

Considerando-se as características dos dois tipos de modelos estudados, pode-se concluir que uma boa solução para a maioria dos problemas de representação de partes parcialmente observáveis dos sistemas de energia elétrica consiste em se representar as partes normalmente não-observáveis pelo equivalente WARD-Estendido (versão WE2), retendo-se quando necessário algumas barras externas. Para representar partes do sistema observável das quais tenham-se perdido informações temporariamente, o modelo de fluxo de carga equivalente é mais adequado, pois mantém a estrutura da rede original, permitindo que as medidas perdidas sejam, por exemplo, substituídas por pseudomedidas.

Os resultados apresentados neste trabalho referem-se a contingências em linhas de transmissão e transformadores; contingências de geração são mais difíceis de serem definidas, pois dependem de fatores como: intervalo pós-contingência a ser considerado, distribuição da carga do gerador que sofreu contingência, etc... Nas Refs. [9,10] é apresentado um método baseado em fatores de distribuição para simular este tipo de contingência; este mesmo procedimento (WARD-Estendido e fatores de distribuição) foi adotado na Ref. [11], apresentando bons resultados. Neste trabalho foi dada maior ênfase às contingências de linhas de transmissão e transformadores pois estas constituem-se

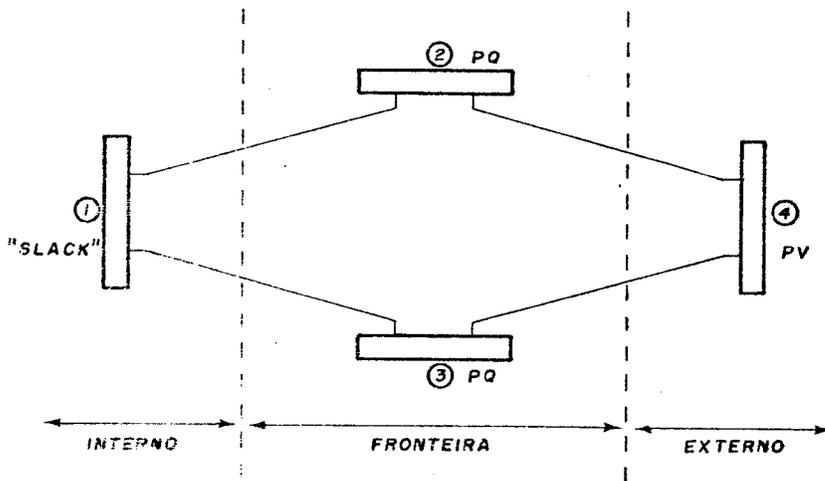
em testes mais rígidos para se verificar o desempenho de circuitos equivalentes. No entanto, como verifica-se nas Refs. [9, 10,11] , a análise de contingência de geração pode ser implementada usando-se os métodos aqui discutidos.

APÊNDICE A

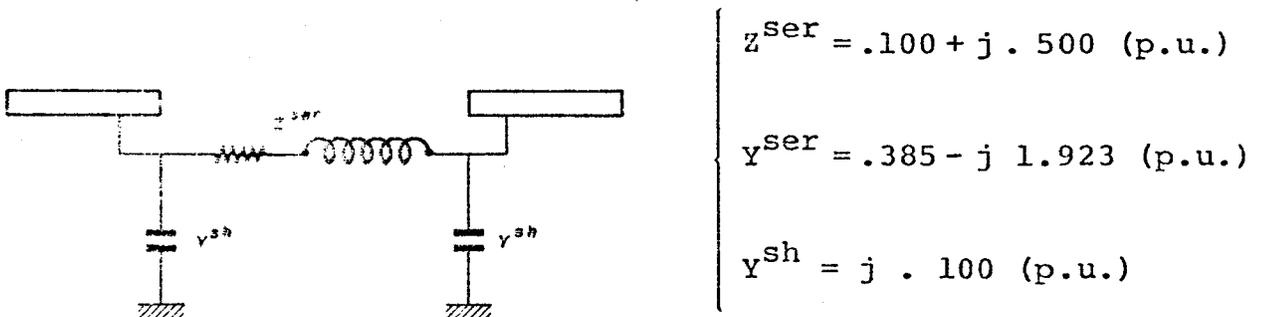
MODELOS EQUIVALENTES PARA UM SISTEMA DE QUATRO BARRAS

A.1. Descrição da Rede e das Condições de Operação

A rede é constituída por quatro barras e quatro linhas, é subdividida conforme a figura abaixo:



Todas as linhas de transmissão são iguais, com os seguintes parâmetros:

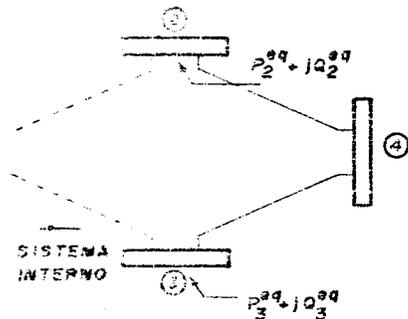


O caso básico é calculado a partir das seguintes especificações:

BARRA	V(p.u.)	θ	P(p.u.)	Q(p.u.)
1	1.	0.	-	-
2	-	-	-.150	-.050
3	-	-	-.300	-.100
4	1.	-	-.200	-

A.2. Fluxo de Carga Equivalente com 90% das Injeções Externas (FCE - 90%)

Este modelo é constituído pela própria rede do sistema externo e injeções equivalentes nas barras de fronteira; a injeção de potência na barra externa é feita igual a 90% do valor do caso básico e a tensão nesta barra é especificada em 1.(p.u.).

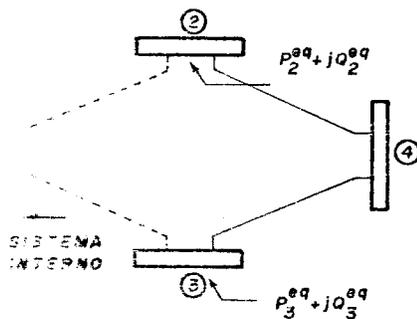


$$\begin{cases} P_4 = (.90) \cdot (P^{\text{básico}}) \\ V_4 = 1 \cdot (\text{p.u.}) \end{cases}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_2^{eq} + j Q_2^{eq} = -.160 - j . 048 \quad (\text{p.u.}) \\ P_3^{eq} + j Q_3^{eq} = -.310 - j . 098 \quad (\text{p.u.}) \\ P_4 = -.180 \quad (\text{p.u.}) \end{array} \right.$$

A.3. Fluxo de Carga Equivalente com 0% das Injeções Externas (FCE - 0%)

Neste modelo a representação da rede externa é feita da mesma forma que no modelo FCE - 90%; as injeções de potência nas barras externas são consideradas iguais a zero, as magnitudes das tensões nas barras PV externas são consideradas iguais a 1. (p.u.).



$$\left\{ \begin{array}{l} P_4 = 0 \\ V_4 = 1. \quad (\text{p.u.}) \end{array} \right.$$

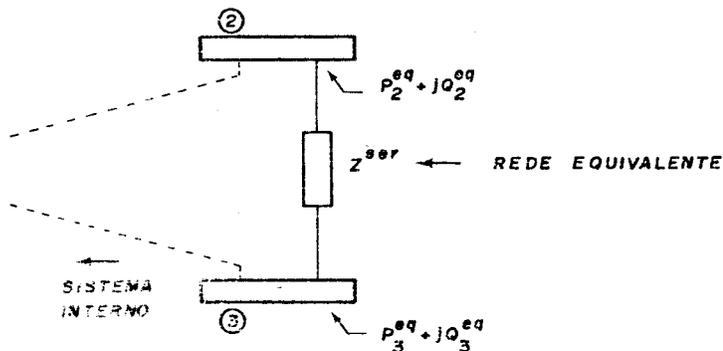
$$\left\{ \begin{array}{l} P_2^{eq} + j Q_2^{eq} = -.252 - j . 033 \quad (\text{p.u.}) \\ P_3^{eq} + j Q_3^{eq} = -.399 - j . 080 \quad (\text{p.u.}) \end{array} \right.$$

A.4. Fluxo de Carga Equivalente com 0% das Injeções Externas e Redução das Barras de Carga Externas (FCE - PV)

Para este sistema de quatro barras, como a barra externa é PV, o modelo FCE - PV será idêntico ao FCE - 0%.

A.5. Equivalente WARD (W)

Este modelo constitui-se de: injeções equivalentes nas barras de fronteira e uma rede equivalente.



$$Z^{ser} = .200 + j 1.000 \quad (\text{p.u.})$$

$$P_2^{eq} + j Q_2^{eq} = -.252 + j .046 \quad (\text{p.u.})$$

$$P_3^{eq} + j Q_3^{eq} = -.400 - j .005 \quad (\text{p.u.})$$

Z^{ser} : obtido, fazendo os "shunts" das ligações 2-4 e 3-4 iguais a zero e eliminando-se a barra 4, através da redução de Y.

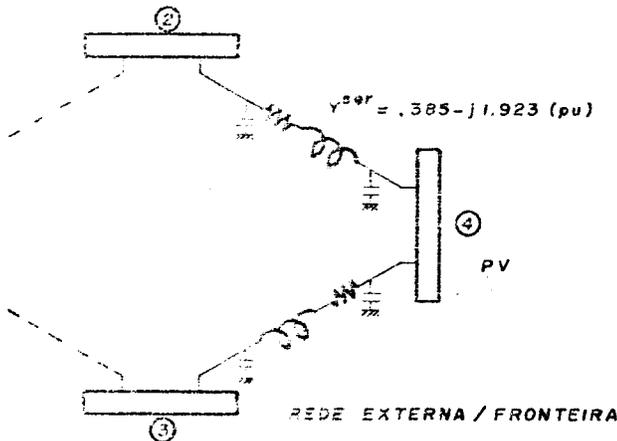
A.6. Equivalente WARD-Estendido

Modelo WE1

Constitue-se do equivalente WARD mais injeções complementares de reativos, nas barras de fronteira, obtidas através da equação:

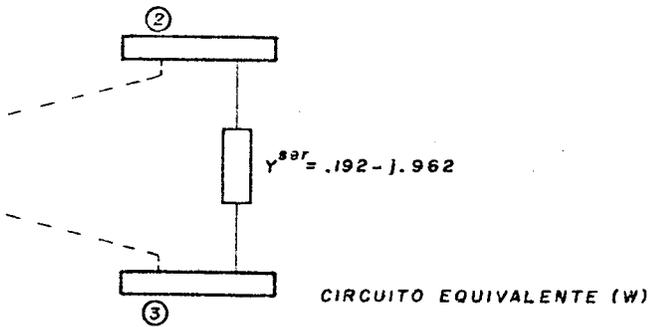
$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta Q_F^C}{V_F} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{FF}'' - \tilde{B}_{FF}'' \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta V_{-F} \end{bmatrix} \quad (A.6.1)$$

A matriz $[B_{FF}'']$ é obtida através da redução da matriz $[B'']$ da rede externa e fronteira (na formação de $[B'']$ aterra-se as barras PV externas, não consideram-se os "shunts" externos). Para o sistema de quatro barras, tem-se:



$$[B_{FF}''] = \begin{bmatrix} 1.923 & 0 \\ 0 & 1.923 \end{bmatrix}$$

A matriz $\left[\tilde{B}_{FF}'' \right]$ é obtida a partir do circuito equivalente WARD.



$$\left[\tilde{B}_{FF}'' \right] = \begin{bmatrix} .962 & -.962 \\ -.962 & .962 \end{bmatrix}$$

A equação (A.6.1) fica:

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta Q_2^C}{V_2} \\ \frac{\Delta Q_3^C}{V_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.923 & 0 \\ 0 & 1.923 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} .962 & -.962 \\ -.962 & .962 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \end{bmatrix} \quad (\text{A.6.2})$$

Modelo WE2

Decompõem-se as injeções complementares de potência

reativa $\left[\frac{\Delta Q_F^C}{V_F} \right]$ em duas parcelas: (A) e (B).

$$\left[\begin{array}{c} \frac{\Delta Q_F^C}{V_F} \end{array} \right] = \underbrace{\text{diag} [B_F^{\text{sh}}]}_{(A)} \cdot \left[\Delta V_{-F} \right] + \underbrace{\left\{ [B_{FF}'' - \tilde{B}_{FF}''] - \text{diag} [B_F^{\text{sh}}] \right\}}_{(B)} \cdot \left[\Delta V_{-F} \right]$$

Para o sistema de quatro barras, tem-se:

$$\left[\begin{array}{c} \frac{\Delta Q_2^C}{V_2} \\ \frac{\Delta Q_3^C}{V_3} \end{array} \right]^A = \begin{bmatrix} 1.923 & 0 \\ 0 & 1.923 \end{bmatrix} \cdot \left[\begin{array}{c} \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \end{array} \right]$$

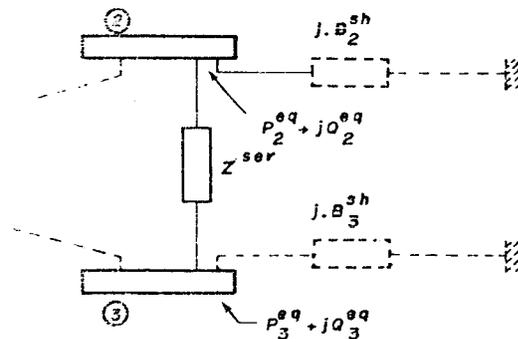
$$\left[\begin{array}{c} \frac{\Delta Q_2^C}{V_2} \\ \frac{\Delta Q_3^C}{V_3} \end{array} \right]^B = \begin{bmatrix} -.962 & +.962 \\ .962 & -.962 \end{bmatrix} \cdot \left[\begin{array}{c} \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \end{array} \right]$$

Com o objetivo de se comparar as parcelas (A) e (B) considera-se $\Delta V_2 = V_2^{\text{Exato}} - V_2^{\text{Básico}}$ e $\Delta V_3 = V_3^{\text{Exato}} - V_3^{\text{Básico}}$ (estes valores encontram-se na Tab. A.1).

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta Q_2^C}{V_2} \\ \frac{\Delta Q_3^C}{V_3} \end{bmatrix}^A = \begin{bmatrix} -.021 \\ -.009 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta Q_2^C}{V_2} \\ \frac{\Delta Q_3^C}{V_3} \end{bmatrix}^B = \begin{bmatrix} -.006 \\ .006 \end{bmatrix}$$

Desprezando-se a contribuição da parcela (B), as injeções complementares de reativos poderão ser fornecidas automaticamente por admitâncias "shunt" ligadas às barras de fronteira.



$$Z^{ser} = .200 + j 1.000 \quad (\text{p.u.})$$

$$B_2^{sh} = B_3^{sh} = 1.923/2 \quad (\text{p.u.})$$

$$P_2^{eq} + j Q_2^{eq} = -.251 + j 1.055 \quad (\text{p.u.})$$

$$P_3^{eq} + j Q_3^{eq} = -.399 + j .958 \quad (\text{p.u.})$$

B_2^{sh} e B_3^{sh} : obtidos aterrando-se a barra 4 (PV - Externa) e eliminando-a (através de redução da matriz $[B]$, montada sem considerar os "shunts" externos).

A.7. Resultados

Foi simulada uma contingência na parte interna do sistema de quatro barras e substituiu-se a parte externa por um dos seis modelos equivalentes. A contingência consistiu em multiplicar por dois a impedância série e dividir por dois a reatância "shunt" da ligação 1-2, simulando-se, dessa forma, a saída de um dos circuitos da ligação 1-2. A precisão utilizada foi 0,1 MW/MVAR.

Os resultados mostrados na Tab. - A.1, por si sô, não permitem que se conclua sobre os métodos mais precisos, é necessário levar-se em conta os resultados obtidos para vários sistemas de teste.

MODELO VARIÁVEL	CASO BÁSICO	EXATO	FCE-90%	FCE-0% (*)	W	WEL	WE2
V_2 (p.u.)	1.0244	1.0135	1.0134	1.0125	1.0009	1.0130	1.0147
V_3 (p.u.)	1.0007	.9962	.9963	.9971	.9877	.9970	.9959
P_{12} (MW)	30.18	24.31	24.31	24.32	24.36	24.32	24.34
P_{13} (MW)	37.42	43.82	43.82	43.81	43.93	43.83	43.80
Q_{12} (MVAR)	-18.42	-8.10	-8.09	-8.00	-6.86	-8.05	-8.22
Q_{13} (MVAR)	-13.94	-12.98	-13.00	-13.16	-11.31	-13.15	-12.93

(*) para este sistema o modelo FCE-PV é igual ao modelo FCE-0%

Tabela - A.1 Resultados (Sistema de Quatro Barras)

APÊNDICE B

OBTENÇÃO DE CIRCUITOS EQUIVALENTES ATRAVÉS
DO MÉTODO DE ELIMINAÇÃO DE GAUSS

B.1. Método de Eliminação de Gauss

Considere-se o sistema de equações lineares que estabelece as relações entre as correntes e as tensões nodais, através da matriz das admitâncias nodais:

$$\begin{aligned} Y_{11} \cdot V_1 + \dots + Y_{1K} \cdot V_K + \dots + Y_{1N} \cdot V_N &= I_1 \\ \dots & \\ Y_{K1} \cdot V_1 + \dots + Y_{KK} \cdot V_K + \dots + Y_{KN} \cdot V_N &= I_K \quad (B.1.1) \\ \dots & \\ Y_{N1} \cdot V_1 + \dots + Y_{NK} \cdot V_K + \dots + Y_{NN} \cdot V_N &= I_N \end{aligned}$$

A tensão V_K no nó (K) aparece em todas as equações correspondentes aos nós vizinhos da barra (K). A injeção I_K só está presente na equação (K). A eliminação do nó (K) pode ser simulada através da eliminação da variável V_K em todas as equações em que aparece com coeficiente não nulo, e pela retirada da equação (K) do sistema (B.1.1). Obtém-se desta forma um sistema de (N-1) equações em que não aparecem as variáveis V_K e I_K . As admitâncias que aparecem como coeficientes no novo sistema de equações, bem como as novas injeções de corrente, correspondem ao

circuito equivalente obtido a partir da eliminação do nó (K).

Quando o nó (K) é eliminado, apenas alguns coeficientes de algumas equações do sistema (B.1.1) são modificados. Os coeficientes $Y_{\ell K}$ da variável V_K só aparecem nas equações correspondentes às barras vizinhas da barra (K) ($\ell \in \Omega_K$, Ω_K conjunto das barras vizinhas de (K)). A eliminação da variável V_K da equação (ℓ), $\ell \in \Omega_K$, faz com que sejam modificados (ou criados) os elementos $Y_{\ell m}$, $m \in \Omega_K$, bem como o elemento $Y_{\ell \ell}$. O processo é repetido para todo $\ell \in \Omega_K$. Desta forma, a eliminação do nó (K) torna a vizinhança de (K) interligada de todas as maneiras possíveis (com ligações novas ou previamente existentes). Algumas destas situações estão ilustradas na Fig. - B.1.1.

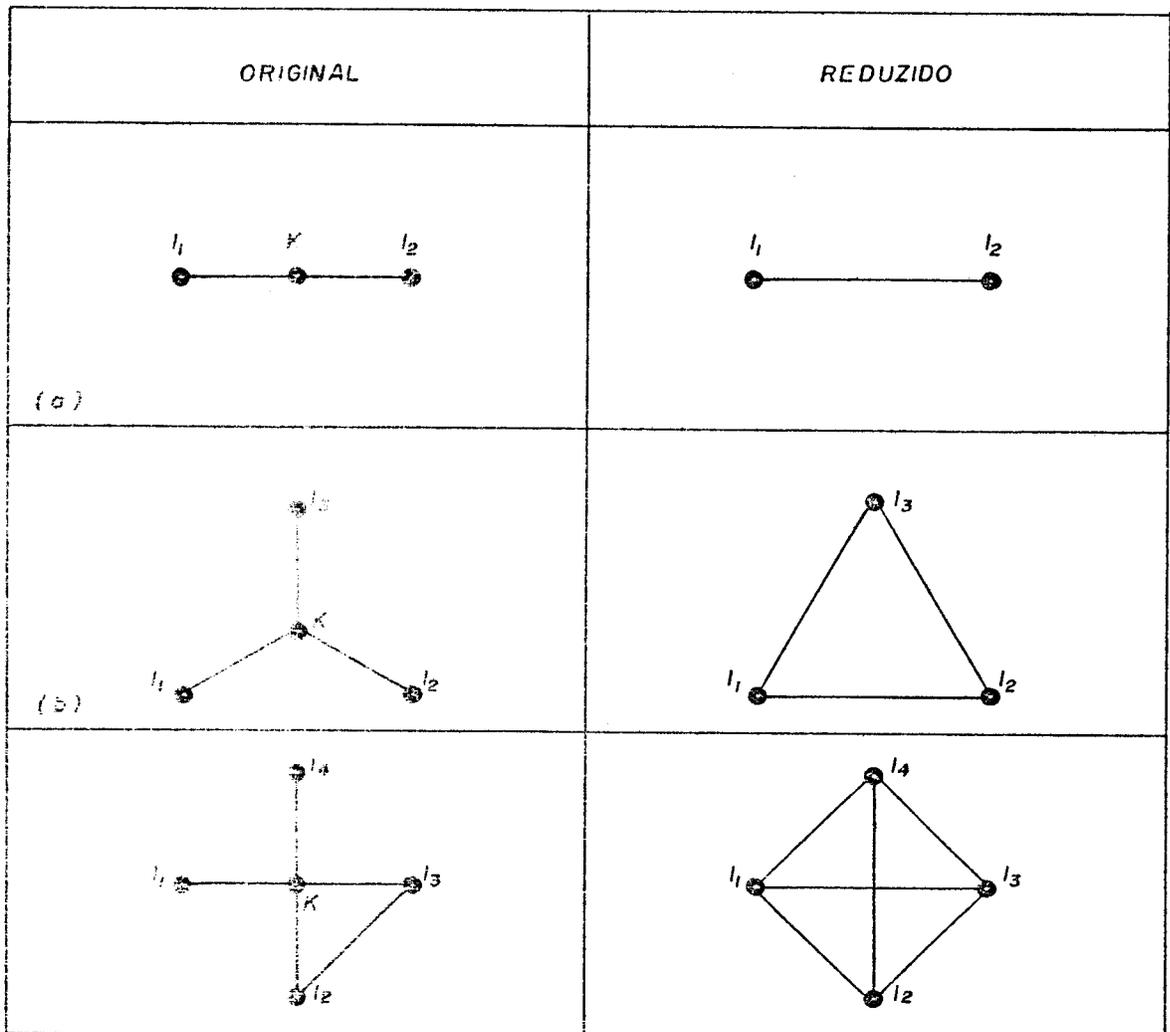


Fig. - B.1.1

Considere-se, como exemplo, a rede representada na Fig. - B.1.2, na qual os números indicados entre parênteses são as admitâncias dos ramos correspondentes. O nó (0) é a referência.

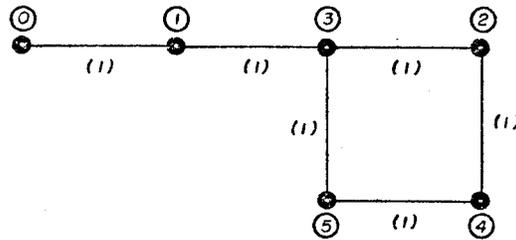


Fig. - B.1.2

A matriz admitância nodal deste sistema é dada por:

2		-1		
	2	-1	-1	
-1	-1	3		-1
	-1		2	-1
		-1	-1	2

A retirada do nó (3), por exemplo, pode ser simulada através da eliminação de Gauss, zerando-se todos os elementos da coluna (3), com exceção do elemento da diagonal principal. Após a realização destas operações obtém-se:

$5/3$	$-1/3$			$-1/3$
$-1/3$	$5/3$		-1	$-1/3$
$-1/3$	$-1/3$	1		$-1/3$
	-1		2	-1
$-1/3$	$-1/3$		-1	2

Retirando-se a equação (linha) correspondente ao nó (3), obtêm-se a matriz equivalente do sistema reduzido.

$5/3$	$-1/3$		$-1/3$
$-1/3$	$5/3$	-1	$-1/3$
	-1	2	-1
$-1/3$	$-1/3$	-1	2

A rede reduzida, com as admitâncias correspondentes, está representada na Fig. - B.1.3.

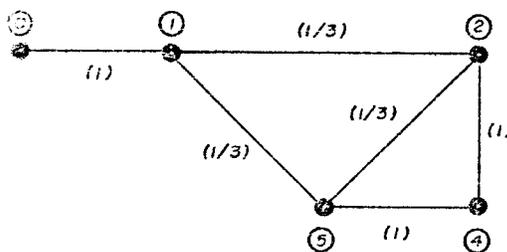


Fig. - B.1.3

No processo de eliminação sã foram afetados os nãos da vizinhança do nã (3). A transformação realizada, neste exemplo, corresponde a uma transformação Y - Δ , como pode ser verificado na Fig. - B.1.4

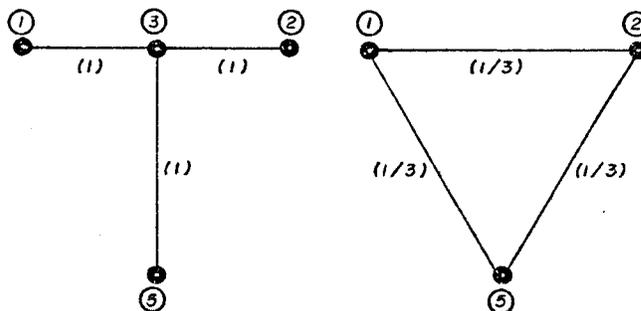


Fig. - B.1.4

B.2. Obtenção de Redes Equivalentes através da Redução de Circuitos

O processo descrito para a eliminação de um não pode ser repetido, sucessivamente, para eliminar um conjunto de nãos prã-estabelecido. Em particular, pode-se utilizar o mãtodo de eliminação de Gauss na obtenção de equivalentes externos, basta que se considere o conjunto dos nãos da parte externa do sistema interligado como sendo o conjunto a ser eliminado.

Considere-se a representação linear do sistema interligado dada por:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_E \\ \underline{I}_F \\ \underline{I}_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{EE} & Y_{EF} & \\ Y_{FE} & Y_{FF} & Y_{FI} \\ & Y_{IF} & Y_{II} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{V}_E \\ \underline{V}_F \\ \underline{V}_I \end{bmatrix} \quad (B.2.1)$$

onde os índices (E), (F) e (I) referem-se, respectivamente, à parte externa, fronteira e parte interna do sistema interligado. Considere a situação na qual não se deseja determinar \underline{V}_E , ou seja, pretende-se somente determinar \underline{V}_F e \underline{V}_I . Elimina-se a variável \underline{V}_E aplicando-se, ordenadamente, o método de eliminação de Gauss. Considerando-se que as matrizes envolvidas ($[Y_{EE}]$, $[Y_{EF}]$, $[Y_{FE}]$ e $[Y_{FF}]$) são esparsas, a eliminação pode ser feita usando-se técnicas de fatoração triangular. Após a eliminação o sistema (B.2.1) assumirá a forma:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_F^{eq} \\ \underline{I}_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{FF}^{eq} & Y_{FI} \\ Y_{IF} & Y_{II} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{V}_F \\ \underline{V}_I \end{bmatrix} \quad (\text{B.2.2})$$

onde:

$$\begin{bmatrix} Y_{FF}^{eq} \\ Y_{IF} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{FF} - Y_{FE} \cdot Y_{EE}^{-1} \cdot Y_{EF} \\ Y_{IF} \end{bmatrix} \quad (\text{B.2.3})$$

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_F^{eq} \\ \underline{I}_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{I}_F - Y_{FE} \cdot Y_{EE}^{-1} \cdot \underline{I}_E \\ \underline{I}_I \end{bmatrix} \quad (\text{B.2.4})$$

As admitâncias equivalentes podem ser obtidas diretamente da matriz $\begin{bmatrix} Y_{FF}^{eq} \\ Y_{IF} \end{bmatrix}$. A matriz $[Y_{FF}]$ corresponde às ligações previamente existentes entre as barras de fronteira. A matriz $[-Y_{FE} \cdot Y_{EE}^{-1} \cdot Y_{EF}]$ representa as novas ligações, ou seja, as ligações do circuito equivalente. Se (K) e (l) forem duas barras de fronteira, o elemento (K, l) da matriz $[-Y_{FE} \cdot Y_{EE}^{-1} \cdot Y_{EF}]$ será a admitância equivalente que liga as barras (K) e (l).

Nota-se também que a rede equivalente é função apenas da configuração e parâmetros do sistema externo. Por outro lado, as injeções equivalentes $\begin{bmatrix} I_{-F}^{eq} \end{bmatrix}$, na equação (B.2.4) dependem das injeções externas. No entanto, se for conhecido o estado do sistema retido (interno mais fronteira), não será necessário o conhecimento do nível atual das injeções do sistema externo $\begin{bmatrix} I_{-E} \end{bmatrix}$ para a determinação das injeções equivalentes. Pode-se obtê-las através da equação (B.2.5).

$$\begin{bmatrix} I_{-F}^{eq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{FF}^{eq} \cdot \underline{V}_{-F} + Y_{FI} \cdot \underline{V}_{-I} \end{bmatrix} \quad (B.2.5)$$

Este procedimento apresenta vantagens, uma vez que os níveis das injeções $\begin{bmatrix} I_{-E} \end{bmatrix}$ variam frequentemente, enquanto que a configuração do sistema externo pode permanecer a mesma por longos períodos de tempo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - B. Stott and O. Alsac, "Fast decoupled load flow", IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-93, p.p. 859-869, May/June 1974.
- [2] - N.M. Peterson, W.F. Tinney and D.W. Bree, Jr., "Iterative linear AC power flow solution for fast approximate outage studies", IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-91, p.p. 2048-2056, September/October 1972.
- [3] - H. Duran and N. Arvanitidis, "Simplification for area security analysis: a new look at equivalence", IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-91, p.p. 670-679, March/April 1972.
- [4] - J.B. Ward, "Equivalent circuits for power-flow studies", AIEE Trans., vol. 68, p.p. 373-382, 1949.
- [5] - W.F. Tinney and W.L. Powell, "The REI approach to power network equivalents", Proc. PICA Conf., p.p. 314-320, Toronto, Maio 1977.
- [6] - S. Deckmann, A. Pizzolante, A. Monticelli, B. Stott e O. Alsac, "Studies on power system load flow equivalencing", aceito para apresentação no IEEE PES Winter Meeting, New York, Janeiro 1980, e para publicação no IEEE Trans. Power App. Syst.
- [7] - H.H. Happ, "Optimal power dispatch", IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-93, p.p. 820-830, May/June 1974.

- |8| - A. Pizzolante, A. Monticelli e S. Deckmann, "Execução de funções avançadas de controle em tempo real em sistemas parcialmente observáveis", a ser apresentado no V Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Recife, Novembro 1979.
- |9| - A. Monticelli, S. Deckmann e A. Garcia, "Equivalentes externos em tempo-real - Relatório Final", Contrato de Pesquisa UNICAMP-CEPEL, 1977.
- |10| - A. Monticelli, S. Deckmann, A. Garcia and B. Stott, "Real-Time external equivalents for static security analysis", IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-98, p.p. 498-508, March/April 1979.
- |11| - F.C. Aschmoneit and J.F. Verstege, "An external system equivalent for on-line steady-state generator outage simulation", IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-98, p.p. 770-779, May/June 1979.