

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
DEZEMBRO DE 1979

EQUIVALENTES ESTÁTICOS PARA
SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Sigmar Maurer Deckmann

Orientador: Alcir José Monticelli

Tese de Doutorado apresentada
à Faculdade de Engenharia da
Universidade Estadual de Campinas

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

para

Carla

Ana

Guilherme

"A ciência é construída a partir de fatos, da mesma maneira que uma casa é feita de tijolos; mas o acúmulo de fatos não representa ciência, assim como uma coluna de pedras não é uma casa".

Henri Poincaré

Agradecimentos

O assunto discutido neste trabalho resultou de pesquisa desenvolvida na UNICAMP, subvencionada pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL). Pelo esforço conjunto e pela satisfação do trabalho realizado, quero externar os meus sinceros agradecimentos aos demais componentes do grupo, em especial:

ao Alcir, como orientador, professor e companheiro,
ao Ariovaldo, colega e amigo, pela ajuda desinteressada,
ao Pizzolante, como companheiro de jornada.

Sinto-me também em dívida com

Brian e Ongum, pelas ricas contribuições,
Niura, pelo esmero gráfico.

A todos, pelo estímulo, obrigado.

RESUMO

Neste trabalho são discutidos equivalentes estáticos para representar partes de sistemas de energia elétrica. Técnicas convencionais de redução, tais como transformações Y- Δ e equivalentes generalizados Thèvenin e Norton não têm levado a resultados satisfatórios, devido às características não-lineares do sistema de transmissão e distribuição. Métodos especiais de redução são apresentados e testados, inclusive para o sistema Sudeste brasileiro.

Com equivalentes estáticos, os problemas afetos ao planejamento e à operação do sistema são reduzidos às dimensões da área de maior interesse para estudo. Isto representa um estímulo à utilização de mini-computadores na análise de grandes sistemas.

Nas novas aplicações de controle em tempo real, a representação das partes não-observáveis através de equivalentes externos, permite simular diferentes condições de operação, entre elas a importante análise de segurança estática.

ABSTRACT

Static equivalent models are considered for electric power system representation. Normal reduction methods, such as Y- Δ transformation and generalized Thèvenin-Norton equivalents, suffer from inaccuracies due to system non-linearities. Special reduction methods are discussed and tested, also for the Brazilian Southeast system.

Static equivalents turn it possible to reduce the planning or operational problems to a more convenient study system size. This also represents a stimulus for introducing mini-computers on large power system analysis.

In the recent applications on real-time control, the representation for non-observable parts by static equivalents, is essential to perform the static security analysis.

INDICE

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1	Dos Objetivos	2
1.2	Da Organização do Trabalho	2
1.3	Dos Modos de Aplicação de Equivalentes Estáticos	3
1.4	Do Controle em Tempo Real (CTR)	4
1.5	Das Funções de Controle	5
1.6	Dos Estados de Operação	6
1.7	Das Ações de Controle	6
1.8	Da Divisão do Sistema	7
1.9	Das Reações do Sistema Externo	8
1.10	Dos Critérios para a Comparação de Equivalentes	9
2.	REVISÃO SUMÁRIA DE EQUIVALENTES ESTÁTICOS	11
2.1	Histórico	11
2.2	Linhas de Pesquisa	12
2.3	Notação Matricial Usada	13
2.4	Equivalentes Ward	13
2.4.1	Redução de Circuitos	13
2.4.2	Equivalente Ward com Injeções de Corrente (WI)	16
2.4.3	Discussão do Modelo WI	17
2.4.4	Equivalente Ward com Cargas Passivas (WY)	17
2.4.5	Discussão do Modelo WY	18
2.4.6	Modelos Ward Aplicados no CTR	18
2.4.6.1	Ajuste na Fronteira	18
2.4.6.2	Representação do Efeito PV Externo	21

2.5	Modelos Linearizados	22
2.5.1	Modelo Jacobiano Reduzido (JR)	22
2.5.2	Utilização do JR	24
2.5.3	Discussão do Modelo JR	25
2.5.4	Modelo Linearizado para Potência Ativa	26
2.5.5	Modelo Jacobiano Desacoplado (JD)	27
2.5.6	Discussão do Modelo JD	28
2.6	Equivalentes REI	29
2.6.1	Fase de Expansão	29
2.6.2	Fase de Redução	32
2.6.3	Discussão do Equivalente REI	33
2.7	Equivalentes com Parâmetros Identificados	34
3.	FLUXO DE CARGA NO ESTUDO DE EQUIVALENTES	37
3.1	Introdução	37
3.2	Fluxo de Carga Equivalente (FCE)	38
3.3	Ajuste do FCE ao Caso Básico	38
3.4	Representação Aproximada das Injeções Externas	39
3.4.1	Conclusões	41
3.5	Representação Aproximada da Configuração Externa	41
3.5.1	Conclusões	42
3.6	Efeito da Eliminação de Barras Externas	42
3.6.1	Eliminação das Barras PQ	42
3.6.2	Conclusões	43
3.6.3	Eliminação de Barras PV	43
3.6.4	Conclusões	43
3.7	Efeito de Reduzir as Admitâncias "Shunt"	44
3.7.1	Conclusões	45

4.	EQUIVALENTES ESTÁTICOS APLICADOS AO CTR	48
4.1	Obtenção do Equivalente Ward	48
4.1.1	Conclusões	51
4.2	Modelo Ward Desacoplado (WD)	51
4.2.1	Modelo Jacobiano Desacoplado (JD)	53
4.2.2	Discussão do WD e JD	54
4.3	Modelo Ward Estendido (WE)	54
4.3.1	Discussão do WE	56
4.3.2	Modelo WE com Barras PV-fictícias	56
4.3.3	Modelo WE com Efeito Cruzado (WEC)	57
4.3.4	Discussão do WEC	59
4.4	Investigações com Modelos Linearizados	60
4.4.1	Modelo Jacobiano Aproximado (J0, J50)	61
4.4.2	Discussão do J0 e J50	62
4.5	Investigações com Equivalentes REI	62
4.5.1	Discussão do REI1, REI2 e REI8	63
4.6	Comparação dos Principais Métodos	64
4.6.1	Análise dos Resultados	67
5.	TÓPICOS ESPECIAIS	68
5.1	Equivalentes Usando Dados de Previsão	69
5.1.1	Perda Temporária de Observabilidade	69
5.2	Contingências de Geração/Carga	70
5.2.1	Característica de Regulação de Freqüência	72
5.2.2	Crítérios de Participação	74
5.2.3	Contingência de Geração em Sistemas Reduzidos	76
5.3	Mudanças de Configuração Externa	80
5.3.1	Atualização do Equivalente	81
5.3.2	Efeito da Mudança de "Tap"	82
5.3.3	Límites das Fontes Externas de Reativos	83

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	83
APÊNDICE A	
Considerações sobre o Fluxo de Carga Desacoplado Rápido (FCDR)	87
APÊNDICE B	
Descrição dos Exemplos Testados	90
APÊNDICE C	
Processo de Simulação Utilizado	94
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98

LISTA DE FIGURAS E TABELAS

Figura

1.1	Transições entre os estados de operação	7
1.2	Divisão do sistema interligado	8
2.1	Exemplo de redução Y- Δ	14
2.2	Equivalente WI	16
2.3	Equivalente WY	18
2.4	Separação de reações na fronteira	23
2.5	Circuito REI para barras de geração	30
2.6	Equivalente REI	32
3.1	Representação do FCE	39
3.2	FCE com erros nas injeções externas	40
3.3	FCE com erro de configuração externa	41
3.4	FCE com eliminação das barras PQ externas	42
3.5	FCE com eliminação externa total	43
3.6	Modelo Ward com e sem "shunt" externo	44
3.7	Redução de elemento "shunt"	46
3.8	Situação de ressonância	46
3.9	Efeito "shunt" equivalente	47
4.1	Equivalente Ward com ajuste na fronteira	50
4.2	Comparação do modelo W com FCEPV	50
4.3	Circuitos desacoplados para B' e B''	52
4.4	Equivalente desacoplado WD	52
4.5	Comparação dos modelos W, WD e JD	53
4.6	Modelo WE com ligações PV para "terra"	55
4.7	Comparação WE e FCEPV	55
4.8	Versão WE com barras PV-fictícias	56

Figura

4.9	Modelo WE com efeito cruzado (WEC)	59
4.10	Comparação entre WE e WEC	59
4.11	Comparação dos modelos JR e JD	60
4.12	Comparação de modelos linearizados	61
4.13	Comparação de modelos REI	63
4.14	Comparação de modelos para aplicações "off-line"	65
4.15	Comparação de modelos para aplicações "on-line"	66
5.1	Características velocidade-potência de saída do gerador	72
5.2	Ordem de redução do sistema externo	78
A.1	Compensação X/R série	88
A.2	Compensação paralela	89
C.1	Esquema utilizado nas simulações	95

Tabela

2.1	Modelos obtidos por identificação	35
4.1	Relações X/R típicas	54
B.1	Características dos exemplos testados	90
B.2	Número de ligações equivalentes	91

SIGLAS BÁSICAS USADAS NO TEXTO

CRF	Característica de Regulação da Freqüência
CTR	Controle em Tempo Real
FCDR	Fluxo de Carga Desacoplado Rápido
FCE	Fluxo de Carga Equivalente
FCEPV	Fluxo de Carga Equivalente com Retenção das Barras PV
JD	Jacobiano Desacoplado
JR	Jacobiano Reduzido
REI	Radial Equivalent Injection
W	Ward
WD	Ward Desacoplado
WE	Ward Estendido
WEC	Ward Estendido com Efeito Cruzado
WI	Ward modelando Cargas como Corrente Constante
WY	Ward modelando Cargas como Admitância Constante

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

1 - Introdução

Manter elevados os níveis de confiabilidade nos sistemas de potência torna-se cada vez mais difícil e necessário, à medida que os sistemas crescem. Atualmente estão sendo implantados centros de supervisão e controle, para desempenhar o papel de vigia permanente do sistema, monitorando a segurança da operação. Para coordenar as decisões requeridas em cada situação, os centros dispõem de meios para o processamento de dados, permitindo analisar rapidamente o problema e alterar o ponto de operação, conforme necessário, através das ações de controle. A operação de um sistema através de um ou mais centros de controle abriu, ou reativou, diversos campos de pesquisa [3,33]. Um desses campos é o desenvolvimento de equivalentes para representar as partes do sistema, que não são monitoradas diretamente pelos centros [16,38,42].

Devido a constantes mudanças, sejam de demanda ou de configuração da rede, as ações de controle devem ser baseadas em informações atualizadas da operação. Através de medidas de fluxo de potência ou corrente, injeções e tensões nodais, e da posição dos disjuntores, pode-se conhecer a configuração ou "status" da rede, bem como o estado atual do sistema. São disponíveis atualmente estimadores estáticos de estado que processam os dados, detectam, identificam e suprimem valores inconsistentes, em função da redundância das medidas [21].

Em um determinado esquema de operação interligada, cada empresa monitora a sua área, podendo também controlar os fluxos de intercâmbio com as empresas vizinhas e participar do controle da frequência. Dentro desse esquema, a empresa tem acesso ao seu próprio estado, fazendo medições no seu sistema. O estado de operação das demais áreas é desconhecido, a menos que haja troca de informações a respeito. Na falta dessas informações, é necessário representar as partes não-observáveis através de modelos equivalentes, capazes de reprodu-

zir as reações do sistema completo. Esse exemplo de controle em tempo real é apenas uma das aplicações de equivalentes externos.

As maiores dificuldades encontradas na geração de equivalentes de correm da não-linearidade das relações entre as variáveis nodais de tensão e potência. Diversas ações de controle, como a ação dos reguladores de velocidade, a mudança automática de "tap" e o controle de tensão, contribuem para acentuar o comportamento não linear do sistema.

As funções de controle previstas para serem implantadas em futuro próximo utilizam modelos estáticos. A extensão das análises estáticas para dinâmicas vai exigir um novo estágio no desenvolvimento de equivalentes. Nessa fase, a experiência adquirida com o uso de equivalentes estáticos poderá ser de grande valia.

1.1 - Dos Objetivos

A grande maioria das publicações sobre equivalentes surgiu nos últimos 5 anos. Apesar das várias formas de abordagem, apenas recentemente foi feita a comparação dos principais métodos [39,40].

É objetivo deste trabalho fazer uma revisão dos métodos, discutir os principais modelos e verificar seu desempenho, inclusive no sistema interligado brasileiro.

Através de modelos híbridos de fluxo de carga e equivalentes estáticos, são estabelecidos critérios para a redução de circuitos, preservando-se as características essenciais no sistema reduzido.

Diversas versões, baseadas nesses critérios, são discutidas e testadas, visando especialmente as aplicações no controle em tempo real. Também são possíveis aplicações nos estudos de planejamento, feitos "off-line".

1.2 - Da Organização do Trabalho

No capítulo inicial é feita uma descrição dos objetivos e das aplicações. Introduce-se, também, algumas idéias básicas do controle em tempo real.

No capítulo 2 são discutidos os principais métodos encontrados na literatura, em função do seu desempenho quanto à precisão, condicionamento numérico, facilidade de obtenção, interpretação física, etc.

No capítulo 3 é apresentada a idéia do fluxo de carga equivalente como instrumento de avaliação e obtenção de equivalentes. Através de testes, são estabelecidos critérios para a redução de circuitos.

No capítulo 4 é introduzida a extensão ao modelo Ward, para aplicação "on-line". Também são testadas novas versões de modelos linearizados e REI.

No capítulo 5 são feitas algumas considerações com relação à perda temporária de observabilidade, contingência de geração/carga, e mudança da configuração externa.

As conclusões finais são dadas no capítulo 6.

No apêndice A são discutidas algumas técnicas para melhorar a convergência do fluxo de carga rápido desacoplado.

No apêndice B são descritos os exemplos testados.

Finalmente, no apêndice C, são fornecidos alguns detalhes sobre as simulações que foram feitas.

1.3 - Dos Modos de Aplicação de Equivalentes Estáticos

Equivalentes estáticos são utilizados para representar partes do sistema nas seguintes situações, definidas como modos de aplicação [39]:

Modo 1 - Dispõe-se de uma solução básica para todo o sistema. Neste caso, a utilização de equivalentes é uma opção que pode resultar em vantagens, devido à economia de cálculo com simulações repetitivas posteriores, tais como análise de segurança, planejamento, ações de controle, etc. Perde-se precisão em troca das simplificações.

Modo 2 - Dispõe-se de uma solução básica para uma parte do sistema. Para as demais partes, só se dispõem de dados aproximados. Esta é a situação existente nos centros de controle regionais, em que é conhecido o estado do sistema próprio, porém não se recebe informações atualizadas dos sistemas vizinhos. Nestes casos, a representação do sistema não monitorado através de equivalentes é uma imposição do próprio problema.

Modo 3 - Não se dispõe de um estado básico, porém se conhece a configuração correta de uma parte do sistema. Neste caso, deve-se gerar um equivalente das demais partes para se poder calcular um estado básico aproximado. É o caso típico de problemas de planejamento e previsão de carga. Também neste caso, a utilização de equivalentes é uma opção que pode facilitar as análises.

1.4 - Do Controle em Tempo Real

O controle em tempo real de sistemas de potência visa satisfazer três objetivos básicos [34]:

- i - atender às restrições de carga;
- ii - obedecer às restrições operacionais;
- iii - garantir as restrições de segurança.

Atender às restrições de carga significa acompanhar as variações da demanda. Atualmente essa função é satisfeita através do controle de carga e frequência. Se esse controle for centralizado, pode-se superpor objetivos mais amplos, sejam de ordem econômica ou de segurança, realizando estudos de otimização da operação.

Obedecer às restrições operacionais significa manter os padrões de qualidade de atendimento. Para satisfazer as restrições operacionais, pode-se controlar a tensão nas barras, ajustar os "taps" em transformadores e limitar a sobrecarga dos componentes. Com o controle centralizado, a supervisão do sistema torna-se mais eficiente.

Garantir as restrições de segurança implica em manter o sistema operando em regime permanente, e além disso satisfazer as restrições de carga e operação, mesmo diante de eventuais contingências (perda de linhas e/ou gerações). É evidente que existe um custo bastante alto para satisfazer todas essas condições. A monitoração da segurança requer uma complexa infra-estrutura envolvendo: coleta e processamento de medidas e dados atuais do sistema, obtenção da configuração e estimação de estado, análise de contingências e ações de controle.

Uma rede de comunicações por micro-ondas, rádio, canais telefôni-

cos e outros, centraliza as informações obtidas através dos medidores e indicadores para serem processadas no centro. A mesma rede de comunicações possibilita ao centro enviar de volta sinais de controle para os respectivos componentes.

1.5 - Das Funções de Controle [33]

Do recebimento das informações até a emissão dos sinais de controle, o centro realiza funções seguindo determinadas prioridades, com ou sem intervenção humana. Algumas dessas funções podem ser realizadas com informações apenas da parte monitorada pelo centro. São as funções que visam reproduzir as condições de operação atuais, como por exemplo [38]:

- configurador da rede,
- estimador de estado,
- fluxo de carga,
- previsão de demanda, etc.

Outras funções, que envolvem mudança do ponto de operação, necessitam das reações de todo o sistema:

- análise de contingências,
- ações de controle,
- otimização da operação,
- despacho econômico,
- análise de curto-circuito,
- análise de estabilidade, etc.

Neste segundo grupo de funções é que os equivalentes encontram sua principal aplicação. A análise de contingência, em particular, consiste em simular eventos possíveis de ocorrer no sistema monitorado, tais como perda de linhas, transformadores, unidades geradoras, cargas ou "shunts". A lista desses eventos deve representar em escala decrescente a gravidade ou a probabilidade de ocorrência das perturbações [41]. A simulação de contingências é fundamental para avaliar o grau de segurança com que o sistema opera.

1.6 - Dos Estados de Operação

Segundo o conceito de segurança, o sistema pode operar em quatro estados [34]:

- normal e seguro, quando são satisfeitas todas as restrições de carga, operacionais e de segurança.
- alerta, quando são satisfeitas apenas as restrições de carga e operacionais. Neste caso existe a possibilidade de alguma contingência colocar o sistema em estado de emergência.
- emergência, quando são satisfeitas apenas as restrições de carga, havendo violações de limites operacionais. Este é um estado de operação indesejável.
- restaurativo, quando são satisfeitas apenas as restrições operacionais. É a situação pós-emergência, em que foram restabelecidos os limites operacionais, à custa do desligamento de cargas ou gerações.

De acordo com as circunstâncias, o sistema pode estar operando em qualquer um desses estados. O centro deve dispor de meios para reconhecer o estado atual e agir no sentido de restabelecer o estado normal e seguro.

1.7 - Das Ações de Controle

A transição entre os estados de operação ocorre ou através de eventos, ou através das ações de controle [34]:

- controle de segurança, transição do estado de alerta ao normal e seguro.
- controle de emergência, transição do estado de emergência ao restaurativo.
- controle corretivo, transição do estado de emergência ao alerta.
- controle restaurativo, transição do estado restaurativo ao alerta.

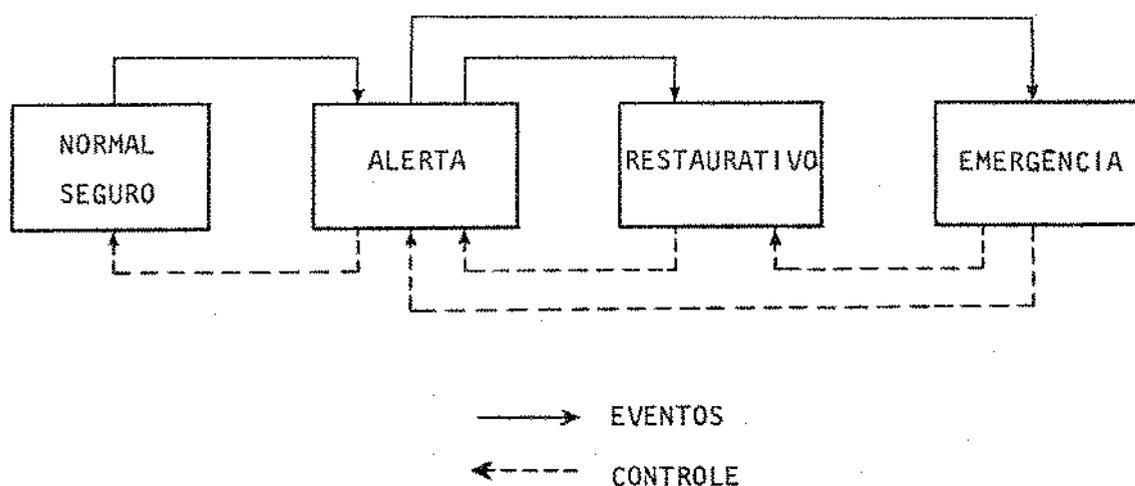


Fig. 1.1 - Transições entre os estados de operação.

1.8 - Da Divisão do Sistema

Do ponto de vista de equivalentes, é conveniente dividir o sistema interligado em três partes [18]:

- i - Sistema Interno (I) - É a área de interesse para estudo ou controle. Para o controle em tempo real (CTR), são supostos conhecidos a configuração e o estado atualizado para essa região.
- ii - Sistema Externo (E) - É formado pelas partes não essenciais para o estudo, podendo ser substituídas por equivalentes. No CTR, o sistema externo de uma área é formado pelas partes que não são monitoradas pelo centro.
- iii - Fronteira (F) - São as barras que ligam os sistemas interno e externo.

O sistema interno mais a fronteira constituem o sistema retido, enquanto que o sistema externo é a parte equivalenciada.

Devido à disponibilidade de dados atualizados, o sistema retido é considerado como parte observável, enquanto que o sistema externo, a parte não-observável.

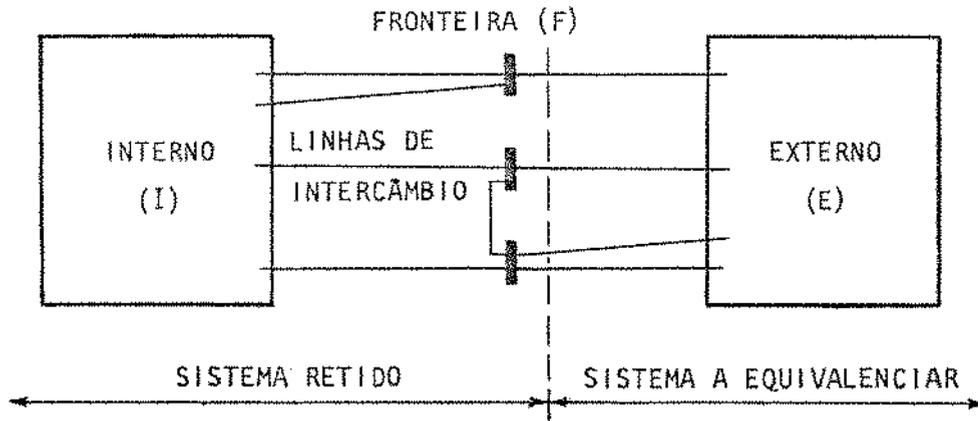


Fig. 1.2 - Divisão do sistema interligado.

Por conveniência, as barras de fronteira são definidas como sendo as barras remotas das linhas de intercâmbio. Mesmo sem realizar medições na fronteira, seu estado pode ser calculado a partir do estado interno e dos fluxos de intercâmbio.

1.9 - Das Reações do Sistema Externo

As perturbações que ocorrem num sistema são basicamente de três tipos:

- i - de demanda, resultantes das variações de consumo;
- ii - de controle, conseqüências das ações de controle;
- iii - de falha, resultantes de falha ou desligamento.

Do ponto de vista de controle em tempo real, os dois primeiros tipos de perturbação podem ser considerados lentos. O terceiro tipo de perturbação é o mais grave, por ser imprevisível e pela rapidez com que ocorre. Como conseqüência de uma falha, o sistema pode entrar em estado de emergência ou colapso total. Esta é uma situação que o controle de segurança deve ser capaz de resolver, mesmo na presença de equivalentes. É importante, por isso, testar as reações dos equivalentes nas condições mais severas possíveis.

Conhecendo-se o carregamento das ligações para o caso básico, pode-se prever se a saída de uma determinada ligação representa um impacto significativo sobre o sistema externo ou não. Normalmente, o remanejamento de fluxos de

intercâmbio resulta em fortes reações externas. As linhas de intercâmbio são, por isso, candidatas naturais à lista de contingências para testar o desempenho de equivalentes [25].

1.10 - Dos Critérios para a Comparação de Equivalentes

Ao se substituir uma parte do sistema por equivalentes, está-se implicitamente aceitando algumas aproximações, em troca de simplificações no modelo não linear. Nesse sentido, os equivalentes devem representar o melhor compromisso entre as vantagens alcançadas pelas simplificações e o custo associado às aproximações introduzidas.

Diversos critérios podem ser utilizados para avaliar o desempenho dos equivalentes [32,39]. Para os modelos a serem utilizados em tempo real, considera-se as seguintes propriedades fundamentais:

a) Confiabilidade do modelo, pois dele dependem as ações de controle. Para se concluir sobre a sua regularidade, é necessário submeter o modelo a uma grande variedade de situações possíveis de ocorrer. A precisão dos resultados é medida através dos erros de reação do modelo equivalente em relação às reações do sistema completo, face a contingências de linhas, transformadores ou geradores. Dessa forma, o equivalente é avaliado nas mesmas condições em que será utilizado.

b) Bom condicionamento numérico - Ligações equivalentes com relações X/R muito baixas podem criar problemas de convergência para o fluxo de carga desacoplado [17]. Um grande número de ligações equivalentes diminui sensivelmente a esparsidade do circuito reduzido. Do ponto de vista computacional, é desejável manter o grau de esparsidade elevado [11].

c) A simplicidade do equivalente é importante na obtenção e na aplicação do modelo. Um equivalente com interpretação de rede é mais fácil de manipular e se adapta melhor aos programas existentes, do que um modelo de sensibilidade, por exemplo.

d) A facilidade de atualização está relacionada com a dependência de informações externas. Há, basicamente, dois motivos para se atualizar o equivalente:

- i - representar mudanças na configuração externa;
- ii - ajustar o modelo às variações de demanda.

A configuração externa muda relativamente pouco. As mudanças de topologia, sejam decorrentes de falha ou de controle, podem ser transmitidas de uma área para outra, por exemplo via telefone. O custo associado é baixo. As variações de demanda ou operação, ao contrário, mudam constantemente. Para se atualizar esses dados, é necessário realizar a troca de informações completas entre os centros. O custo associado é muito maior. Para aplicações "on-line", pode-se admitir a atualização da configuração, porém dificilmente haverá condições para se atualizar os dados relativos à demanda externa. No máximo se dispõem de dados operativos das principais unidades de geração externa, para simular contingências de geração/carga [37].

CAPÍTULO 2 - REVISÃO SUMÁRIA DE EQUIVALENTES ESTÁTICOS

2.1 - Histórico

Até há 25 anos atrás, o planejamento da expansão, operação do sistema, análise de defeitos, estabilidade e outros estudos ainda eram baseados em simulações feitas com os analisadores de redes. Havia a necessidade de utilizar equivalentes, devido a limitações para acomodar os sistemas maiores. As dimensões dos problemas estudados e a capacidade dessas máquinas exigiam que as redes fossem simplificadas, e estas simplificações em geral eram compatíveis com as precisões que podiam ser obtidas neste tipo de equipamento. Da experiência que foi adquirida através desses estudos, resultou um importante trabalho sobre equivalentes, publicado em 1949 por J.B. Ward [1]. Os modelos, que tomaram o seu nome, tornaram-se clássicos e são utilizados até hoje.

Após a publicação, em 1956, do primeiro método de cálculo de fluxo de carga por computador digital eficiente [2], os analisadores de rede começaram a cair em desuso. O aumento da capacidade de resolução dos computadores, diminuiu, por algum tempo, a necessidade de equivalentes, tornando possível analisar redes de mais de 5000 barras. No entanto, o crescimento das redes e do número de casos a serem estudados, bem como o aparecimento de centros de supervisão e controle, fizeram ressurgir, em novas bases, o problema da obtenção de equivalentes externos.

Em 1967, T. DyLiacco expôs a idéia de controle supervisorio de um sistema de potência [3]. O principal objetivo era aumentar a confiabilidade do sistema e evitar colapsos, como o que tinha ocorrido em 1965, colocando grande parte de Nova York sem energia durante várias horas. A idéia gerou grande interesse de parte das empresas que enfrentavam problemas semelhantes, e hoje já estão começando a operar os primeiros centros automáticos, que realizam funções avançadas de supervisão e controle em tempo real.

Diversas novas linhas de pesquisa foram surgindo nas áreas de obtenção e processamento de dados, estimação de estado, otimização da operação, proteção do sistema, e outros.

2.2 - Linhas de Pesquisa sobre Equivalentes

A necessidade de representar as partes não monitoradas para simular as funções de controle reativou o interesse por equivalentes. Consegue-se, através deles, contornar o problema da troca de informações entre as empresas, e reduzir o trabalho computacional no centro do controle.

As pesquisas desenvolvidas nessa área seguem basicamente quatro linhas:

1. Redução de circuitos,
2. Redução de matriz de sensibilidade,
3. Equivalentes REI (Radial Equivalent Injection),
4. Identificação de circuitos.

A primeira linha é a continuação da linha Ward. Após sucessivas melhorias [7,13,36], resultou um modelo compatível com as aplicações em tempo real.

A segunda linha utiliza relações de sensibilidade para representar as reações externas [7,23,26]. Os modelos linearizados resultantes, não são interpretados por circuitos equivalentes, o que é a sua principal desvantagem.

Os equivalentes REI surgiram na Romênia, desenvolvidos por P. Dîmo [14]. Serviram de base para uma série de adaptações, ao controle em tempo real [22,30,32]. Esses equivalentes também se utilizam da redução de circuitos em uma fase da obtenção.

A identificação de equivalentes utiliza métodos que não dependem de informações diretas do sistema externo. Vários esquemas de identificação já foram tentados [10,15,19,20,29,31]. O maior problema é a quantidade de cálculos envolvidos na sua obtenção e o tempo necessário para que uma modificação resulte na atualização correspondente dos parâmetros.

A seguir serão apresentados e discutidos os principais modelos das quatro linhas.

2.3 - Notação Matricial Usada

Vetores serão representados por letra maiúscula sublinhada, por exemplo:

\underline{I} - vetor de injeções nodais

\underline{I}_F - vetor de injeções na fronteira (F)

Matrizes serão representadas por letra maiúscula não sublinhada, por exemplo:

Y - matriz admitância nodal

Y_R - matriz admitância reduzida

Y_{EE} - submatriz admitância para o sistema externo (E)

Elementos de vetores e matrizes são representados por letras maiúsculas, acompanhadas de índices minúsculos, por exemplo:

I_k - injeção nodal da barra k

Y_{k-l} - elemento k-l da matriz Y

2.4 - Equivalentes Ward

2.4.1 - Redução de Circuitos

As transformações série-paralelo e estrela-triângulo constituem as formas mais conhecidas de redução de circuitos. Quando um sistema é representado por equações matriciais essas transformações podem ser sistematizadas através da eliminação de Gauss, usando técnicas que exploram a simetria e a esparsidade das matrizes [5,6,18].

Considere-se, por exemplo, a transformação Y- Δ da figura 2.1.

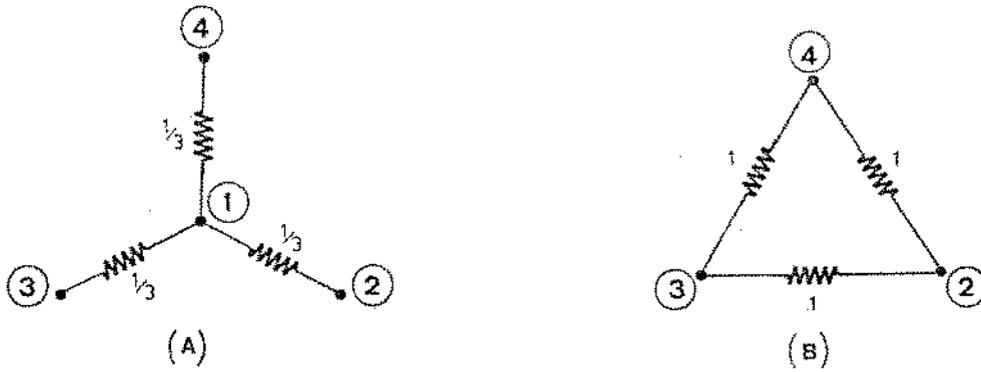


Fig. 2.1 - Exemplo de redução Y-Δ.

A matriz admitância nodal do circuito (A) é dada por:

$$Y_A = \begin{bmatrix} 9 & -3 & -3 & -3 \\ -3 & 3 & 0 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ -3 & 0 & 0 & 3 \end{bmatrix}$$

Realizando-se a eliminação da coluna 1, que corresponde ao nó que se quer eliminar, obtém-se:

$$Y_R = \begin{bmatrix} 3 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 2 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}$$

A submatriz formada pelos nós remanescentes constitui a matriz admitância do circuito reduzido (B):

$$Y_B = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}$$

O procedimento anterior pode ser generalizado para o caso de equivalentes [18]. Um sistema interligado (figura 2.1) pode ser descrito pelas equações lineares, particionadas:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_E \\ \underline{I}_F \\ \underline{I}_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{EE} & Y_{EF} & 0 \\ Y_{FE} & Y_{FF} & Y_{FI} \\ 0 & Y_{IF} & Y_{II} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{V}_E \\ \underline{V}_F \\ \underline{V}_I \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

sendo

$\underline{I}_{E,F,I}$ = vetores das injeções nodais de corrente

$\underline{V}_{E,F,I}$ = vetores das tensões nodais

Y = matriz admitância nodal particionada

Pode-se eliminar o estado externo, substituindo-se \underline{V}_E nas demais equações. Da primeira equação resulta:

$$\underline{V}_E = Y_{EE}^{-1} \underline{I}_E - Y_{EE}^{-1} Y_{EF} \underline{V}_F \quad (2.2)$$

que, substituído nas demais equações, fornece o sistema reduzido:

$$\begin{bmatrix} \tilde{\underline{I}}_F \\ \underline{I}_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{Y}_{FF} & Y_{FI} \\ Y_{IF} & Y_{II} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{V}_F \\ \underline{V}_I \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

onde

$$\tilde{Y}_{FF} = Y_{FF} - Y_{FE} Y_{EE}^{-1} Y_{EF} \quad (2.3a)$$

$$\tilde{\underline{I}}_F = \underline{I}_F - Y_{FE} Y_{EE}^{-1} \underline{I}_E \quad (2.3b)$$

As passagens (2.1) a (2.3) representam a redução das equações do sistema externo. A matriz $\begin{bmatrix} -Y_{FE} & Y_{EE}^{-1} & Y_{EF} \end{bmatrix}$ representa o circuito equivalente

da rede externa, enquanto que o vetor $\begin{bmatrix} -Y_{FE} & Y_{EE}^{-1} & \underline{I}_E \end{bmatrix}$ representa as injeções equivalentes na fronteira. Essas injeções podem ser convertidas em potência equivalente pela relação:

$$\underline{\tilde{S}}_F = \text{diag}[\underline{V}_F] (\underline{\tilde{I}}_F)^* \quad (2.4)$$

onde

$\text{diag}[\underline{V}_F]$ = matriz diagonal das tensões na fronteira

$()^*$ - indica conjugado

2.4.2 - Equivalente Ward com Injeções de Corrente

A interpretação física da equação (2.3) é o equivalente Ward com injeções equivalentes de corrente $|\underline{I}|$ e que será designado, daqui por diante, de WI.

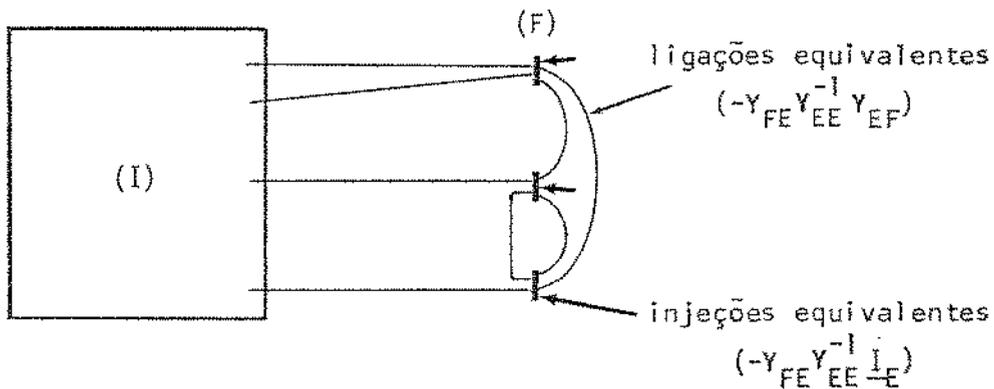


Fig. 2.2 - Equivalente WI.

Neste modelo, o circuito equivalente representa a parte passiva do sistema externo, e é formado por ligações série entre as barras de fronteira e ligações "shunt" para terra.

As injeções equivalentes constituem a parte ativa do modelo. A reflexão das injeções externas sobre a fronteira é feita através dos fatores de distribuição, representados pela matriz $\begin{bmatrix} -Y_{FE} & Y_{EE}^{-1} \end{bmatrix}$.

$$\begin{array}{c} \underline{0} \\ \underline{I}_{-F} \\ \underline{I}_{-I} \end{array} = \begin{array}{ccc} Y_{EE} + \text{diag}[y_e] & Y_{EF} & 0 \\ Y_{FE} & Y_{FF} & Y_{FI} \\ 0 & Y_{IF} & Y_{II} \end{array} \begin{array}{c} \underline{V}_{-E} \\ \underline{V}_{-F} \\ \underline{V}_{-I} \end{array} \quad (2.7)$$

Após a redução obtêm-se:

$$\begin{array}{c} \underline{I}_{-F} \\ \underline{I}_{-I} \end{array} = \begin{array}{cc} \approx Y_{FF} & Y_{FI} \\ Y_{IF} & Y_{II} \end{array} \begin{array}{c} \underline{V}_{-F} \\ \underline{V}_{-I} \end{array} \quad (2.8)$$

onde

$$\approx Y_{FF} = Y_{FF} - Y_{FE} \{ Y_{EE} + \text{diag}[y_e] \}^{-1} Y_{EF} \quad (2.9)$$

Uma vez que as cargas e gerações externas são modeladas por admitâncias "shunt", resulta $\underline{I}_{-E} = 0$ em (2.7). Em consequência, após a redução, as injeções na fronteira \underline{I}_{-F} não são alteradas, e as cargas refletidas aparecem como "shunts" equivalentes na fronteira. Este modelo será designado por WY e está representado na figura 2.3.

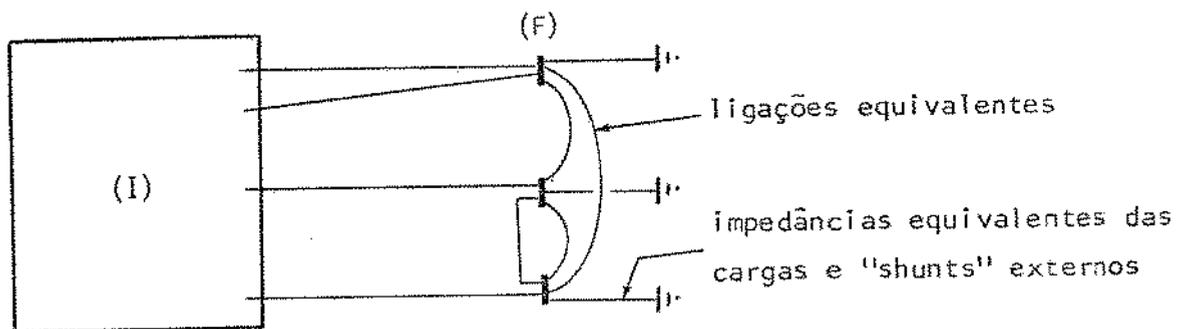


Fig. 2.3 - Equivalente WY.

2.4.5 - Discussão do Modelo WY

Este modelo apresenta praticamente as mesmas características do WI. Uma pequena vantagem é que as admitâncias das cargas não dependem dos ângulos das tensões. Em contrapartida, as admitâncias "shunt" afetam as relações X/R das ligações equivalentes durante a redução, prejudicando a convergência dos métodos desacoplados pelo princípio P- θ e Q-V. Uma outra desvantagem é a necessidade de nova redução da matriz Y para representar mudança das cargas e gerações.

O modelo WY é totalmente passivo e tem sido utilizado nos estudos de estabilidade transitória para representar a rede de forma simplificada. Não é suficientemente preciso e confiável para aplicações no controle em tempo real.

2.4.6 - Modelos Ward Aplicados ao CTR

As principais limitações dos modelos WI e WY, quando aplicados no controle em tempo real, são:

- i - a dependência de dados operacionais do sistema externo;
- ii - a ausência de reação das barras PV externas.

O primeiro problema pode ser resolvido através do ajuste de injeções na fronteira [1,13], enquanto que para o segundo foram propostas diversas soluções: retenção de uma zona de amortecimento, "buffer-zone" [7], transformação das barras de fronteira em barras PV [13], representação do efeito PV externo através de barras PV-fictícias [22,36].

2.4.6.1 - Ajuste na Fronteira

Já em 1949, J.B. Ward [1] sugeria que as injeções equivalentes fossem calculadas a partir do estado na fronteira e do circuito externo reduzido. Em 1974, Paulsson [13] explorou essa idéia, utilizando o estado fornecido pelo estimador.

As relações básicas são as equações de injeção de potência:

$$\left. \begin{aligned} P_k &= |V_k^o| \sum_{l \in k} |V_l^o| (G_{kl} \cos \theta_{kl}^o + B_{kl} \sin \theta_{kl}^o) \\ Q_k &= |V_k^o| \sum_{l \in k} |V_l^o| (G_{kl} \sin \theta_{kl}^o - B_{kl} \cos \theta_{kl}^o) \end{aligned} \right\} k \in F \quad (2.10)$$

onde

$|V_k^o| \exp(j\theta_k^o)$ = tensão da barra k no caso básico estimado;

$G_{kl} + jB_{kl}$ = admitância k-l da matriz Y reduzida;

$l \in k$ = conjunto de barras ligadas a k;

$k \in F$ = barras de fronteira.

Tanto o circuito reduzido, como o estado básico atual na fronteira, podem ser obtidos separadamente e sem o conhecimento do estado externo. O primeiro é obtido por redução de circuitos, ignorando-se as cargas e gerações (equação 2.3a), e o segundo é obtido pelo estimador de estado, a partir de medições no sistema interno [22]. Assim, a utilização das equações (2.10) permite calcular as injeções nodais a partir do estado básico conhecido e da rede equivalente disponível. Este processo de ajuste das injeções equivalentes apresenta uma série de conveniências nas aplicações em tempo real:

- i - o equivalente fica automaticamente casado às condições básicas do sistema retido;
- ii - as injeções equivalentes compensam, para o caso básico, eventuais erros de modelagem da rede externa;
- iii - a atualização das injeções pode ser realizada depois de se obter um novo estado estimado.

O casamento perfeito no caso básico é importante para a simulação de contingências a partir da solução básica, usando métodos incrementais [8,9,27].

A compensação, mesmo parcial, de erros de modelagem externa, contribui para reduzir os erros de reação causados por mudanças de configuração ex

terna. Há necessidade de se considerar apenas os casos de erros de configuração externa na proximidade da fronteira. Nestes casos, as injeções não eliminam os erros de reação externa. Essa questão será retomada nos capítulos 3 e 5.

2.4.6.2 - Representação do Efeito PV Externo

a) Zona de amortecimento

Em 1972, H. Duran e N.V. Arvanitidis [7] consideraram a retenção de uma faixa de amortecimento em torno do sistema interno, com a finalidade de responder pelas reações das barras PV externas. A idéia, em geral, produz bons resultados. No entanto, permanece o problema de como definir e atualizar essa zona de amortecimento em tempo real. Conforme os próprios autores constataram, com esse procedimento pode-se até duplicar o tamanho do sistema retido, e com isso limitar os ganhos da redução. Por outro lado, a retenção de barras PV pode favorecer a esparsidade do equivalente e facilitar a simulação de contingências de geração/carga. O cálculo do fluxo de carga em um sistema com zona de amortecimento pode ser feito através do fluxo de carga equivalente, descrito no próximo capítulo.

b) Barras PV na fronteira

A transformação das barras de fronteira em barras PV foi proposta por Paulsson [13]. A eficiência desse método para representar o efeito PV externo depende do sistema. Nas barras de fronteira, onde há pouca variação de tensão, a transformação em barra PV normalmente melhora os resultados. Nas barras onde ocorrem grandes variações, a transformação em barra PV pode gerar erros de reação significativos. Em vista da inconstância, essa solução também foi abandonada.

c) Barras PV-fictícias

Uma vez que o ajuste na fronteira permite reproduzir o estado básico no sistema reduzido, pode-se representar a reação das barras PV-externas como efeitos incrementais em torno dessa solução. Os efeitos incrementais aparecem em forma de injeções adicionais de potência reativa na fronteira, fornecidas por barras PV-fictícias, através de ligações especialmente calculadas para esse fim [36]. A obtenção das ligações fictícias será discutida, em detalhe, no

capítulo 4. Com esse método pode-se eliminar a zona de amortecimento. Uma outra forma de obter o efeito das barras PV-fictícias será descrito no ítem 2.6, sobre equivalentes REI.

2.5 - Modelos Linearizados

A idéia básica dessa linha de equivalentes consiste em representar, de forma linearizada, as reações do sistema externo em torno de um ponto de operação dado. Os modelos são obtidos por redução de matrizes de sensibilidade, que relacionam variações de tensão com variações de injeção de potência.

2.5.1 - Modelo Jacobiano Reduzido (JR)

Este modelo [23] é deduzido a partir das equações básicas do fluxo de carga Newton-Raphson [14]:

$$\begin{bmatrix} \underline{\Delta P} \\ \underline{\Delta Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_3 \\ J_2 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\Delta \theta} \\ \underline{\Delta |V|} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Para maior facilidade de apresentação, a relação de sensibilidade (2.11) será representada na forma compacta:

$$\underline{\Delta S} = J \underline{\Delta V} \quad (2.11a)$$

onde

$$\begin{aligned} \underline{\Delta S} &= [\underline{S}^o - \underline{S}] && \text{- variações nas injeções de potência} \\ \underline{\Delta V} &= [\underline{V}^o - \underline{V}] && \text{- variações nas tensões nodais} \\ J &= [J(\underline{V}^o)] && \text{- matriz jacobiana para a tensão básica } \underline{V}^o \end{aligned}$$

Para o sistema particionado pode-se escrever:

$$\begin{array}{|c|} \hline \underline{\Delta S}_E \\ \hline \underline{\Delta S}_F \\ \hline \underline{\Delta S}_I \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|c|} \hline J_{EE} & J_{EF} & 0 \\ \hline J_{FE} & J_{FF} & J_{FI} \\ \hline 0 & J_{IF} & J_{II} \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline \underline{\Delta V}_E \\ \hline \underline{\Delta V}_F \\ \hline \underline{\Delta V}_I \\ \hline \end{array} \quad (2.11b)$$

Separando-se as reações externas e internas:

$$\begin{array}{|c|} \hline \underline{\Delta S}_E \\ \hline \underline{\Delta S}_F^E \\ \hline 0 \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|} \hline 0 \\ \hline \underline{\Delta S}_F^I \\ \hline \underline{\Delta S}_I \\ \hline \end{array} = \left(\begin{array}{|c|c|c|} \hline J_{EE} & J_{EF} & 0 \\ \hline J_{FE} & J_{FF}^E & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|c|c|} \hline 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & J_{FF}^I & J_{FI} \\ \hline 0 & J_{IF} & J_{II} \\ \hline \end{array} \right) \begin{array}{|c|} \hline \underline{\Delta V}_E \\ \hline \underline{\Delta V}_F \\ \hline \underline{\Delta V}_I \\ \hline \end{array} \quad (2.11c)$$

A equação (2.11c) representa o sistema, separado conforme a figura 2.4:

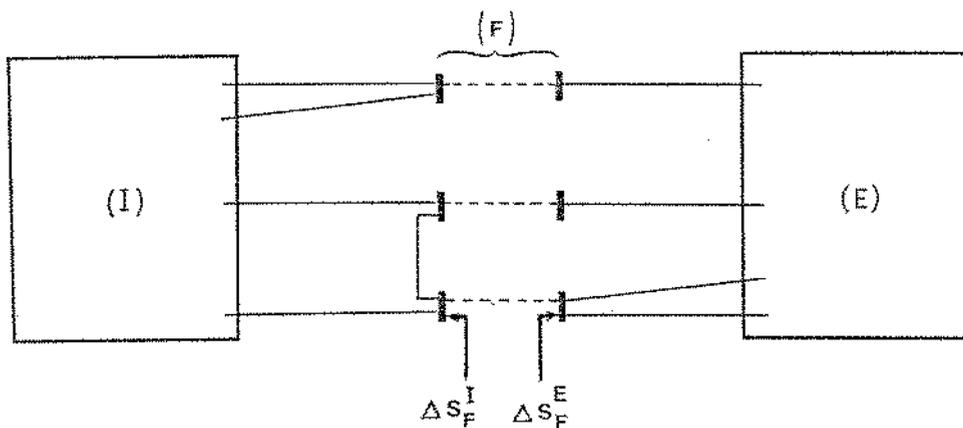


Fig. 2.4 - Separação de reações na fronteira.

Eliminando-se $\underline{\Delta V}_E$ em (2.11c), resulta o sistema reduzido:

$$\begin{array}{c} \tilde{\Delta S}_F^E \\ 0 \end{array} + \begin{array}{c} \Delta S_F^I \\ \Delta S_I \end{array} = \begin{array}{|c|c|} \hline \tilde{J}_{FF}^E & 0 \\ \hline 0 & 0 \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|c|} \hline J_{FF}^I & J_{FI} \\ \hline J_{IF} & J_{II} \\ \hline \end{array} \begin{array}{c} \underline{\Delta V}_F \\ \underline{\Delta V}_I \end{array} \quad (2.12)$$

onde

$$\tilde{J}_{FF}^E = J_{FF}^E - J_{FE} J_{EE}^{-1} J_{EF} \quad (2.12a)$$

$$\tilde{\Delta S}_F^E = \Delta S_F^E - J_{FE} J_{EE}^{-1} \Delta S_E \quad (2.12b)$$

Enquanto que a equação (2.12a) corresponde ao Jacobiano externo reduzido, a equação (2.12b) representa as variações das injeções externas refletidas na fronteira.

2.5.2 - Utilização do JR como Equivalente

A utilização da equação (2.12) como equivalente, pressupõe que:

1. as reações do sistema externo possam ser linearizadas;
2. as variações das injeções externas ($\underline{\Delta S}_E$) sejam consequência apenas da perturbação ocorrida no sistema interno.

A primeira condição aplica-se no caso de pequenas variações em torno do caso básico. Nos casos de grandes variações podem surgir erros significativos de reação. A segunda condição exclui as variações aleatórias da demanda. Assim, por exemplo, fixadas as cargas e gerações de potência ativa, a única variação de injeção externa possível é a reação de potência reativa das barras PV, que não aparecem na equação (2.12b). Com base nessas hipóteses, pode-se resolver a equação (2.12) em duas etapas:

1ª ETAPA: Considera-se $\underline{\tilde{\Delta S}}_F^E = 0$ e resolve-se o subsistema:

$$\begin{bmatrix} \underline{\Delta V}_F \\ \underline{\Delta V}_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{FF}^I + \tilde{\mathbf{J}}_{FF}^E & \mathbf{J}_{FI} \\ \mathbf{J}_{IF} & \mathbf{J}_{II} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \underline{\Delta S}_F^I \\ \underline{\Delta S}_I \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

2ª ETAPA: Com a variação do estado na fronteira ($\underline{\Delta V}_F$), calcula-se a reação linearizada do sistema externo ($\underline{\tilde{\Delta S}}_F^E$):

$$\underline{\tilde{\Delta S}}_F^E = \tilde{\mathbf{J}}_{FF}^E \underline{\Delta V}_F \quad (2.14)$$

O vetor $\underline{\tilde{\Delta S}}_F^E$ é interpretado como injeções adicionais de potência nas barras de fronteira, que passam a ter o valor reespecificado:

$$\underline{S}_F = \underline{S}_F^o - \underline{\tilde{\Delta S}}_F^E \quad (2.15)$$

A solução alternada das etapas 1 e 2 pode ser feita durante o processo iterativo do fluxo de carga. Dessa forma consegue-se, por aproximações sucessivas, incorporar as reações externas às injeções da fronteira. O resultado final representa a reação não linear do sistema retido e a reação linearizada do sistema externo.

2.5.3 - Discussão do Modelo JR

O Jacobiano é função do ponto de operação e, portanto, para se obter $\tilde{\mathbf{J}}_{FF}^E$ deve-se dispor do estado e da configuração atuais para o sistema externo. Por ser um modelo linearizado, a precisão é maior para pequenos afastamentos desse ponto de operação. No controle em tempo real, isto pode exigir a atualização do modelo para representar diferentes pontos de operação na curva de demanda diária.

Outro problema é a falta de um circuito equivalente, dificultando a manipulação do modelo. Os programas existentes precisam ser modificados para

acomodar dados de rede para o sistema interno e de matriz de sensibilidade para o sistema externo reduzido. Além disso, o modelo JR se adapta melhor aos algoritmos baseados no método de Newton. Nestes casos, o equivalente mantém a boa convergência do fluxo de carga.

Pelo fato de que as reações do sistema externo são representadas através de compensação nas injeções da fronteira, pode-se classificar o equivalente JR como sendo um modelo de fluxo de intercâmbio [10] ("tie-line flow model").

Os modelos linearizados seguintes correspondem a simplificações do Jacobiano Reduzido.

2.5.4 - Modelo Linearizado para Potência Ativa

Um modelo incremental para potência ativa pode ser obtido a partir da relação de sensibilidade [18]:

$$\underline{\Delta P} = B \underline{\Delta \theta} \quad (2.16)$$

onde

$\underline{\Delta P} = [P^{\circ} - P]$ são as variações nas injeções de potência ativa

$\underline{\Delta \theta} = [\theta^{\circ} - \theta]$ são as variações nos ângulos das tensões nodais

B é a matriz capacidade de transmissão, utilizada no fluxo de carga DC.

Este modelo pode ser obtido da equação básica (2.11), fazendo-se algumas simplificações como: tensões iguais a $1/0^{\circ}$ pu, resistências das ligações série desprezíveis, e aberturas angulares pequenas.

A utilização da relação linear (2.16), como equivalente para potência ativa, pressupõe:

- i - que as variações das tensões são desprezíveis.
- ii - que o sistema seja conservativo (perdas nulas).
- iii - que o carregamento das ligações seja muito menor que o limite estático.

Um sistema de transmissão com linhas curtas, de alta tensão, satisfaz com boa aproximação as condições acima. Porém, no controle em tempo-real, raramente se encontra um sistema externo com tais características. Este modelo, no entanto, pode ser utilizado em conjunto com outro modelo para potência reativa, resultando um equivalente incremental desacoplado.

2.5.5 - Modelo Jacobiano Desacoplado (JD)

Este modelo é obtido a partir das equações básicas do fluxo de carga desacoplado rápido [12]:

$$\begin{pmatrix} \Delta P \\ |V| \end{pmatrix} = B' \Delta \theta \quad (2.17a)$$

$$\begin{pmatrix} \Delta Q \\ |V| \end{pmatrix} = B'' \Delta |V| \quad (2.17b)$$

O procedimento é análogo ao da obtenção do modelo JR. Neste caso, resultam dois sistemas desacoplados reduzidos:

$$\begin{array}{c|c} \begin{pmatrix} \widetilde{\Delta P}_F \\ |V_F| \end{pmatrix}^E \\ \hline 0 \end{array} + \begin{array}{c|c} \begin{pmatrix} \Delta P_F \\ |V_F| \end{pmatrix}^I \\ \hline \begin{pmatrix} \Delta P_I \\ |V_I| \end{pmatrix} \end{array} = \begin{array}{c|c} \begin{pmatrix} \widetilde{B}_{FF}' \\ 0 \end{pmatrix}^E & 0 \\ \hline 0 & 0 \end{array} + \begin{array}{c|c} \begin{pmatrix} B_{FI}' \\ B_{IF}' \end{pmatrix}^I & B_{FI}' \\ \hline B_{IF}' & B_{II}' \end{array} \left| \begin{array}{c} \Delta \theta_F \\ \hline \Delta \theta_I \end{array} \right. \quad (2.18a)$$

e

$$\begin{array}{c|c} \begin{pmatrix} \widetilde{\Delta Q}_F \\ |V_F| \end{pmatrix}^E \\ \hline 0 \end{array} + \begin{array}{c|c} \begin{pmatrix} \Delta Q_F \\ |V_F| \end{pmatrix}^I \\ \hline \begin{pmatrix} \Delta Q_I \\ |V_I| \end{pmatrix} \end{array} = \begin{array}{c|c} \begin{pmatrix} \widetilde{B}_{FF}'' \\ 0 \end{pmatrix}^E & 0 \\ \hline 0 & 0 \end{array} + \begin{array}{c|c} \begin{pmatrix} B_{FI}'' \\ B_{IF}'' \end{pmatrix}^I & B_{FI}'' \\ \hline B_{IF}'' & B_{II}'' \end{array} \left| \begin{array}{c} \Delta |V_F| \\ \hline \Delta |V_I| \end{array} \right. \quad (2.18b)$$

onde

$$\begin{aligned} \left(\widetilde{B}_{FF}' \right)^E & - \text{corresponde à matriz } B' \text{ externa reduzida} \\ \left(\widetilde{B}_{FF}'' \right)^E & - \text{corresponde à matriz } B'' \text{ externa reduzida} \end{aligned}$$

A decomposição em etapas é feita em cada meia iteração do fluxo de carga desacoplado. Para o cálculo das correções angulares $(\Delta\theta)$, considera-se $(\widetilde{\Delta P}_F)^E = 0$ e resolve-se (2.18a). Em seguida, calcula-se a reação externa ativa:

$$\left(\frac{\widetilde{\Delta P}_F}{|V_F|} \right)^E = \left(B_{FF}' \right)^E \underline{\Delta\theta}_F \quad (2.19)$$

e se corrige as injeções de potência ativa na fronteira:

$$\underline{P}_F = \underline{P}_F^o - \left(\widetilde{\Delta P}_F \right)^E \quad (2.20)$$

Para calcular as correções das tensões, considera-se $(\widetilde{\Delta Q}_F)^E = 0$. Obtida a variação da tensão na fronteira $(\Delta|V_F|)$, através de (2.18b), calcula-se a reação reativa:

$$\left(\frac{\widetilde{\Delta Q}_F}{|V_F|} \right)^E = \left(B_{FF}'' \right)^E \underline{\Delta|V_F|} \quad (2.21)$$

e se modifica as injeções de potência reativa na fronteira:

$$\underline{Q}_F = \underline{Q}_F^o - \left(\widetilde{\Delta Q}_F \right)^E \quad (2.22)$$

2.5.6 - Discussão do Modelo JD

Em geral, a análise de contingências para o controle de segurança, é feita com o fluxo de carga desacoplado rápido (FCDR). O equivalente JD é perfeitamente compatível com esse algoritmo de fluxo de carga e, portanto, goza das mesmas vantagens deste, a saber:

- i - as matrizes de sensibilidade B' e B'' são constantes, esparsas e simétricas;
- ii - o armazenamento de B' e B'' ocupa da ordem da metade da memória necessária para guardar o Jacobiano.

No entanto, as aproximações feitas no FCDR não alteram o resultado obtido, apenas a convergência. No equivalente JD, essas aproximações são incorporadas ao modelo, afetando os resultados. O modelo desacoplado também não é representado através de circuitos, dificultando a sua implementação nos algoritmos convencionais de fluxo de carga. Outra desvantagem do modelo JD é que não leva em conta as resistências, que podem ser essenciais para as reações do sistema externo.

Em relação ao JR, a principal vantagem do modelo JD é que não depende do estado externo; pode ser obtido conhecendo-se apenas a topologia externa, cuja atualização é relativamente simples.

Nessa linha de pesquisa pode-se testar outras aproximações no Jacobiano, como por exemplo, usar um estado externo aproximado. Testes nesse sentido são apresentados no capítulo 4.

2.6 - Equivalentes REI

A obtenção de um equivalente do tipo REI [14,22,32] pode ser dividida em duas fases:

- 1^a FASE - Expansão - na qual se constrói um ou mais circuitos REI sobre o sistema externo. O objetivo desta fase é transformar o sistema a ser reduzido em um circuito passivo.
- 2^a FASE - Redução - na qual o circuito passivo externo é reduzido até a fronteira. Esta fase é semelhante à da obtenção de um equivalente Ward.

2.6.1 - Fase de Expansão

Para transformar o sistema externo em um sistema passivo, transferem-se as injeções externas para uma ou mais barras adicionais REI.

Considere-se, por exemplo, um circuito REI que agregue as barras

de geração externa. Esta situação está mostrada na figura 2.5. São criados dois nós adicionais: o nó REI (R), que neste caso é uma barra de geração equivalente, e o nó de ligação O.

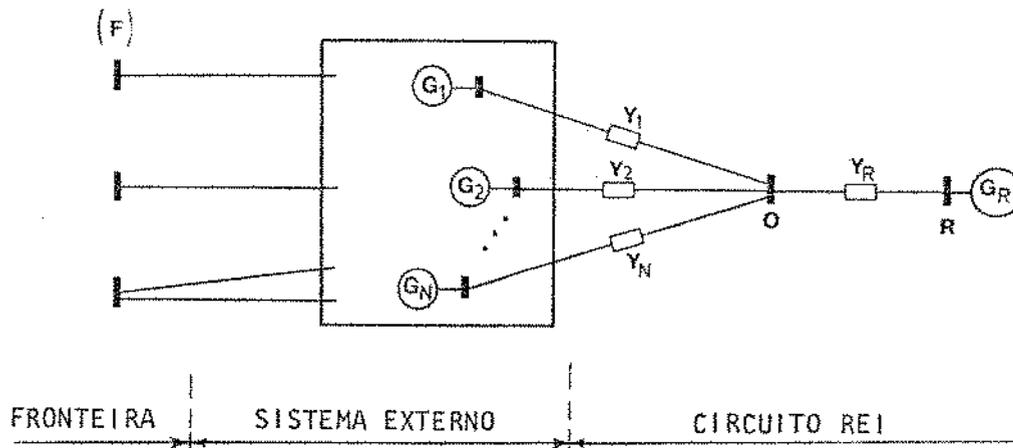


Fig. 2.5 - Circuito REI para barras de geração.

Sendo $[V_{G_1}, V_{G_2}, \dots, V_{G_N}]$ e $[S_{G_1}, S_{G_2}, \dots, S_{G_N}]$ as tensões e injeções de potência nas N barras de geração externas, o circuito REI é calculado através da relação de agregação de potência:

$$S_R = \sum_{j=1}^N S_{G_j} \quad (2.23)$$

As correntes na barra intermediária O devem satisfazer a lei dos nós:

$$I_R = \sum_{j=1}^N \left(\frac{S_{G_j}}{V_{G_j}} \right)^* \quad (2.24)$$

A tensão na barra R fica definida por:

$$V_R = \frac{S_R}{I_R^*} \quad (2.25)$$

As ligações entre a barra 0 e os N geradores são dadas por:

$$Y_j = \frac{I_{G_j}}{V_0 - V_{G_j}} = \frac{S_{G_j}^*}{V_{G_j}^* (V_0 - V_{G_j})} \quad j = 1, N \quad (2.26)$$

A tensão V_0 é arbitrária, porém há vantagens em se escolher $V_0 = 0$. Nesse caso resulta:

$$Y_j = \frac{-S_{G_j}^*}{|V_{G_j}|^2} \quad j = 1, N \quad (2.27)$$

e

$$Y_R = \frac{I_R}{V_R - V_0} = \frac{S_R^*}{|V_R|^2} \quad (2.28)$$

Com isso fica determinado o circuito REI, que agrega as barras de geração externas. O circuito obtido apresenta três propriedades importantes:

1ª PROPRIEDADE

O circuito REI tem perdas nulas.

Pode-se verificar que a potência que entra no circuito REI é igual à que sai, isto é:

$$S_R + S_0 = \sum_{j=1}^N S_{G_j} \quad (2.29)$$

Como $S_0 = V_0 I_0^* = 0$, resulta a equação (2.23) que foi imposta:

2ª PROPRIEDADE

A tensão do nó REI é a média das tensões nos geradores, ponderadas pelas respectivas injeções de corrente.

Das equações (2.23) e (2.25) obtém-se:

$$V_R = \frac{\sum_{j=1}^N S_{G_j}}{I_R^*} = \frac{\sum_{j=1}^N (V_{G_j} I_{G_j}^*)}{\sum_{j=1}^N I_{G_j}^*} = \sum_{j=1}^N \left(\frac{I_{G_j}^*}{\sum_{j=1}^N I_{G_j}^*} \right) V_{G_j} \quad (2.30)$$

3ª PROPRIEDADE

A admitância Y_j do circuito REI é o negativo da admitância da carga S_j , quando $V_0 = 0$.

A primeira propriedade garante que o sistema aumentado do circuito REI reproduz as mesmas condições do sistema original para o caso básico considerado.

A segunda propriedade diz que a tensão do nó REI tende para a tensão do gerador que fornece a maior potência.

Da terceira propriedade, resulta que as novas malhas criadas pelo nó 0 são de impedância elevada, funcionando como divisores de potência entre o nó comum 0 e o circuito original.

2.6.2 - Fase de Redução

Uma vez obtido e anexado o circuito REI, o sistema externo é reduzido até a fronteira. O nó passivo 0 do circuito REI, quando eliminado, afeta sobremaneira a esparsidade do equivalente. A figura 2.6 mostra o sistema reduzido.

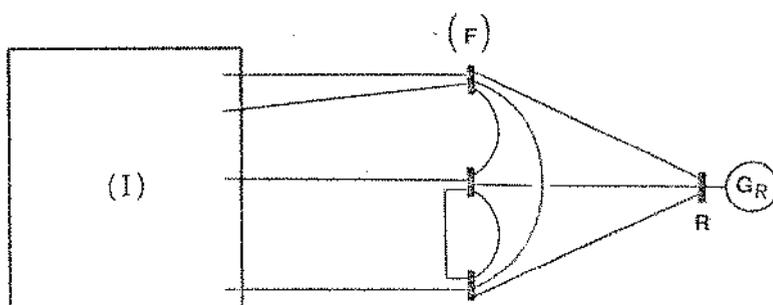


Fig. 2.6 - Equivalente REI.

2.6.3 - Discussão do Equivalente REI

O maior atrativo do equivalente REI é a característica de agregação. Essa propriedade permite, por exemplo, representar as barras de geração externa através de uma barra de geração equivalente. Pode-se adotar outros critérios de agregação como: coerência de geradores para análise dinâmica; grupos de geradores da mesma área ou empresa, para estudos de operação interligada; grupos de geradores semelhantes, para estudos de planejamento, etc. Pode-se também representar grupos de cargas através de equivalentes REI. Nestes casos, o nó REI será uma barra de carga. A retenção do nó R permite simular com certa facilidade a reação dos geradores/cargas externos às perturbações no sistema interno. Esta é uma vantagem sobre os equivalentes Ward, que não retêm as características dos geradores externos.

Existem, no entanto, várias dificuldades para se utilizar o REI como equivalente em tempo real:

- o circuito REI depende do ponto de operação, e portanto necessita de atualização da mesma forma que o JR.
- a agregação de barras externas através do nó intermediário θ cria novas malhas, que podem prejudicar a reação para fluxos de potência ativa. Este problema foi detectado quando se representou as barras externas de carga do sistema Sudeste brasileiro através de um circuito REI.
- a criação de novas ligações através do circuito REI torna o sistema externo mais interligado. Como consequência, a esparsidade das matrizes vai-se deteriorando rapidamente durante a redução.
- as relações X/R das ligações do circuito REI podem assumir os mais variados valores, positivos ou negativos, dependendo da potência e da tensão da barra (equação 2.27). Estas relações, quando são transferidas para o circuito reduzido, podem criar problemas de convergência para o fluxo de carga desacoplado rápido. No apêndice A são discutidas formas de resolver esses problemas.

Recentemente [35], foram definidas as condições necessárias para que as reações do equivalente REI em torno do ponto de operação básico sejam corretas. São duas:

- i - um grupo de barras PQ é representado por equivalente REI. Para que o circuito reduzido seja exato, as tensões das barras PQ originárias devem estar em fase e as variações dessas tensões devem ser iguais;
- ii - um grupo de barras PV é representado por um equivalente REI. Para que o circuito reduzido seja exato, os geradores das barras originais devem operar com o mesmo fator de potência.

Estas condições podem ser utilizadas como critérios de agregação das barras externas. A dificuldade, no entanto, consiste em compatibilizar diferentes critérios como: agregação segundo a coerência ou área, agregação para favorecer a esparsidade, simplificação do modelo e precisão dos resultados.

Para contornar o problema de atualização do equivalente, foi proposta uma rede de calibração para ser conectada às barras de fronteira [32]. Essa rede, construída nos moldes do circuito REI, injeta na fronteira a potência necessária para reproduzir o estado básico, fornecido pelo estimador. A eficácia desse método pode ser questionada [39].

2.7 - Equivalentes com Parâmetros Identificados

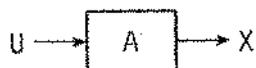
Os equivalentes obtidos por redução do circuito (WI, WY, REI), ou de matriz de sensibilidade (JR, JD), pressupõem disponíveis informações sobre o sistema externo. Sob esse aspecto, os equivalentes podem ser:

- i - totalmente dependentes, quando utilizam dados topológicos e operacionais;
- ii - parcialmente dependentes, quando utilizam apenas dados topológicos;
- iii - independentes, quando não utilizam informações explícitas acerca do sistema externo.

Enquanto que os primeiros são modelos típicos usados em planejamento, os últimos são modelos adequados para o controle em tempo real. No meio termo encontram-se os equivalentes que são dependentes de dados topológicos (ex.: JD).

Os equivalentes com parâmetros identificados são do terceiro tipo, obtidos através de observações feitas na fronteira.

A identificação de parâmetros de um equivalente pode ser colocado como um problema de determinação de modelo para um processo com entradas e saídas conhecidas. Seja um sistema linear de n equações com n vetores independentes de entrada e saída conhecidos:



$$X = AU \quad (2.31)$$

onde

$U = \underline{U}_1, \underline{U}_2, \dots, \underline{U}_n$ os n vetores de entrada;

$X = \underline{X}_1, \underline{X}_2, \dots, \underline{X}_n$ os n vetores de saída correspondentes;

A - a matriz $n \times n$ de parâmetros a determinar.

Sendo definida a matriz U^{-1} , os parâmetros são dados por:

$$A = XU^{-1} \quad (2.32)$$

O modelo resultante depende da escolha das variáveis de entrada e saída. No caso de equivalentes utiliza-se normalmente o estado e as injeções na fronteira. A tabela 2.1 mostra alguns modelos que podem ser obtidos:

TABELA 2.1 - Modelos obtidos por identificação

ENTRADA (U)	SÁIDA (X)	MODELO (A)
\underline{V}_F	\underline{I}_F	Y_{eq}
$\underline{\theta}_F$	\underline{P}_F	B_{eq}
$\underline{\Delta\theta}_F$	$\left(\frac{\Delta P_F}{ V_F } \right)$	B'_{eq}
$\underline{\Delta V_F }$	$\left(\frac{\Delta Q_F}{ V_F } \right)$	B''_{eq}

Esse método de obtenção direta do modelo apresenta sérios inconvenientes:

- i - necessita de reinversão da matriz cheia $U_{n \times n}$ para levar em conta um novo vetor de entrada;
- ii - não explora a redundância quando são disponíveis mais de n vetores independentes de entrada;
- iii - está sujeito a mau condicionamento de U para vetores de entrada semelhantes.

Os dois primeiros problemas podem ser resolvidos através de processos recorrentes de identificação, baseados no filtro de Kalman. De acordo com esse método, partindo-se de uma matriz $A_{n \times n}^0$ definida positiva, obtém-se a matriz $A_{n \times n}^m$, após o processamento de m vetores correspondentes de entrada e saída. A utilização do lema de inversão durante o processo elimina a necessidade de inversão direta da matriz [19]. A formulação recorrente permite considerar o efeito redundante ($m > n$), através da minimização dos erros quadráticos gerados pelo modelo para cada novo par de vetores processados.

Os problemas de mau condicionamento, as mudanças de topologia durante o processo e a grande quantidade de cálculos envolvidos, desestimulam a utilização do método. O efeito da mudança do sistema externo é interpretado inicialmente como erro, que passa a ser incorporado ao modelo através do processamento de novos vetores de entrada e saída. Isto, segundo Denzel [31], torna a identificação não confiável, devido à lentidão com que as mudanças são absorvidas.

Apesar disso, vários métodos de identificação já foram propostos. Existem modelos determinísticos [19], estocásticos [31], baseados em variações normais de operação do sistema; outros buscam a identificação através das variações decorrentes de contingências ocasionais ou provocadas para esse fim [15,20,29]. Enquanto os primeiros estão sujeitos a maus condicionamentos por falta de variação do estado, os últimos atualizam o equivalente quando justamente se necessita dele para controlar o sistema.

CAPÍTULO 3 - FLUXO DE CARGA NO ESTUDO DE EQUIVALENTES

3.1 - Introdução

Neste capítulo, as reações do sistema externo são analisadas através de um fluxo de carga modificado, que permite introduzir aproximações tanto na configuração, como nas injeções externas. O objetivo é investigar, de forma sistematizada, a influência de cada componente externo nas reações do sistema. Dessa forma, pode-se observar o efeito da representação aproximada de cargas e gerações externas; de mudanças da configuração externa sobre o sistema interno; ou ainda, da eliminação de barras PQ ou PV externas [38,42].

Nas análises que se seguem, consideram-se especialmente as aplicações, definidas no capítulo 1, como Modo 2. Foi visto que, nesses casos, são utilizados dados atualizados para o sistema retido e informações aproximadas sobre o sistema externo. Considera-se disponível um mínimo de informações para garantir a convergência de um fluxo de carga convencional. Para isso, a rede deve ser conexa, isto é, não pode haver ilhamentos, e os dados operacionais (tensões, injeções, "tap" de transformadores, etc.) devem ser compatíveis com o sistema que se pretende estudar.

Existem diversas fontes de dados externos que podem ser consultadas pelo centro de controle:

- i - Dados de planejamento, representando previsões a médio ou longo prazos. Constituem, em geral, informações aproximadas, porém consistentes com o sistema.
- ii - Algoritmos de previsão de carga, utilizados no planejamento a curto prazo. Permitem gerar pseudo-medidas no caso de perda temporária de observabilidade de uma parte do sistema.

- iii - Comunicação verbal com outras áreas. Pode-se instituir uma rotina para a troca das informações essenciais, através de chamadas telefônicas, rádio, ou qualquer outro meio.
- iv - Transferência de dados entre os centros vizinhos ou através de um centro comum, no caso de controle multi-área centralizado.

Conforme foi visto no capítulo anterior, a quantidade de dados externos, utilizados pelos equivalentes, não define necessariamente a precisão dos resultados. O que importa é definir a quantidade mínima de dados que ainda permite obter equivalentes precisos e confiáveis. Esse tipo de estudo pode ser feito através do Fluxo de Carga Equivalente (FCE).

3.2 - Fluxo de Carga Equivalente

O FCE consiste de um fluxo de carga convencional, adaptado para resolver um sistema, cujos dados estão arranajados da seguinte forma:

- i - para o sistema interno, dados normais atualizados;
- ii - para o sistema externo, dados que representam qualquer situação consistente, mesmo que desatualizada;
- iii - para a fronteira, são calculadas injeções tais que reproduzam o estado atual do sistema interno, nas condições (i) e (ii).

As injeções na fronteira calculadas são as injeções equivalentes, enquanto que o sistema externo está representado por um modelo aproximado. Assim, o próprio FCE pode ser interpretado como um equivalente, no qual as aproximações dependem do grau de conhecimento do sistema externo. Se os dados do sistema externo forem corretos, o FCE reproduzirá o sistema completo.

3.3 - Ajuste do FCE ao Caso Básico

As injeções na fronteira que reproduzem o estado básico no sistema retido, podem ser obtidas da seguinte forma:

- define-se temporariamente as barras de fronteira como barras de folga ("slack"), fixando as tensões do caso básico conhecido.
- resolve-se o fluxo de carga para demais dados, conforme descrito nos itens (i) e (ii) anteriores.
- calculam-se as injeções de potência na fronteira, redefinindo seu tipo original (PQ ou PV).

A partir desse ponto, o FCE está ajustado ao caso básico e pode ser usado, por exemplo, para simular contingências. A reação será tanto mais precisa quanto mais "atualizado" for o sistema externo. A figura 3.1 mostra o modelo correspondente ao FCE.

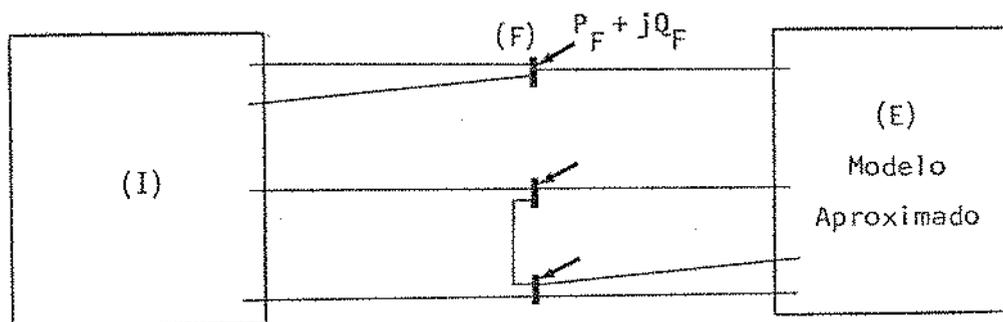


Fig. 3.1 - Representação do FCE.

Nos próximos itens, o FCE é utilizado para testar aproximações no sistema externo. O objetivo é descobrir os componentes essenciais para reproduzir as reações externas.

3.4 - Representação Aproximada das Injeções Externas

Neste teste considera-se a topologia exata, e se introduzem erros nas injeções externas (\underline{S}_E). Para facilitar a simulação, varia-se uniformemente essas injeções através de um fator α :

$$\underline{S}'_E = \alpha \underline{S}_E \quad (3.1)$$

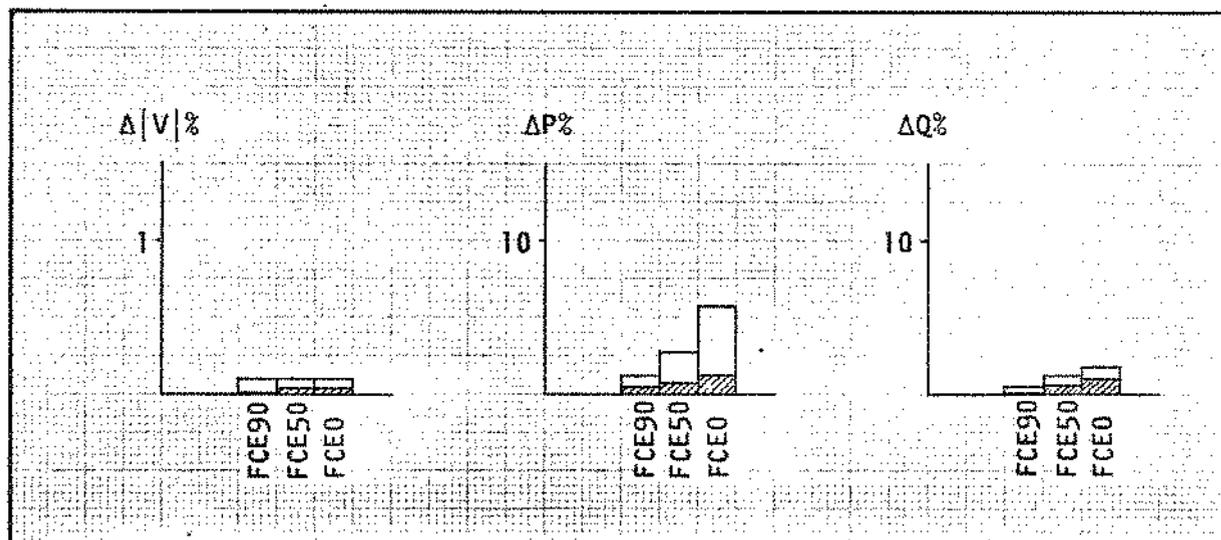
O valor de α é uma indicação do grau de conhecimento sobre as in-

jeções externas, por exemplo:

- conhecimento total, para $\alpha = 1$;
- conhecimento nulo, para $\alpha = 0$;
- conhecimento parcial, para demais valores.

No primeiro caso, o FCE reproduz o sistema completo. No segundo, as injeções externas são consideradas nulas, tornando o sistema passivo. Se $\alpha > 1$, há superestimação das injeções, enquanto que $\alpha < 1$ representa subestimação.

Os histogramas da figura 3.2 representam os erros máximos e médios obtidos para uma série de contingências de linhas internas, para o sistema de teste IEEE118, descritos no apêndice B.



- FCE90 - para $\alpha = 90\%$
 FCE50 - para $\alpha = 50\%$
 FCE0 - para $\alpha = 0\%$

Fig. 3.2 - FCE com erros nas injeções externas.

- Legenda
-  - erro médio
 -  - erro máximo

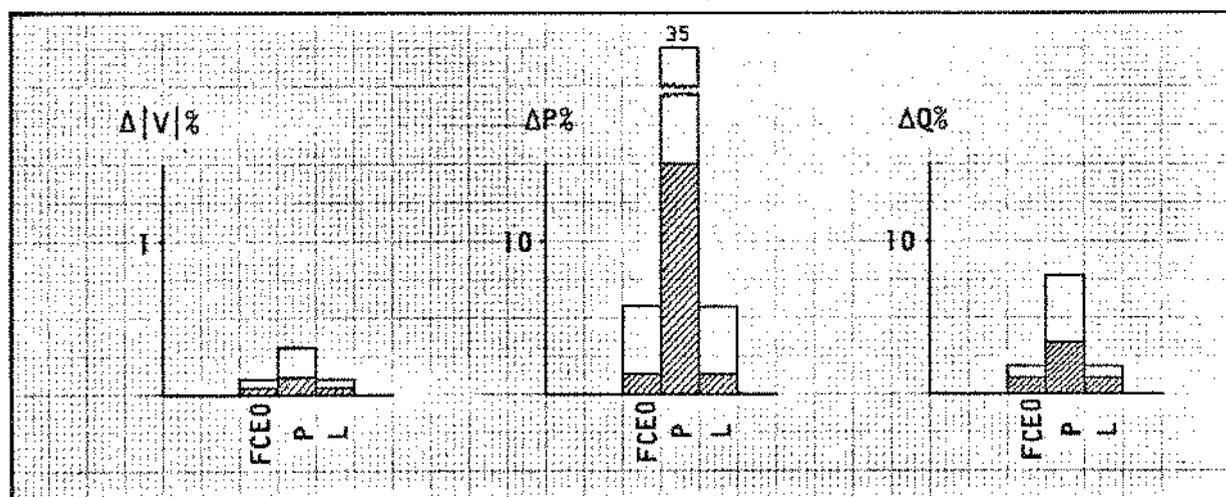
3.4.1 - Conclusões

Um resultado esperado é que os erros aumentam quando as injeções se afastam do valor correto. Verifica-se que as reações de potência ativa são mais afetadas pela ausência das cargas do que as reações de potência reativa. Mesmo assim, é interessante observar o excelente desempenho apresentado pelo modelo FCEO, uma vez que o erro máximo observado é da ordem de 5%. Isto vem comprovar que, do ponto de vista do sistema interno, o ajuste das injeções na fronteira compensa os erros nas injeções externas. Uma vez ajustado o caso básico, as reações externas são determinadas essencialmente pelo circuito externo.

3.5 - Representação Aproximada da Configuração Externa

Para comprovar a importância do circuito externo, introduzem-se erros na configuração, ajustando-se as injeções na fronteira para reproduzir o caso básico. Pode-se eliminar qualquer ligação, desde que não ocorra o ilhamento de partes do sistema. A eliminação de barras será considerada à parte.

Os resultados apresentados na figura 3.3 mostram o efeito de se desprezar uma ligação próxima (P) e longe da fronteira (L). Para evidenciar a influência da localização, escolheu-se ligações P e L semelhantes, isto é, com impedâncias e carregamentos equivalentes.



P - próximo da fronteira

L - longe da fronteira

Fig. 3.3 - FCE com erro de configuração externa.

3.5.1 - Conclusões

Observa-se que os erros de reação para ligações distantes são insignificantes. As principais razões para isso são:

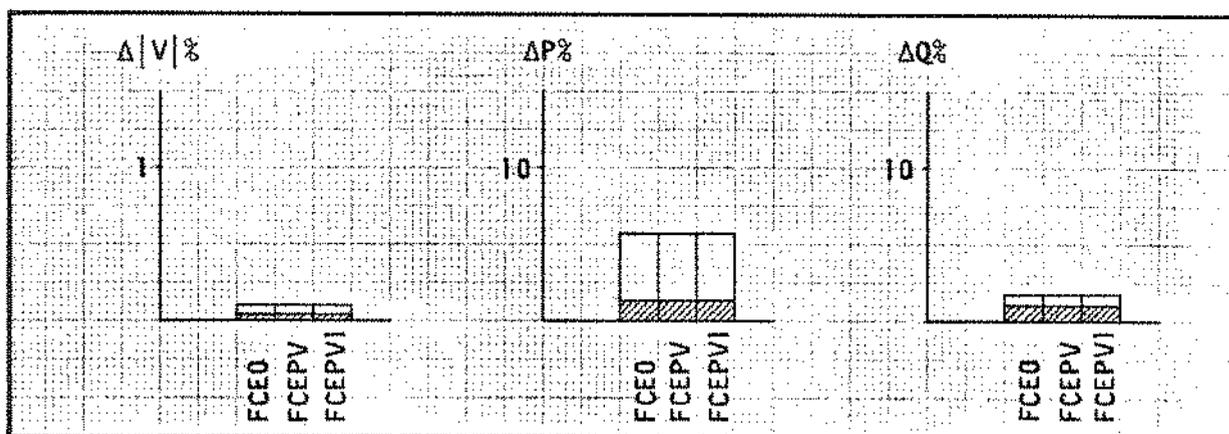
- as ligações vizinhas à fronteira são mais solicitadas pelas contingências internas;
- as barras PV externas amortecem os impactos através do controle automático de tensão.

Pode-se observar também que a não representação de uma linha próxima da fronteira pode causar erros maiores do que supor as injeções externas nulas. Confirma-se assim a importância da atualização da configuração do sistema externo. Uma outra observação interessante é que os fluxos de potência ativa são influenciados muito mais do que os fluxos de potência reativa.

3.6 - Efeito da Eliminação de Barras Externas

3.6.1 - Eliminação de Barras PQ

Uma outra forma de aproximação da configuração externa consiste em eliminar barras PQ ou PV. Na figura 3.4 é mostrado o resultado de se eliminar todas as barras PQ externas. Neste caso, o ajuste do FCE ao caso básico corresponde à transferência das cargas eliminadas para a fronteira.



FCEO - fluxo de carga equivalente com $\alpha = 0$.

FCEPV - fluxo de carga equivalente, retendo barras PV.

FCEPVI - idem FCEPV, porém fixando as tensões em 1 pu.

Fig. 3.4 - FCE com eliminação das barras PQ externas.

3.6.2 - Conclusões

Observa-se que a eliminação das barras PQ externas praticamente não introduz erros adicionais ao FCE0 [38]. A precisão dos resultados indica que a eliminação de barras não altera significativamente os caminhos elétricos vistos pelo sistema interno. A retenção das barras PV externas no FCE pode ser uma boa opção como equivalente. O único inconveniente é o aumento significativo do sistema retido, quando houver muitas barras PV. Em contrapartida, pode-se simular com certa facilidade a participação dessas barras nas contingências de carga/geração. A atualização dos dados relativos às barras PV retidas não é essencial, uma vez que supor as tensões corretas ou iguais a 1 pu, pouco altera os resultados.

3.6.3 - Eliminação de Barras PV

Na figura 3.5 é mostrado o efeito de se eliminar também as barras PV externas. Obtém-se, assim, um equivalente tipo Ward, com injeções ajustadas na fronteira.

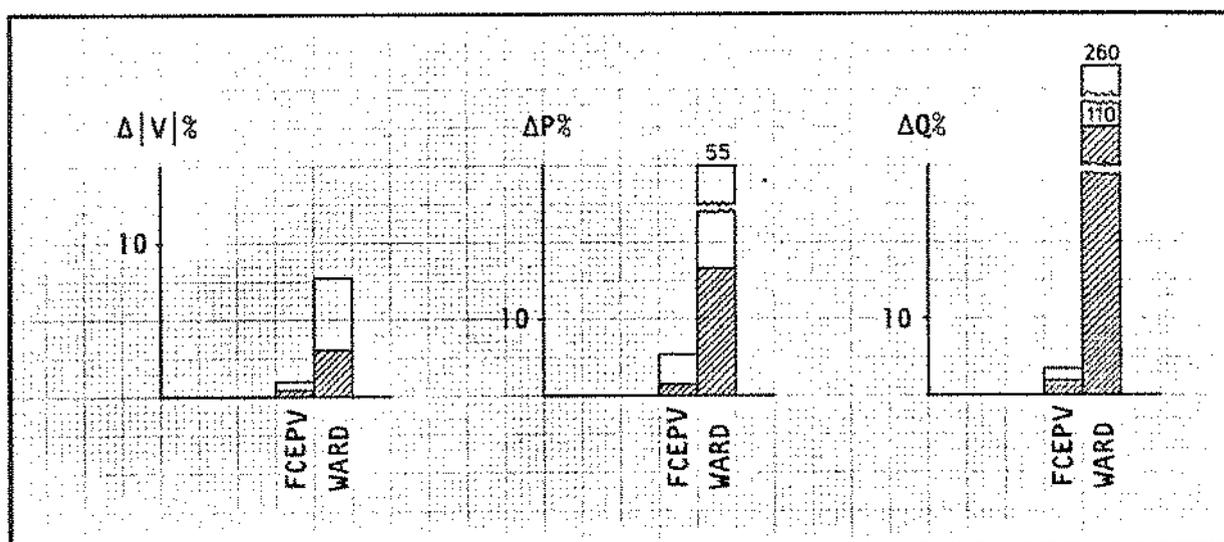


Fig. 3.5 - FCE com eliminação externa total.

3.6.4 - Conclusões

Ocorrem erros de 50% de fluxos de potência ativa e mais de 200% de potência reativa. Estes resultados parecem indicar que as barras PV não devem ser eliminadas. No entanto, diversos fatores concorreram para acentuar os erros

depois da eliminação das barras PV. As principais causas são:

- i - no exemplo testado, metade das barras externas são PV, o que é uma situação pouco comum.
- ii - no sistema externo existem muitos elementos "shunt", cuja redução gera problemas, como será visto no próximo item.

3.7 - Efeito de Reduzir as Admitâncias "Shunt"

Os elementos para "terra" em um sistema de transmissão representam o efeito capacitivo de linhas ou cabos, relações de transformadores fora do nominal, ou bancos de capacitores (reatores) das subestações. A presença destes últimos "geradores e consumidores" de reativos é justificada para melhorar o perfil de tensão e aumentar a estabilidade estática do sistema. Sua localização e dimensionamento dependem basicamente da carga solicitada. Quando a carga é variável, esses componentes reativos podem introduzir sérios problemas para a operação, resolvidos muitas vezes através do controle automático. Em vista disso, torna-se necessário verificar o que ocorre quando se reduz um sistema contendo elementos "shunt", uma vez que as cargas externas são transferidas para a fronteira.

A figura 3.6 mostra os erros de reação para o modelo Ward, obtido com e sem as ligações "shunt". No caso "COM", aparecem elementos "shunt" equivalentes na fronteira e no caso "SEM" não; seu efeito é incluído nas injeções equivalentes.

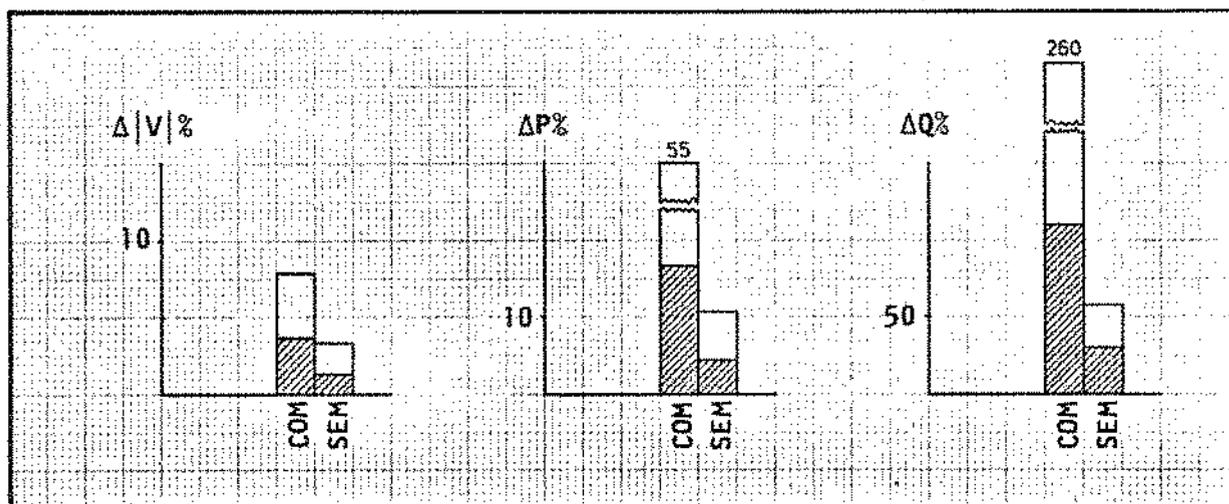


Fig. 3.6 - Modelo Ward com e sem "shunt" externo.

Deve ser ressaltado que foi necessário modificar a representação das ligações "shunt" na matriz B" da referência 12, a fim de se obter convergência com o fluxo de carga desacoplado. As modificações, bem como as justificativas, são apresentadas no apêndice A.

3.7.1 - Conclusões

As reações do modelo Ward sem "shunts" são significantivamente melhores [36]. Para explicar esse fato, deve-se considerar as seguintes causas:

- i - o efeito dos elementos "shunt" é essencialmente local e dependente das condições da carga. Como a redução é feita no circuito passivo (sem cargas), deve-se desligar também os elementos "shunt", evitando que participem do processo. Dessa forma, se estará tratando os elementos "shunt" como cargas convencionais.
- ii - as barras PV filtram o efeito "shunt", contribuindo para limitar o seu alcance. Incrementalmente, uma barra PV se comporta como um curto-circuito em relação à injeção de reativos. Isto corresponde a uma admitância "shunt" infinita na barra. Em consequência, o efeito "shunt" de outras barras é absorvido totalmente pelas barras PV. Durante a redução convencional, não se faz distinção para o tipo da barra que é eliminado e, portanto, não se verifica esse processo de filtragem.
- iii - o processo de redução funciona como amplificador das admitâncias "shunt" capacitivas. Este fato pode acarretar dois problemas sérios:
 1. as ligações série são afetadas, gerando erros de reação, inclusive para potência ativa;
 2. as admitâncias "shunt" equivalentes provocam reações contrárias às desejadas, devido aos seus valores anormais.

No exemplo apresentado (figura 3.6), ocorrem os dois casos. Para

melhor exemplificar, considere-se a redução do circuito da figura 3.7a.

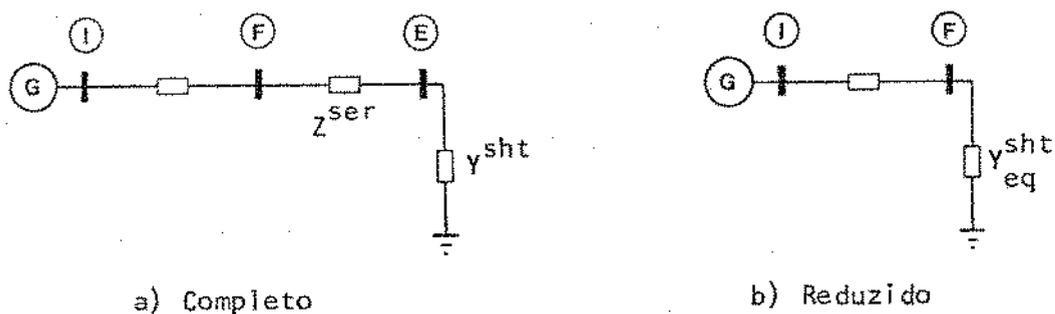


Fig. 3.7 - Redução de elemento "shunt".

Com a redução da barra (E) resulta:

$$Y_{eq}^{sht} = \frac{Y^{sht}}{1 + Y^{sht} Z^{ser}} \quad (3.2)$$

Desprezando-se as partes reais de Y^{sht} e Z^{ser} , obtêm-se:

$$B_{eq}^{sht} = \left(\frac{1}{1 - B^{sht} X^{ser}} \right) B^{sht} \triangleq \gamma B^{sht} \quad (3.3)$$

O coeficiente γ , em função de B^{sht} é dado pela figura 3.8.

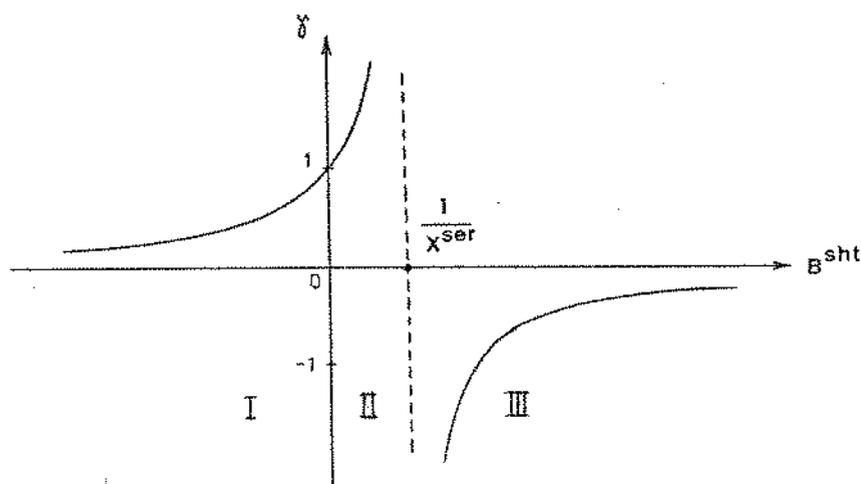


Fig. 3.8 - Situação de ressonância.

Pela curva, observa-se que existe uma descontinuidade em $B_{eq}^{sh} = \frac{1}{X_{ser}}$. Nesse ponto ocorre a condição de ressonância entre o elemento "shunt" e a ligação série, resultando um curto aparente entre a barra (F) e a terra. Essa condição normalmente não acontece num sistema de potência, porque a admitância capacitiva para terra é muito menor que a admitância série de uma linha. Isto significa que os elementos "shunt" convencionais se encontram, na figura 3.8, em torno de zero (reatores na região I, e capacitâncias na região II). Na redução de elementos capacitivos, verifica-se que $\gamma > 1$, ocasionando a ampliação do efeito "shunt". A eliminação consecutiva de muitas barras com elementos capacitivos pode gerar admitâncias B_{eq}^{sh} grandes, com valores na região III. Nesta região, γ é negativo, indicando que o comportamento do elemento "shunt" muda, tornando-se indutivo. A figura 3.9 ilustra os diferentes casos.

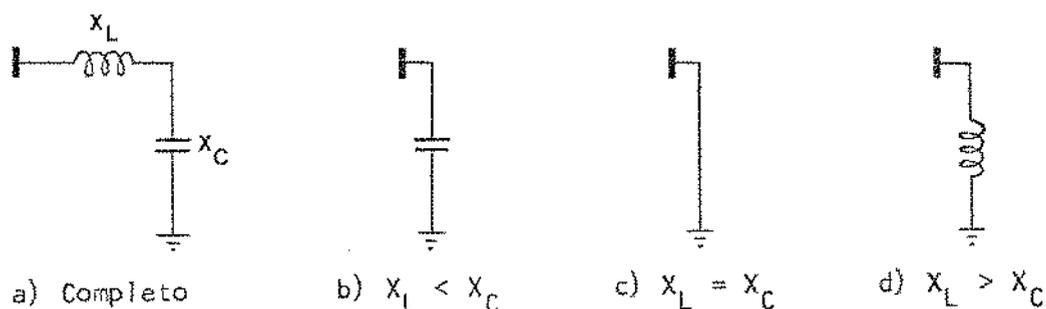


Fig. 3.9 - Efeito "shunt" equivalente.

Para verificar a influência da redução de um elemento "shunt" sobre as ligações série, basta lembrar que um termo qualquer da matriz Y_{FF} , definida em (2.3a), pode ser escrito como:

$$Y_{mn} = Y_{mn} - \frac{Y_{mk} Y_{kn}}{Y_{kk}} \quad (3.4)$$

O termo da diagonal Y_{kk} contém o elemento "shunt" da barra k e, portanto, afeta a admitância da ligação m-n.

A fim de evitar todos esses problemas, durante a obtenção do circuito reduzido é conveniente desligar os capacitores "shunt", juntamente com as cargas [28].

CAPÍTULO 4 - EQUIVALENTES ESTÁTICOS APLICADOS AO CTR

Uma série de conclusões sobre a representação do sistema externo foram obtidas através do FCE. Neste capítulo são discutidas algumas variantes dos modelos básicos, descritos no capítulo 2, à luz das observações feitas no capítulo precedente, e que podem ser resumidas da seguinte forma:

- a. A representação das injeções externas através de injeções equivalentes, ajustadas para o caso básico, não introduz erros significativos de reação no sistema interno.
- b. Uma vez ajustadas as injeções equivalentes para o caso básico, o desempenho do equivalente depende essencialmente da reação incremental do circuito externo, próximo da fronteira.
- c. As ligações "shunt" não devem participar da redução, para evitar problemas de mau-condicionamento.
- d. A eliminação de barras PV introduz erros significativos de tensão e potência reativa. Incrementalmente, as barras PV externas respondem em conjunto às solicitações da fronteira, independente do nível de tensão em que operam.

4.1 - Obtenção do Equivalente Ward

Inicialmente, define-se um procedimento para se obter circuitos reduzidos aplicáveis ao CTR, e que levam em conta os fatos observados. Para o processo de redução do circuito, considere-se o seguinte procedimento, em quatro etapas:

- a. obtenção da topologia mais atualizada possível do sistema externo e da fronteira;

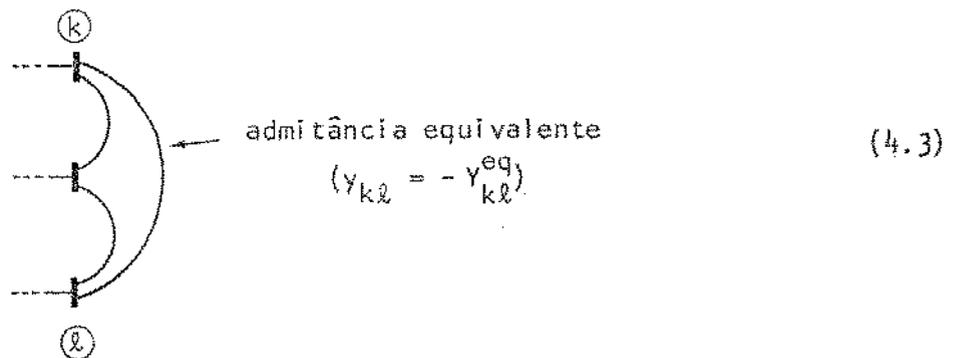
- b. formação da matriz admitância nodal Y' , ignorando-se as ligações "shunt";

$$Y' = \begin{array}{|c|c|} \hline Y'_{EE} & Y'_{EF} \\ \hline Y'_{FE} & Y'_{FF} \\ \hline \end{array} \quad (4.1)$$

- c. Redução das barras externas, por eliminação de Gauss, resultando a matriz reduzida:

$$Y'_{red} = \begin{array}{|c|c|} \hline \text{O} & Y_{FF}^{eq} \\ \hline \end{array} \quad (4.2)$$

- d. Interpretação da matriz Y_{FF}^{eq} através de um circuito equivalente:



O circuito equivalente, assim obtido, representa o circuito série externo, responsável pela circulação de potência ao longo da fronteira, de acordo com o estado imposto ou devido às perturbações introduzidas no sistema interno.

O ajuste do sistema reduzido às condições definidas como caso básico, é feito em duas etapas:

- anexação do circuito reduzido às barras de fronteira;
- cálculo das injeções de potência na fronteira através das equa-

ções (2.10), impondo o estado básico. Isto corresponde a somar algebricamente os fluxos em torno das barras de fronteira.

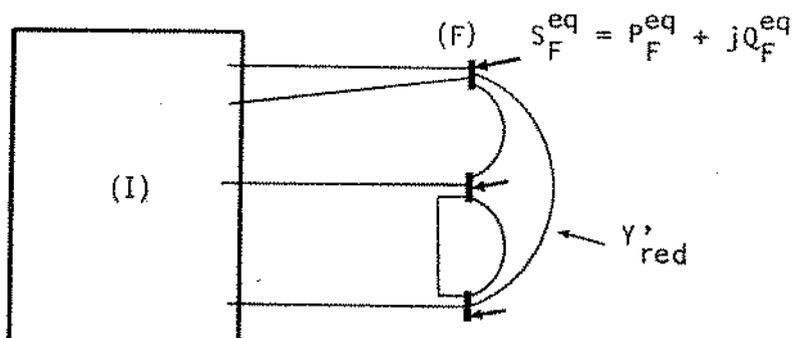


Fig. 4.1 - Equivalente Ward com ajuste na fronteira.

Do processo descrito resulta um equivalente Ward (W) [36], que leva em conta os três primeiros fatores apontados: ajuste das injeções, representação atualizada do circuito série e modelagem das ligações "shunt" através de injeções equivalentes. Resta, ainda, o problema da representação do efeito das barras PV externas. Na figura 4.2, os resultados obtidos com o modelo W são comparados com os do modelo FCEPV, relativos ao exemplo IEEE118, já testado no capítulo anterior.

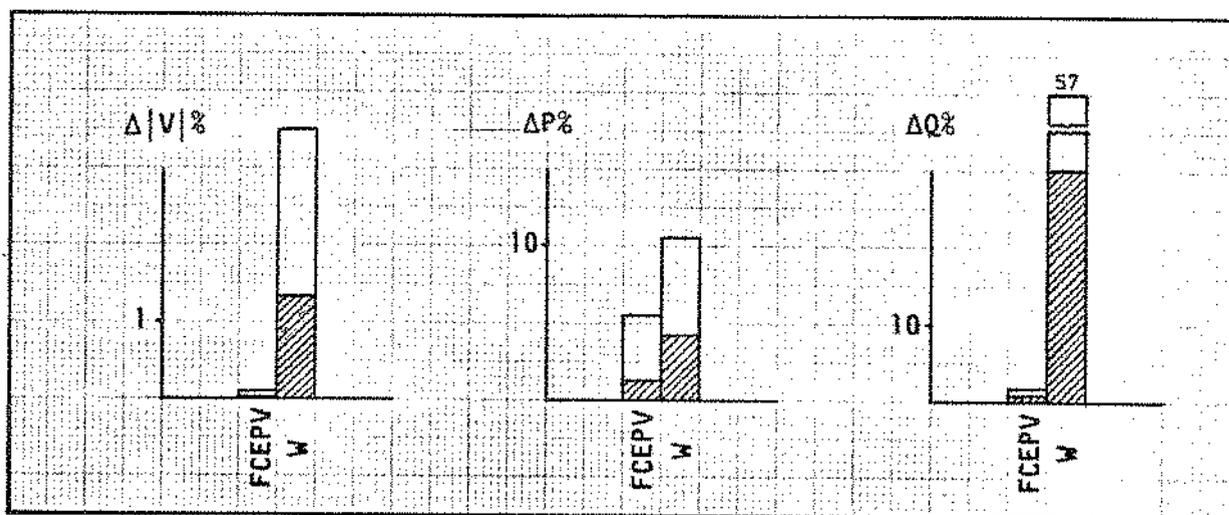


Fig. 4.2 - Comparação do modelo W com FCEPV.

4.1.1 - Conclusões

Pode-se observar erros significativos nas tensões e nos fluxos de potência reativa, evidenciando a falta da reação das barras PV externas. A reação dos fluxos de potência ativa está representada satisfatoriamente pelo circuito equivalente série.

A comparação do modelo W com o FCEPV visa mostrar os dois casos extremos: a eliminação pura e simples vs. a retenção das barras PV externas. Nos próximos itens serão discutidas formas de simular o efeito dessas barras, sem a necessidade de retê-las explicitamente.

4.2 - Modelo Ward Desacoplado (WD) [36,39]

A constatação, através do modelo W, de que a eliminação das barras PV pouco afeta as reações de potência ativa, indica que as reações "ativas" e "reativas" podem ser representadas separadamente. O desacoplamento mais utilizado é representado pelas equações do fluxo de carga desacoplado rápido, já referidas anteriormente como equações (2.21).

As matrizes de sensibilidade B' e B'' , que definem o acoplamento P- θ e Q-V de forma aproximada, têm leis de formação semelhantes à da matriz Y [12], e podem ser utilizadas para reinterpretar B' como um circuito sem perdas, no qual flui a potência ativa, enquanto que B'' fornece um circuito para a potência reativa [24,36,39].

De acordo com as leis de formação, a interpretação dos termos de B' e B'' é a seguinte:

$$B'_{kl} = -\frac{1}{X_{kl}}, \quad X_{kl} = \text{reatância série da ligação k-l} \quad (4.4a)$$

$$B''_{kl} = -\frac{X_{kl}}{R_{kl}^2 + X_{kl}^2}, \quad R_{kl} = \text{resistência série da ligação k-l} \quad (4.4b)$$

$$\frac{1}{2} \sum_{l \in k} B''_{kl} = -B_k^{\text{sht}}, \quad B_k^{\text{sht}} = \text{susceptância "shunt" da barra k} \quad (4.4c)$$

O fator $1/2$ converte o termo de sensibilidade "shunt" em admitância equivalente, conforme mostrado no apêndice A.

As equações correspondentes às barras PV não aparecem em B'' , o que equivale a representar seu efeito incremental através de admitâncias infinitas (curto-circuito) para "terra". Em consequência, as conexões entre as barras PV e o resto do circuito aparecem, em B'' , na forma de ligações para "terra" das barras PQ vizinhas. É dessa forma que o efeito de controle de tensão das barras PV aparece nas barras vizinhas. Como esses "shunts" aparentes provêm de admitâncias séries (indutivas), não ocorrem os problemas de ressonância apontados no capítulo anterior. A figura 4.3 mostra a representação de uma barra PV no modelo desacoplado:

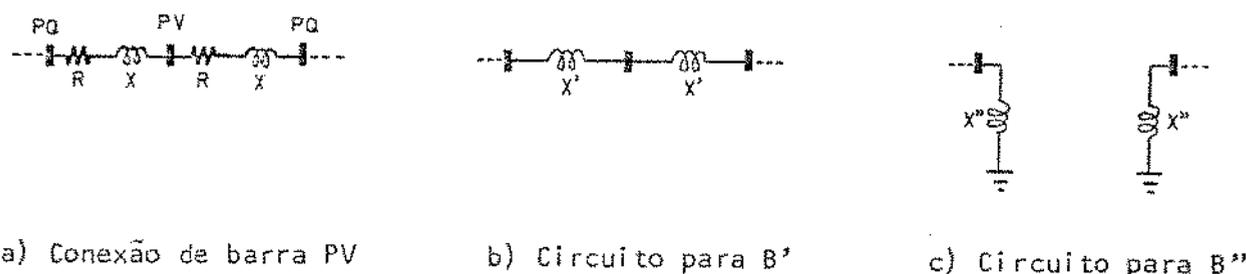


Fig. 4.3 - Circuitos desacoplados para B' e B'' .

Durante a fase de redução, as ligações para "terra" da matriz B'' são refletidas para a fronteira e passam a representar o efeito PV equivalente do sistema externo. A figura 4.4 mostra os modelos desacoplados que são obtidos a partir das matrizes reduzidas B'_{red} e B''_{red} , interpretadas como circuitos equivalentes.

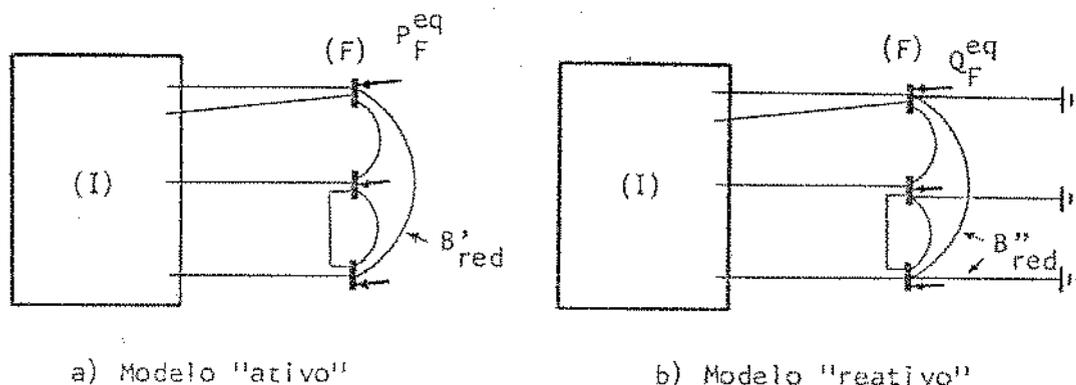


Fig. 4.4 - Equivalente desacoplado WD.

Devido ao "aterramento" aparente das barras PV, os dois circuitos equivalentes, em geral, não possuem a mesma configuração, conforme ilustra a figura 4.3. Para utilizar os modelos desacoplados, calcula-se a injeção equivalente de potência ativa em função do modelo ativo, e de potência reativa em função do circuito reativo, resultando:

$$P_k^{eq} = - |V_k| \sum_{l \in k} |V_l| B'_{kl} \text{sen} \theta_{kl} \quad (4.5a)$$

$$Q_k^{eq} = |V_k| \sum_{l \in k} |V_l| B''_{kl} \text{cos} \theta_{kl} \quad (4.5b)$$

onde B'_{kl} e B''_{kl} são os termos da k -ésima linha das matrizes B'_{red} e B''_{red} , respectivamente, e $|V_k| \exp(j\theta_k)$ o estado atual da barra de fronteira k .

4.2.1 - Modelo Jacobiano Desacoplado (JD)

A diferença básica entre os modelos WD e JD (descrito no capítulo 2) reside na interpretação das matrizes reduzidas. No JD, B'_{red} e B''_{red} não são interpretadas através de circuitos. Em compensação, as injeções equivalentes são monitoradas durante o processo iterativo, de acordo com a reação provocada pelas variações do estado na fronteira. O desempenho dos dois modelos é semelhante, razão pela qual são colocados na figura 4.5 para comparação. O exemplo é o mesmo já apresentado.

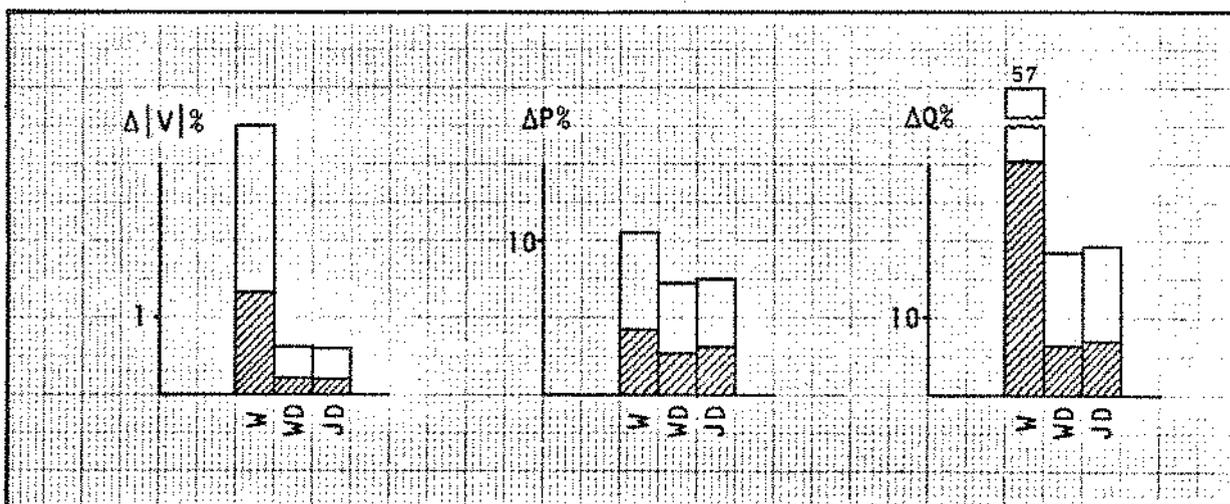


Fig. 4.5 - Comparação dos modelos W, WD e JD.

4.2.2 - Discussão do WD e JD

No modelo WD houve uma melhora sensível dos resultados de tensão e potência reativa, devido à representação do efeito das barras PV externas através de B''_{red} . A pequena melhoria nos fluxos de potência ativa é casual, uma vez que o fato de se desprezar a resistência no modelo ativo pode introduzir erros adicionais. Essa simplificação é válida para sistemas de 230 KV e acima, onde a relação X/R das linhas é alta, conforme indica a tabela 4.1

Tabela 4.1 - Relações X/R típicas

Sistema	Tensão (KV)	X/R
FURNAS	500	18
CESP	440	13
CEMIG	345	10
LIGHT	230	5
CPFL	138	3

Para representar sistemas de baixa e média tensão, não se pode desprezar a resistência das ligações. Outro inconveniente relativo ao WD é a utilização de dois circuitos equivalentes. Necessita-se de mais memória, além das modificações que são introduzidas nos programas convencionais para acomodar os dois circuitos.

O modelo JD tem praticamente o mesmo desempenho do WD. Este último, pelo fato de representar as reações através de circuitos, leva pequena vantagem numérica sobre o JD, que representa as reações externas de forma linearizada.

4.3 - Modelo Ward Estendido (WE)

Com o modelo desacoplado, foi possível obter uma representação do efeito PV equivalente na fronteira, através de ligações "shunt" indutivas, provenientes da redução de B'' . Uma vez que essas ligações para "terra" não interferem com os fluxos de potência ativa, pode-se anexá-las às barras de fronteira do modelo W, resultando o equivalente Ward Estendido (WE) [36,39].

Essa extensão implica em acrescentar ao processo de obtenção do circuito reduzido, descrito em 4.1, mais duas etapas, a saber:

- e. formação e redução da matriz B'' para o sistema externo e fronteira;
- f. obtenção dos elementos "shunt" a partir de B''_{red} :

$$B_k^{sht} = -\frac{1}{2} \sum_{l \in k} (B''_{kl})_{red} \quad k \in F \quad (4.4c)$$

Durante o cálculo das injeções equivalentes, esses elementos "shunt" contribuem apenas para a potência reativa. A figura 4.6 mostra o modelo WE com as ligações PV para "terra".

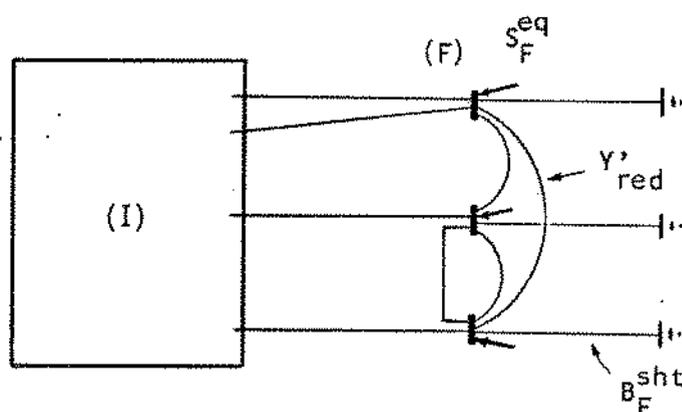


Fig. 4.6 - Modelo WE com ligações PV para "terra".

Na figura 4.7 são comparados os resultados do WE e do FCEPV, para o exemplo teste.

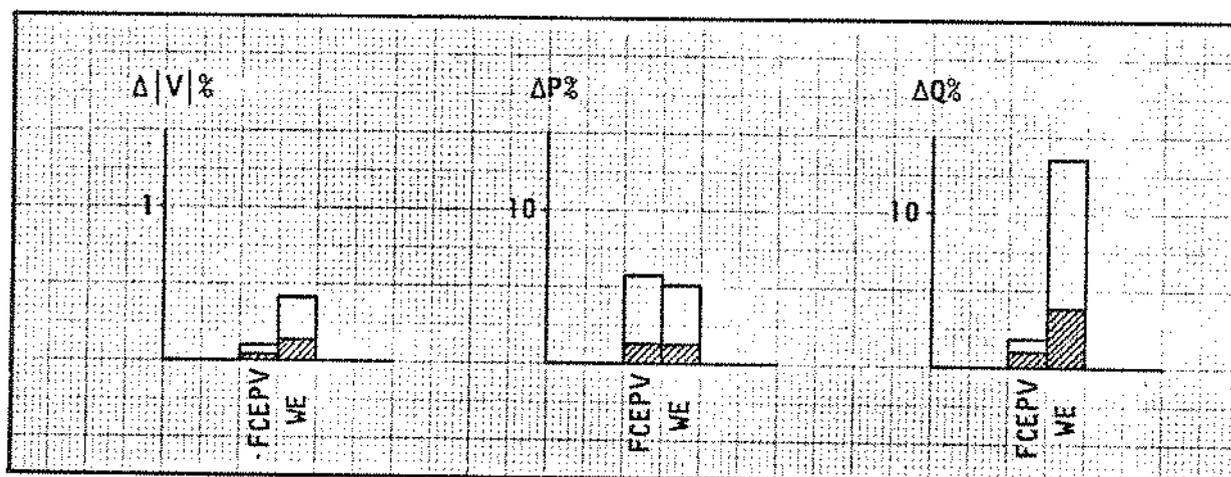


Fig. 4.7 - Comparação WE e FCEPV.

4.3.1 - Discussão do WE

Mesmo para um caso em que a eliminação das barras PV é crítica, obteve-se excelentes resultados com o modelo WE. Os erros de tensão e potência reativa do modelo W foram reduzidos de uma ordem de grandeza no WE, pela anexação das ligações PV equivalentes. A precisão e a simplicidade desse modelo são fatores decisivos na sua aplicação ao controle em tempo real. Devido aos desempenhos semelhantes, apesar de diferentes tratamentos do efeito PV externo, os modelos FCEPV e WE podem ser utilizados de forma complementar: quando é conveniente reter as barras PV, utiliza-se o primeiro; caso contrário, usa-se o modelo reduzido WE.

4.3.2 - Modelo WE com Barras PV-Fictícias [36]

Devido às ligações PV equivalentes para "terra", as injeções equivalentes de reativos podem assumir valores muito grandes. Uma vez que esses valores são calculados em função do estado básico, e o comportamento incremental das ligações "shunt" representa corretamente o efeito PV externo, o modelo é adequado para uso em controle em tempo real. A mudança do ponto de operação pode significar grandes variações nas injeções equivalentes. Esta forte vinculação entre o estado e as injeções equivalentes restringe a utilização do método aos casos em que se conhece o estado na fronteira com boa aproximação. Isto exclui certos estudos, como no planejamento, em que as tensões não são, necessariamente, conhecidas "a priori". Esse problema pode ser contornado pela representação das ligações PV equivalentes, não como elementos "shunt", mas sim como ligações com barras PV-fictícias, ligadas radialmente às barras de fronteira, resultando o modelo mostrado na figura 4.8 [36].

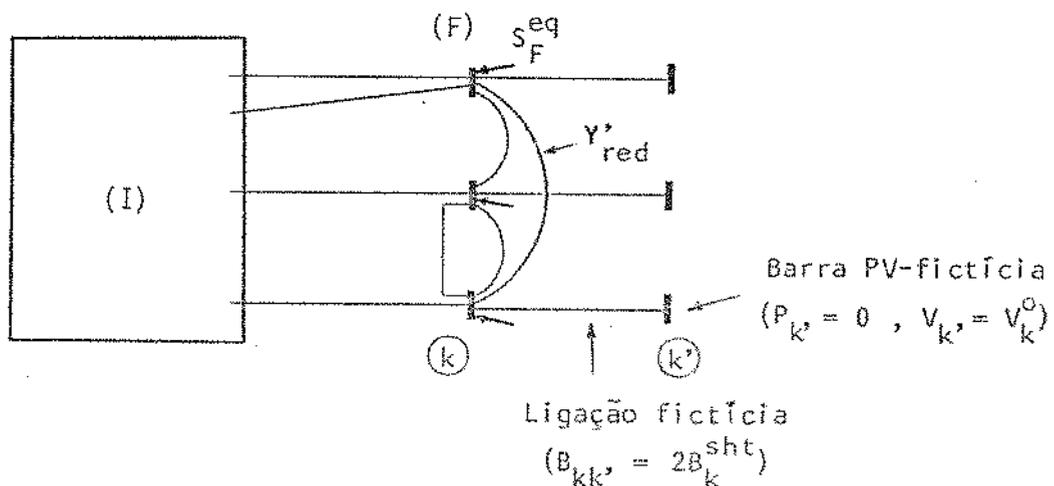


Fig. 4.8 - Versão WE com barras PV-fictícias.

As ligações fictícias são definidas de tal forma que resulte o mesmo efeito incremental das ligações para "terra", ou seja:

$$\frac{\Delta Q_k}{\Delta V_k} = -2 B_k^{shunt} |V_k| \triangleq -(B_{kk'}) |V_k| \quad (4.6)$$

Para que as barras fictícias não interfiram com as injeções de potência no caso básico, impõe-se as condições:

$$\left. \begin{array}{l} P_{k'} = 0 \\ V_{k'} = V_k^o \end{array} \right\} k \in F \quad (4.7)$$

Dessa forma, as barras fictícias apenas se manifestam quando a tensão na fronteira varia. Como as novas ligações são radiais e sem perdas, pode-se calcular o incremento de injeção reativa sem criar as barras fictícias. O incremento ΔQ_k obtido através de (4.6),

$$\Delta Q_k = -(B_{kk'}) |V_k| (V_k^o - V_k) \quad (4.8)$$

pode ser adicionado à injeção Q_k durante o processo iterativo, simulando o efeito da barra PV-fictícia (k'). Os resultados obtidos com essa versão WE coincidem, praticamente, com aqueles obtidos com a versão para "terra". A vantagem é que não aparecem injeções adicionais no caso básico, como no caso dos "shunts", facilitando a inicialização para um novo caso básico. Em contrapartida, a monitoração das injeções reativas na fronteira exige pequenas alterações no processo iterativo do fluxo de carga.

4.3.3 - Modelo WE com Efeito Cruzado [38]

Nas duas versões WE anteriores, o efeito PV é representado separadamente para cada barra de fronteira. No sistema completo, no entanto, pode existir um efeito cruzado entre as barras de fronteira, pelo fato de não serem solicitadas igualmente no caso de contingências perto da fronteira. A seguir, será deduzida uma versão WE que leva em conta esse efeito cruzado.

No modelo W, as variações de tensão e potência reativa podem ser

relacionadas por:

$$\underline{\left(\frac{\Delta Q_W}{|V_F|}\right)} = \left(B_W''\right) \cdot \underline{\left(\Delta|V_F|\right)} \quad (4.9)$$

onde B_W'' é a matriz B'' , calculada para o circuito equivalente W.

Do modelo desacoplado (WD), foi observado que, levando-se em conta as barras PV externas, a relação correspondente a (4.9) é dada por:

$$\underline{\left(\frac{\Delta Q_F}{|V_F|}\right)} = \left(B_{\text{red}}''\right) \cdot \underline{\left(\Delta|V_F|\right)} \quad (4.10)$$

onde B_{red}'' corresponde à matriz B'' reduzida. Portanto, as reações do modelo W devem ser corrigidas pela diferença:

$$\underline{\left(\frac{\Delta Q_C}{|V_F|}\right)} = \left(B_{\text{red}}'' - B_W''\right) \cdot \underline{\left(\Delta|V_F|\right)} \stackrel{\Delta}{=} \left(\Delta B_F''\right) \cdot \underline{\left(\Delta|V_F|\right)} \quad (4.11)$$

Para suprir essas injeções adicionais, interpreta-se a matriz $\Delta B_F'' = (B_{\text{red}}'' - B_W'')$ através de um circuito equivalente complementar:

$$\Delta B_{k\ell}'' = -\frac{1}{\Delta X_{k\ell}''} \quad \text{para a ligação série } k-\ell \quad (4.12a)$$

$$\frac{1}{2} \sum_{\ell \in k} \Delta B_{k\ell}'' = -B_k^{\text{sh}} \quad \text{para a ligação "shunt" } k \quad (4.12b)$$

O circuito complementar só é utilizado para calcular a potência reativa, resultando um modelo Ward estendido com efeito cruzado (WEC). A figura 4.9 mostra o modelo resultante.

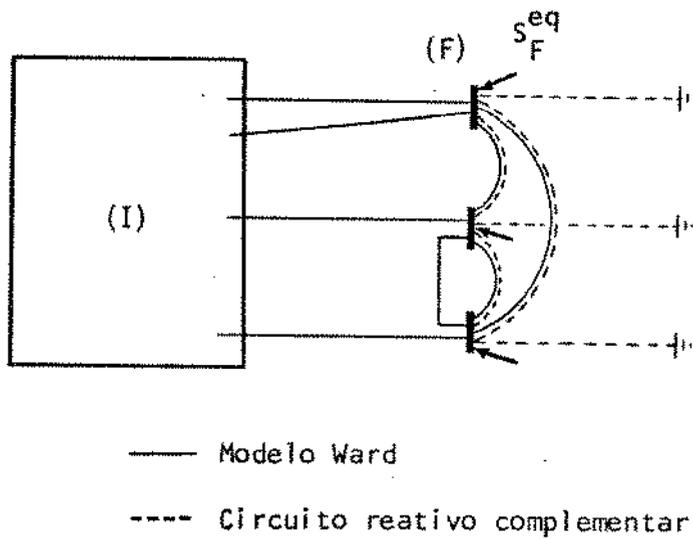


Fig. 4.9 - Modelo WE com efeito cruzado (WEC).

Na figura 4.10 são mostrados os resultados obtidos com esse modelo.

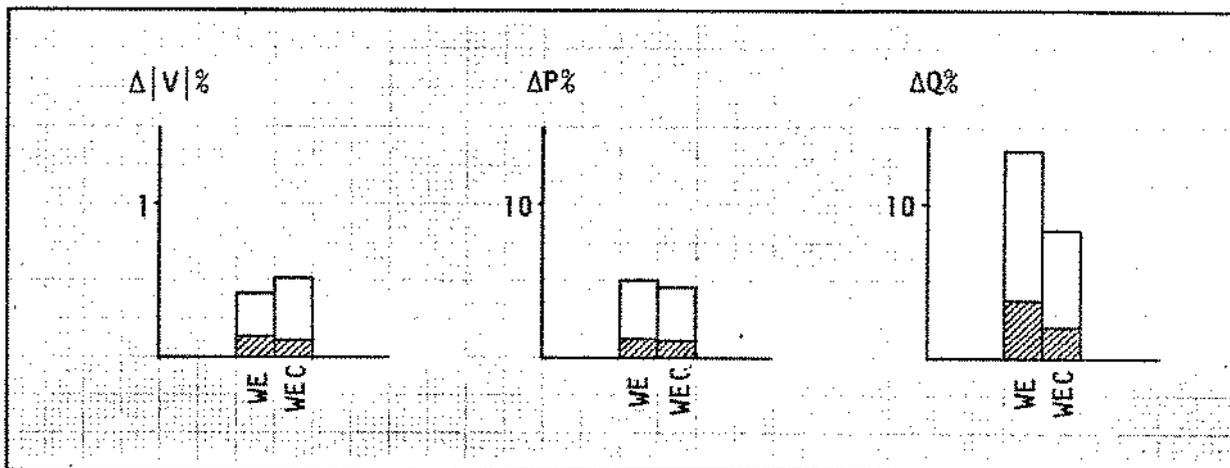


Fig. 4.10 - Comparação entre WE e WEC.

4.3.4 - Discussão do WEC

Os resultados do WEC são ligeiramente melhores do que para o WE. Isto porque, além do efeito PV ser representado através dos elementos "shunt", existe uma compensação reativa cruzada, devido às ligações complementares $\Delta X''$. A representação do circuito série complementar exige a modificação dos programas de fluxo de carga, o que é uma desvantagem. Desprezando-se as ligações complementares série ($\Delta X''$), resulta o próprio modelo WE com ligações PV para "terra". Como se pode observar pelos resultados, essa simplificação afeta pouco a precisão. A

correção cruzada é dada por:

$$\left(\frac{\Delta Q_k}{|V_k|}\right) = \Delta B_{k\ell}'' (\Delta |V_k| - \Delta |V_\ell|) \quad k \in F \quad (4.13)$$

e, portanto, é um efeito de segunda ordem. Quando a ligação entre duas barras de fronteira $k-\ell$ é forte, as tensões correspondentes variam conjuntamente, resultando $(\Delta |V_k| - \Delta |V_\ell|) = 0$. Ao contrário, se a ligação for fraca, tem-se $(\Delta B_{k\ell}'') = 0$. Nos dois casos, o efeito cruzado pode ser ignorado, ficando-se com um modelo simplificado WE.

4.4 - Investigações com Modelos Linearizados

Na figura 4.11 são comparados os modelos Jacobiano Reduzido (JR) e Jacobiano Desacoplado (JD), conforme descritos no capítulo 2, para o exemplo IEEE118.

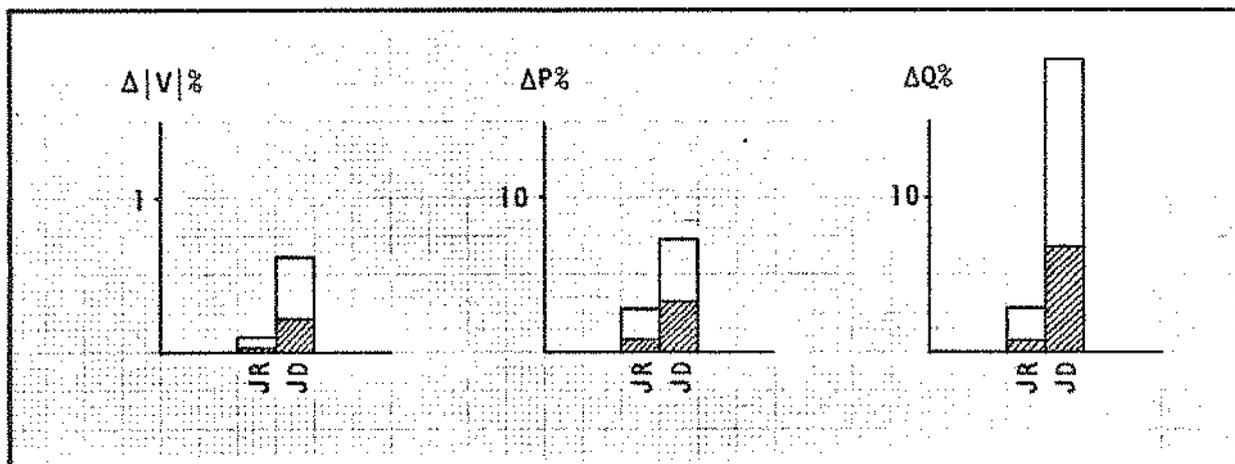


Fig. 4.11 - Comparação dos modelos JR e JD.

O modelo JR é sensivelmente superior ao desacoplado. Como ambos são linearizados em torno de um determinado estado, a precisão decresce à medida que o estado verdadeiro se afasta do estado previsto. Sob esse aspecto, pode-se dizer que os dois modelos correspondem a situações extremas:

- o primeiro (JR) pressupõe o conhecimento exato do estado externo no cálculo do Jacobiano;
- o segundo (JD) admite ignorância total, fazendo as tensões externas iguais a $1 \angle 0^\circ$ pu para obter B' e B''.

Pode-se, no entanto, através do FCE, obter estados intermediários, fazendo-se diferentes aproximações para as injeções externas. É possível, por exemplo, obter as injeções externas através de um algoritmo de previsão de demanda. Mesmo admitindo-se as injeções externas nulas, as tensões externas não serão iguais, devido à circulação de potência pelo sistema externo.

4.4.1 - Modelo Jacobiano Aproximado

O Jacobiano, calculado para esses estados aproximados, pode ser usado para representar o sistema externo. Na figura 4.2 são mostrados os resultados obtidos com dois desses modelos:

J0 - Jacobiano reduzido, baseado no estado resultante das injeções externas nulas [39].

J50 - Jacobiano reduzido, baseado no estado resultante das injeções externas a 50% do valor correto.

Evidentemente, cada modelo foi anexado ao sistema interno atualizado.

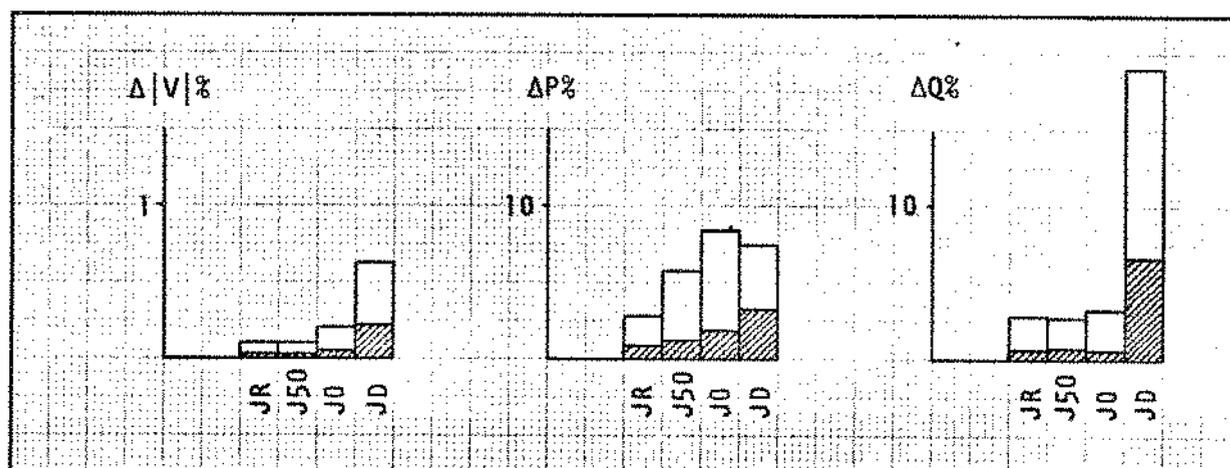


Fig. 4.12 - Comparação de modelos linearizados.

4.4.2 - Discussão do J0 e J50

Como era esperado, os novos modelos apresentam um comportamento intermediário ao JR e JD. Sua obtenção através do FCE não depende de informações atualizadas sobre o sistema externo. Mesmo supor injeções externas nulas é melhor do que fixar o estado em $1 / \theta^0$ pu, como é feito no JD. Os novos modelos utilizam a mesma quantidade de memória que o Jacobiano reduzido. Continuam existindo os problemas de ausência de circuito para representar os modelos, limitando sua utilização aos programas Newton-Raphson. No caso das matrizes B' e B'', foi possível fazer a interpretação por circuito (WD). A interpretação do Jacobiano através de um circuito equivalente apresenta maiores dificuldades, uma vez que os parâmetros da rede são ponderados de forma não-linear pelo seno e cosseno das diferenças angulares das tensões.

4.5 - Investigações com Equivalentes REI

Na figura 4.13 são mostrados os resultados obtidos com três versões REI, para o sistema Sudeste brasileiro:

- REI1 - agrega todas as barras de geração externas em um nó REI-PV; as cargas externas são representadas através de injeções equivalentes na fronteira.
- REI2 - agrega as barras de geração em um nó REI-PV e as barras de carga em um nó REI-PQ.
- REI8 - as barras de geração são agrupadas por área, em 8 barras REI-PV. As cargas são novamente representadas através de injeções equivalentes.

O circuito passivo, incluindo os nós comuns G, foram eliminados, restando-se apenas as barras REI.

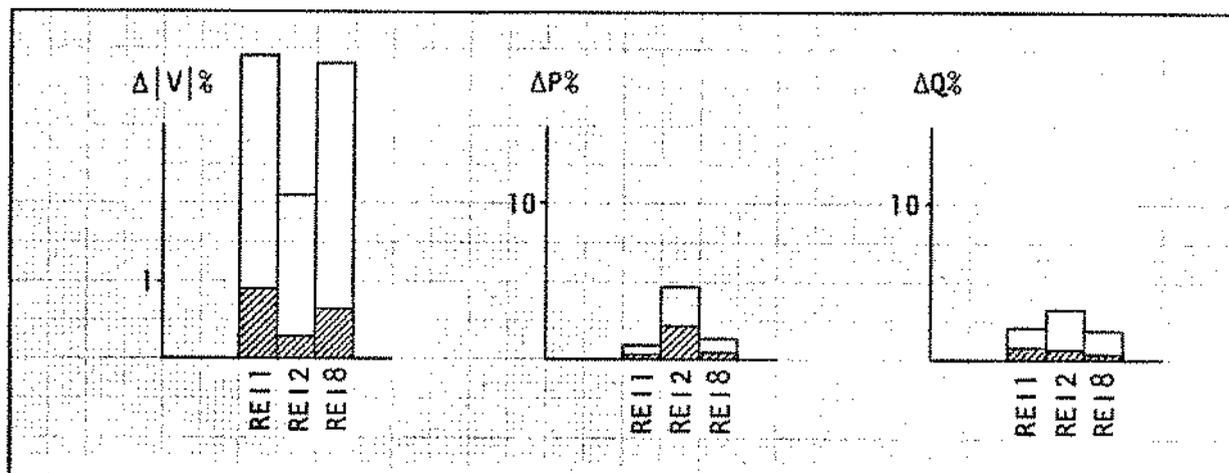


Fig. 4.13 - Comparação de modelos REI.

4.5.1 - Discussão do REI1, REI2 e REI8

De um modo geral, os resultados para esse sistema são satisfatórios. Os maiores erros são de fluxos de potência ativa no REI2. A causa disso é a criação de novos caminhos elétricos pela interligação com o nó REI das cargas. Nesse exemplo, foram agrupadas por volta de 400 barras PQ. Apesar dos caminhos através do nó comum 0 serem de alta impedância (correspondentes a impedâncias das cargas para $V_0 = 0$, conforme equação 2.27), o efeito acumulado das novas malhas torna-se significativo. Nos modelos REI1 e REI8, nos quais as cargas são representadas como injeções equivalentes na fronteira, os erros de reação ativa diminuíram consideravelmente.

À representação de um ou mais nós REI-PV pouco alterou os resultados para potência reativa. A explicação pode ser dada em função dos testes feitos com o FCEPV. Foi visto no capítulo 3 que a reação incremental pouco depende do nível de tensão das barras PV externas, quando se faz o ajuste das injeções na fronteira. Ignorando-se as restrições devido a limites de tensão, as barras PV representam fontes ideais de reativos, e esse efeito pode ser representado através de uma única barra PV.

Se por um lado é conveniente que as malhas introduzidas pelo equivalente REI sejam de alta impedância, por outro lado o circuito resultante se comporta como um divisor de potência cujas características são definidas pelo caso básico para o qual foi calculado. Em conseqüência, as reações do modelo ten

dem a reproduzir a divisão original das potências, o que pode gerar erros locais significativos.

Uma vez que a criação de novos caminhos gera erros de reação e reduz a esparsidade do equivalente, conclui-se que não é conveniente agregar um grande número de barras em cada nó REI. Isto, no entanto, pode resultar na criação de várias barras REI para representar o sistema externo. Por outro lado, com o ajuste de injeções na fronteira, necessita-se apenas das reações incrementais do sistema externo, que é basicamente função da topologia. Assim, as vantagens oferecidas pelo modelo REI (agregação, representação das perdas) não são devidamente exploradas nas aplicações em tempo real. Mesmo o ajuste do modelo REI através de injeções equivalentes constitui uma forma de calibração mais simples do que o circuito auxiliar utilizado no modelo X-REI [32,39].

4.6 - Comparação dos Principais Métodos [40]

Depois de examinar diferentes versões para cada linha de equivalentes, resta comparar os métodos entre si. Como a quantidade de informações utilizadas na obtenção influi na precisão dos resultados, optou-se por comparar os modelos segundo o seu modo de utilização. A classificação utilizada é a seguinte:

Modo I - aplicações "off-line", que utilizam o estado e a configuração exatos: modelos WY, WI, JR e REI.

Modo II - aplicações "on-line", que utilizam apenas a configuração correta: modelos FCE, W, WD, WE, WEC, JD, JO e REI com ajuste.

Nas figuras 4.14 e 4.15 são mostrados os resultados comparativos para os modos I e II, respectivamente. Foram testados quatro sistemas:

- a. IEEE30
- b. IEEE118
- c. SUDESTE VERSÃO I
- d. SUDESTE VERSÃO II

Os sistemas, bem como as condições de teste, são descritos no apêndice B.

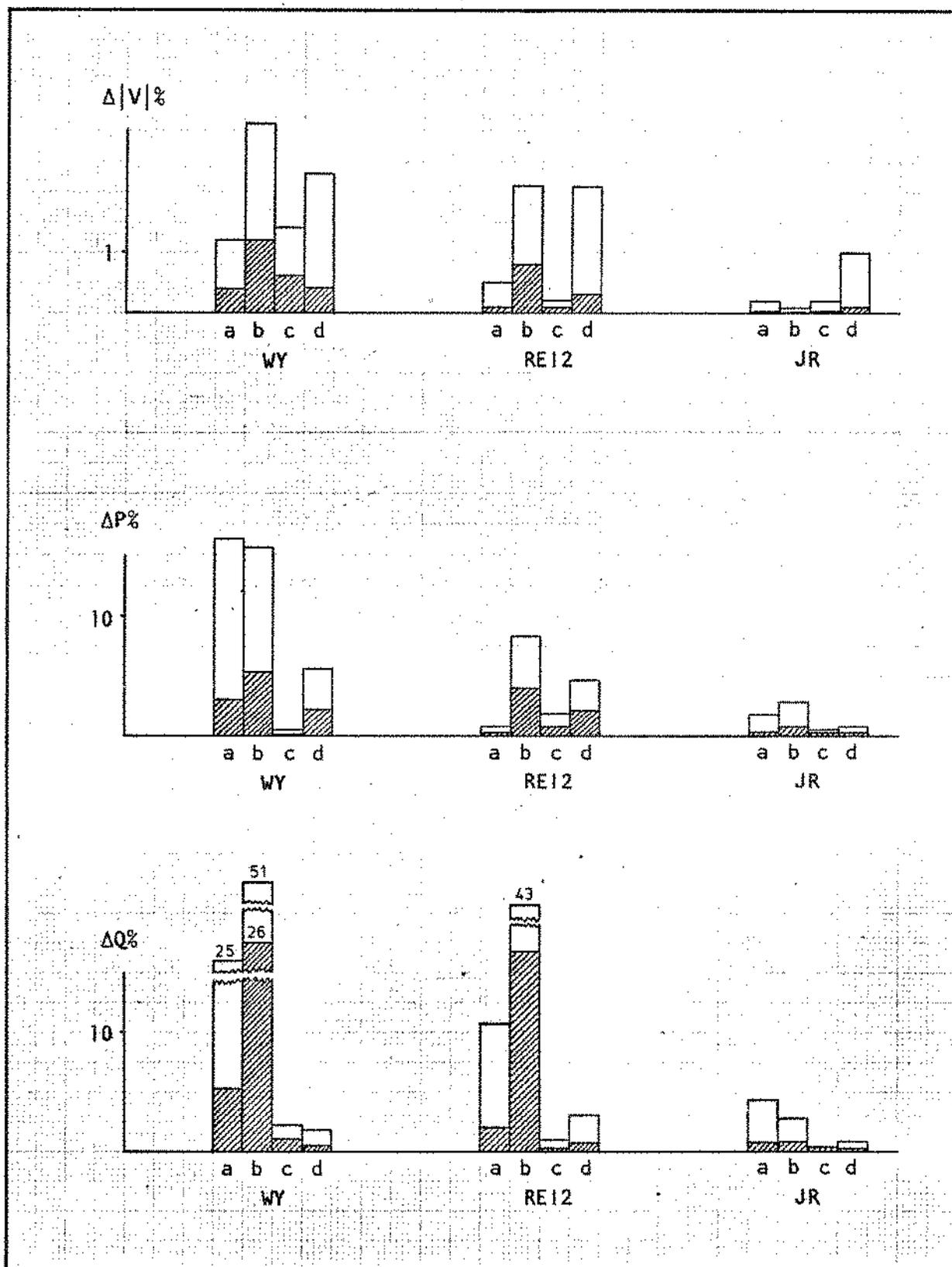


Fig. 4.14 - Comparação de modelos para aplicações "off-line".

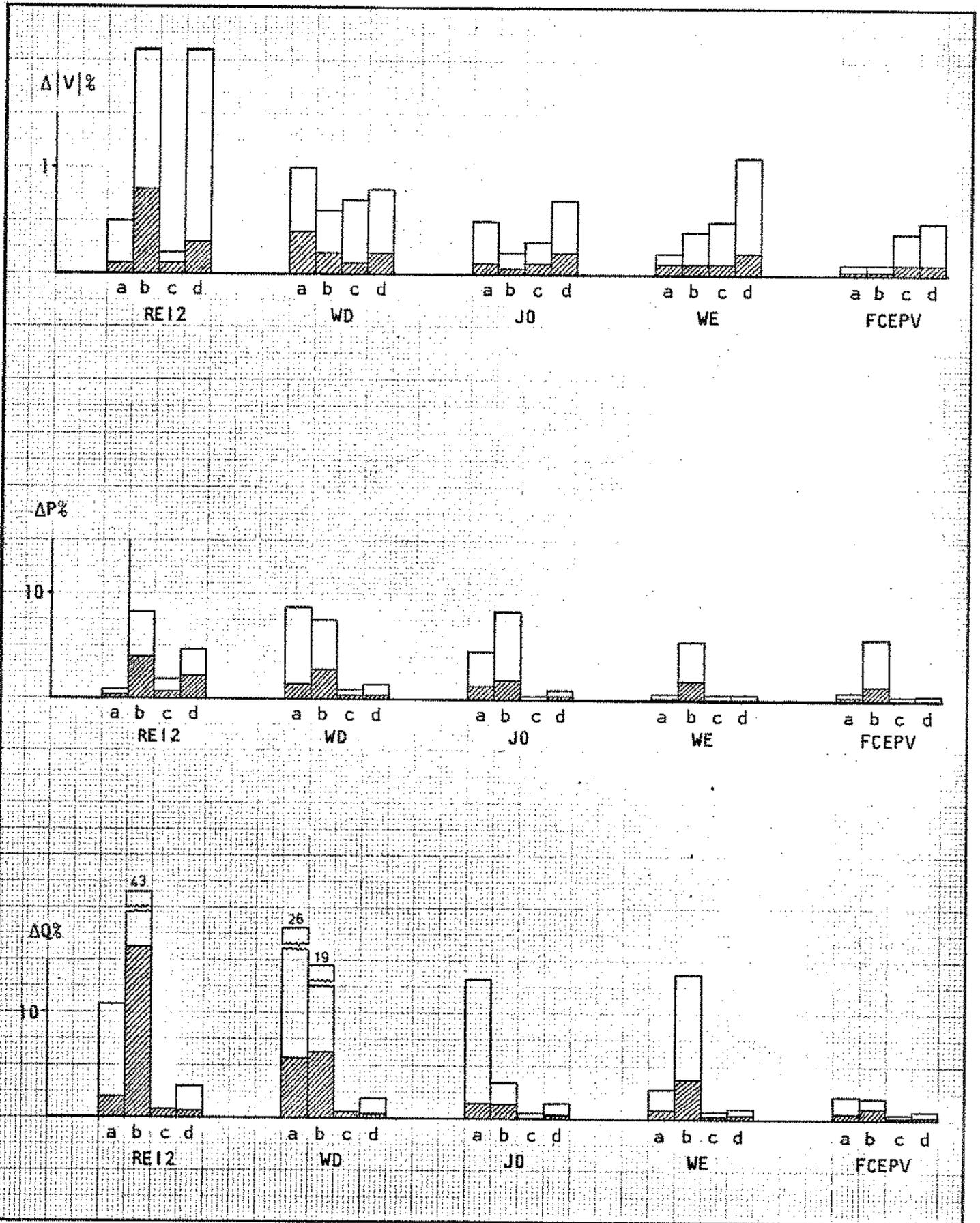


Fig. 4.15 - Comparação de modelos para aplicações "on-line".

4.6.1 - Análise dos Resultados

Em relação à figura 4.14, observa-se que o REI2 é uma versão melhorada do WY com relação à tensão e potência reativa, porém piorada para potência ativa nos sistemas maiores (c,d). A melhoria deve-se à representação do efeito PV externo através da barra REI-PV, enquanto que o aumento dos erros "ativos" é causado pelas novas malhas introduzidas. Os resultados relativos ao JR são bem melhores. Verifica-se inclusive a regularidade do modelo nos diversos exemplos testados.

Com respeito à figura 4.15, observa-se os menores erros para o FCEPV, com resultados semelhantes ao WE, e os piores para o REI2. Através dessa comparação, para diferentes exemplos, fica evidenciado que os modelos FCEPV e WE podem ser utilizados como modelos complementares, não só pela sua maior simplicidade na obtenção e manuseio, como também pelo desempenho superior apresentado por ambos.

CAPÍTULO 5 - TÓPICOS ESPECIAIS

Nos diversos testes realizados, foram obtidas as reações do sistema em torno de um caso básico, suposto conhecido. Neste aspecto, era suficiente que o comportamento incremental do modelo reduzido fosse aproximadamente igual ao do sistema completo.

Além das contingências de linhas e transformadores, existem outros fatores que podem alterar as condições de operação e que precisam ser considerados nos estudos com equivalentes. Por exemplo:

- i - Simulação usando dados de previsão - Nas análises de modo preventivo, só se dispõe de dados previstos e, portanto, aproximados. Outra situação em que não se dispõe de dados atualizados: perda de canal de comunicação com parte do sistema.
- ii - Simulação de contingência de geração ou carga - Neste caso, o ponto de operação também é alterado, através da redistribuição das injeções.
- iii - Erros de configuração externa - Nem sempre se dispõe do modelo reduzido correto. É essencial saber como uma modificação na configuração externa se reflete sobre as reações do equivalente.
- iv - Mudança de "tap" de transformador - De acordo com o tipo de aplicação, a mudança automática de "tap" pode servir para controlar a tensão de uma barra, como o fluxo de potência em uma ligação. A questão que se coloca é: como representar os efeitos desses controles através do equivalente?
- v - Limites de fontes de reativos e dos "tap" de transformadores - A capacidade de controle de um dispositivo em geral é limitado em uma determinada faixa de operação. O efeito des-

ses limites sobre o sistema reduzido é outra questão a ser considerada.

Alguns dos problemas abordados neste capítulo têm solução satisfatória, enquanto que outros exigirão esforços futuros para a sua resolução.

5.1 - Equivalentes Usando Dados de Previsão

A utilização de dados de previsão é usual nos estudos de planejamento. A utilização de equivalentes, nestes casos, não altera o nível de aproximação dos resultados.

No controle em tempo real, os dados são atualizados em períodos menores que uma hora e, portanto, os erros de previsão para instantes intermediários são pequenos, a menos que haja alguma contingência. Pode ocorrer, no entanto, que se perca o canal de comunicação entre o centro de controle e alguma subestação remota. Esta situação de perda parcial de observabilidade deve ser levada em conta, para não comprometer toda a análise de segurança do sistema interno.

5.1.1 - Perda Temporária de Observabilidade

Uma solução possível consiste em continuar realizando as funções de controle, assumindo dados de previsão para a região temporariamente não observável [38,42]. Através de testes, verificou-se que:

- i - Para a região que continua observável, os resultados são pouco sensíveis aos erros introduzidos pela previsão, desde que se utilize ajuste de injeções na nova fronteira. Isto é possível através do uso do fluxo de carga equivalente (FCE).
- ii - Para a região temporariamente não observável, a precisão dos resultados depende do grau de aproximação dos dados gerados através da previsão de demanda. Assim, as perdas de comunicação de curta duração não causam maiores problemas para a análise de segurança. A influência dos erros de previsão de carga já foi verificada através do FCE, no capítulo 3. As conclusões, utilizadas para obter os modelos equivalentes reduzidos,

podem ser aplicadas com o objetivo de representar regiões temporariamente observáveis.

5.2 - Contingências de Geração/Carga

A caracterização do que é uma contingência de geração ou carga não é tão simples quanto a das mudanças na topologia, por diversas razões:

- i - Como as injeções do sistema estão mudando constantemente, devido à variação da demanda diária, torna-se difícil definir até que ponto essas mudanças podem ser consideradas "normais" e depois disso "anormais".
- ii - Devido às constantes de tempo das diversas partes envolvidas na contingência, o sistema responde diferentemente, dependendo das condições pré-contingência e do instante pós-contingência considerado.
- iii - Como nas simulações em geral só se define uma barra de folga ("slack") para absorver as perdas variáveis do sistema, deve-se estipular uma regra de participação para as demais barras do sistema.

Consideraremos, neste contexto, que a perda de pelo menos uma unidade geradora ou de conjuntos de cargas, constituem contingências de geração e carga. A entrada de uma unidade em operação é feita de forma suave e controlada e por isso não é considerada contingência. Na simulação desse tipo de evento, tendo em vista a análise de segurança preventiva, é essencial representar a participação do sistema externo no processo de acomodação para a nova situação. Isto corresponde a testar as reações fora do ponto de operação atual. No que segue, pode-se considerar as contingências de cargas como causadoras de contingências de geração, e portanto resultam nos mesmos processos de simulação.

Para se definir a participação dos geradores, costuma-se dividir o período pós-contingência em quatro intervalos |36,37|:

a) Transitórios elétricos

Durante os primeiros ciclos, a potência elétrica provém da energia armazenada no próprio sistema, em forma de campos eletromagnéticos.

b) Transitórios mecânicos

Como essa energia armazenada é pequena, o sistema mecânico passa a ser solicitado rapidamente, reduzindo a energia cinética armazenada nas massas girantes, basicamente nas turbinas e geradores. Esse período também é de curta duração - menos de 1 segundo - durante o qual os controles ainda não interferem significativamente.

c) Ação dos reguladores de velocidade

Em consequência da perda de energia cinética, a frequência do sistema tende a cair. Isto provoca a reação dos reguladores de velocidade dos geradores, que controlam a entrada de água (ou vapor nas turbinas). Durante esse controle primário, os geradores procuram se acomodar em um novo ponto de equilíbrio, estabilizando a frequência. Essa fase pode durar até alguns minutos, dependendo da intensidade da contingência, do ponto de operação e das características dos reguladores.

d) Controle de geração de área

A estabilização da frequência pode ocorrer fora da faixa tolerável (± 0.5 Hz, por exemplo). Neste caso, torna-se necessário levar o sistema de volta para a frequência básica. Isto é feito através do controle suplementar, ou controle de carga-frequência. Em um sistema interligado, o controle suplementar, além de zerar o erro de frequência, deve corrigir os erros de intercâmbio entre as áreas. Essa função é executada pelo controle de geração de área. Durante essa fase, a área atingida pela contingência deve atuar no sentido de suprir a potência perdida, liberando a participação das outras áreas, através do controle de intercâmbio.

Para se fazer o controle deliberado do sistema, na fase (d), é necessário conhecer a situação em que o sistema estabiliza na fase anterior. Por essa razão, considera-se a fase (c) significativa para a simulação das contingências de geração ou carga [36,37].

5.2.1 - Característica de Regulação de Freqüência (CRF)

A figura 5.1 mostra curvas típicas velocidade-potência de saída para um gerador operando em regime permanente [37].

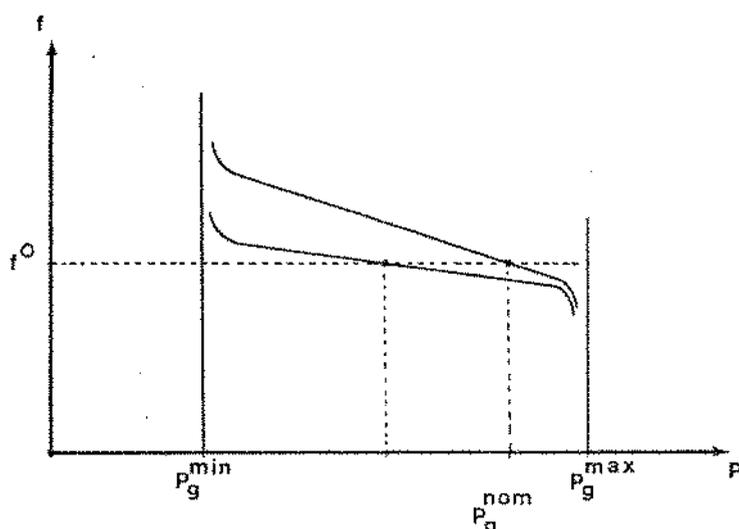


Fig. 5.1 - Características velocidade-potência de saída de gerador em regime permanente.

Na faixa de utilização, a regulação da velocidade ($R_g \triangleq -\frac{\Delta f}{\Delta P_g}$) pode ser considerada linear. A regulação é função do ponto, aumentando com o carregamento do gerador. Para as simulações utiliza-se normalmente a curva correspondente à potência nominal da máquina. Esta simplificação pressupõe que todos os geradores operam a plena carga..

A relação inversa ($1/R_g$) é chamada "característica de regulação de freqüência" (CRF_g) do gerador:

$$CRF_g = - \frac{\partial P_g}{\partial f} \quad | \text{ MW/Hz} | \quad (5.1)$$

Pode-se definir, analogamente, uma CRF para as cargas (CRF_c). A ca

racterística de regulação de freqüência para uma barra genérica (i) é dada pela composição das duas características:

$$CRF_i = CRF_{g_i} + CRF_{c_i} \quad (5.2)$$

A característica de regulação para o sistema todo é dado pela contribuição das NB barras do sistema:

$$CRF_S = \sum_{i=1}^{NB} CRF_i \quad (5.3)$$

Em muitos casos, conhece-se a CRF do sistema, ou de partes do sistema, independente de se saber os valores individuais nas barras. Esses dados podem ser obtidos através da própria operação do sistema. A característica de regulação relativa de uma barra (i) pode ser expressa pela relação:

$$\alpha_i = \frac{CRF_i}{CRF_S} \quad i = 1 \dots NB \quad (5.4)$$

Verifica-se que:

$$\sum_{i=1}^{NB} \alpha_i = 1 \quad (5.5)$$

Se na barra (k) ocorrer a perda de potência P_k , essa potência será rateada entre as demais barras do sistema, segundo as suas características relativas:

$$\Delta P_i = \left(\frac{CRF_i}{CRF_S - CRF_k} \right) P_k \quad i \neq k \quad (5.6)$$

Novamente, verifica-se que:

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^{NB} \Delta P_i = P_k \quad (5.7)$$

A relação (5.6) define, portanto, a participação das diversas barras na contingência da barra (k). Os coeficientes

$$p_i^k = \frac{CRF_i}{CRF_S - CRF_k} \quad i \neq k \quad (5.8)$$

constituem os fatores de participação da barra (i) na contingência da barra (k). Definindo-se o fator de participação da barra (k), onde ocorreu a contingência, como sendo (-1), resulta:

$$\sum_{i=1}^{NB} p_i = 0 \quad (5.9)$$

Esta relação pressupõe que as perdas na rede não mudam após a contingência.

5.2.2 - Critérios de Participação

Através de hipóteses simplificadoras pode-se estabelecer diferentes critérios de participação, dois dos quais são descritos a seguir.

Participação fixa dos geradores

Sendo NG o número de geradores, considerem-se as seguintes condições:

$$a) \quad CRF_S = \sum_{j=1}^{NG} CRF_j \triangleq CRF_G$$

$$b) \quad CRF_k \ll CRF_S$$

A primeira hipótese aplica-se perfeitamente a sistemas com predominância de geração hidroelétrica, como é o sistema brasileiro. Neste caso, a característica de regulação das cargas é desprezível face à capacidade dos hidrogeradores.

A segunda hipótese é válida se a geração for distribuída de forma

que a potência entregue por uma máquina seja muito menor do que a demanda. Até certo ponto, as duas hipóteses são conflitantes entre si.

Com base nas hipóteses acima, pode-se aproximar os fatores de distribuição por:

$$p_j \cong \frac{CRF_j}{CRF_S} \quad j \neq k, \quad j = 1 \dots NG \quad (5.10)$$

$$p_k = -1$$

As relações (5.10) definem fatores de participação fixos para todos os geradores. Em consequência das aproximações, é possível que a soma dos fatores, obtidos através de (5.10), não seja zero. Neste caso, pode-se usar um fator de "correção" para p_j , $j \neq k$, dado por [37]:

$$c = \frac{CRF_S}{CRF_G} \quad (5.11)$$

A vantagem do critério de participação fixa é que facilita a simulação. No entanto, esse critério não leva em conta as limitações do sistema, as unidades de reserva, geradores desligados, proximidade do defeito, etc.

Participação proporcional à reserva girante

Normalmente, cada usina deve ter uma determinada reserva girante, capaz de assumir os eventuais acréscimos da demanda. No caso de uma contingência de geração, a potência solicitada pode ser rapidamente fornecida por essas unidades. Conforme mostrado na figura 5.1, as unidades que estão operando com carga nominal assumem menos potência do que as unidades com pouca carga, devido às diferentes características velocidade x carga. Pode-se, portanto, supor que a energia perdida passa a ser fornecida segundo a CRF das unidades de reserva girante. Os fatores de participação neste caso são dados por:

$$p_j = \frac{CRF_{rj}}{CRF_R} \quad j \neq k, \quad j = 1 \dots NG \quad (5.12)$$

onde $CRF_R \triangleq \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{NG} CRF_{r_j}$ é a característica de regulação de frequência das uni-

dades de reserva. Para se utilizar esse critério, que é um pouco mais realista do que o anterior, é necessário ter informações sobre as condições de operação do sistema, o que nem sempre é conveniente, como, por exemplo, no controle em tempo real.

5.2.3 - Contingência de Geração em Sistemas Reduzidos

Considere-se o modelo linearizado para o caso básico do sistema completo:

$$\underline{P} = B \underline{\theta} \quad (5.13)$$

A perda de geração P_k na barra \textcircled{k} é distribuída pelas NG barras geradoras através do vetor dos fatores de participação \underline{p}_k transposto, ou seja:

$$\underline{\Delta P}_k^T = P_k \underline{p}_k^T = P_k \begin{bmatrix} 0 & p_{g_1} & 0 & \dots & 0 & p_{g_2} & 0 & \dots & 0 & p_{g_k} & 0 & \dots & 0 & p_{g_{NG}} & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

onde

$p_{g_j} \leq 1$ é o fator de participação da barra \textcircled{j} .

$p_{g_k} = -1$ corresponde à unidade perdida.

A solução do sistema:

$$\underline{P} = \underline{P} + \underline{\Delta P}_k = B \underline{\theta} \quad (5.15)$$

fornece o estado pós-contingência $\underline{\theta}$, com as aproximações do modelo DC utilizado.

Quando uma parte do sistema é representado através de equivalentes reduzidos, não se dispõe das barras externas para simular a participação dos geradores na contingência. Apresentam-se duas alternativas:

- i - ou se retêm as barras geradoras externas durante o processo de redução,

- ii - ou se armazenam os fatores de distribuição para refletir as novas injeções para a fronteira.

Já foi mencionado anteriormente que a retenção das barras PV externas facilita a simulação de contingências de geração. Esta solução corresponde ao modelo FCEPV, descrito no capítulo 3. A solução através de fatores de distribuição [1,25] resulta da redução das equações externas do sistema (5.15) particionado:

$$\begin{bmatrix} \underline{P}_E \\ \underline{P}_F \\ \underline{P}_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{EE} & B_{EF} & \\ B_{FE} & B_{FF} & B_{FI} \\ & B_{IF} & B_{II} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\theta}_E \\ \underline{\theta}_F \\ \underline{\theta}_I \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

resultando o sistema reduzido:

$$\begin{bmatrix} \tilde{\underline{P}}_F \\ \underline{P}_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{B}_{FF} & B_{FI} \\ B_{IF} & B_{II} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\theta}_F \\ \underline{\theta}_I \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

onde

$$\tilde{B}_{FF} = B_{FF} - B_{FE} B_{EE}^{-1} B_{EF} \text{ representa o circuito reduzido} \quad (5.17a)$$

$$\tilde{\underline{P}}_F = \underline{P}_F - B_{FE} B_{EE}^{-1} \underline{P}_E \text{ representa as novas injeções} \quad (5.17b)$$

A matriz $-[B_{FE} B_{EE}^{-1}]$ corresponde aos fatores de distribuição das injeções externas \underline{P}_E sobre a fronteira, isto é:

$$\underline{P}_F^{eq} = -B_{FE} B_{EE}^{-1} \underline{P}_E \quad (5.18)$$

Considerando-se que as injeções externas consistem das injeções normais e dos

acrêscimos provocados pela contingência, isto é:

$$\underline{P}_E = \underline{P}_E^o + \underline{\Delta P}_E \quad (5.19)$$

obtém-se que:

$$\underline{P}_F^{eq} = -B_{FE} B_{EE}^{-1} \underline{P}_E^o - B_{FE} B_{EE}^{-1} \underline{\Delta P}_E \quad (5.20)$$

O primeiro termo representa as injeções equivalentes básicas:

$$(\underline{P}_F^{eq})^o \triangleq -B_{FE} B_{EE}^{-1} \underline{P}_E^o \quad (5.20a)$$

enquanto que o segundo termo representa o efeito da contingência refletido sobre a fronteira:

$$\underline{\Delta P}_F^{eq} \triangleq -B_{FE} B_{EE}^{-1} \underline{\Delta P}_E \quad (5.20b)$$

Uma vez que as injeções básicas são conhecidas, basta calcular o vetor $\underline{\Delta P}_F^{eq}$ para simular a contingência de geração.

O vetor $\underline{\Delta P}_E$ só tem elementos não nulos nas posições correspondentes às barras de geração. A fim de explorar a esparsidade desse vetor, é conveniente orientar o processo de redução do sistema externo de tal forma que as barras de geração externa sejam as últimas a serem eliminadas, conforme mostra a figura 5.2.

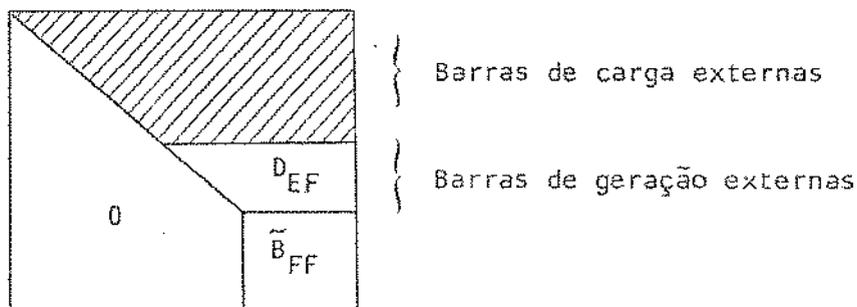


Fig. 5.2 - Ordem de redução do sistema externo.

A região designada por D_{EF} é formada pelos fatores triangulares da matriz de distribuição $[B_{EF} \ B_{EE}^{-1}]$ que interessam para gerar o vetor $\underline{\Delta P}_F^{eq}$, definido em (5.20b).

No caso em que a participação é fixa, a reflexão sobre a fronteira mantém sempre a mesma regra de distribuição, definida em $\underline{\Delta P}_F^{eq}$. Qualquer outra contingência pode ser calculada a partir desse vetor:

$$(\underline{\Delta P}_F^{eq})_{\text{novo}} = -B_{FE} B_{EE}^{-1} [\alpha \underline{\Delta P}_E] = -\alpha B_{FE} B_{EE}^{-1} \underline{\Delta P}_E = \alpha (\underline{\Delta P}_F^{eq}) \quad (5.21)$$

Esse método de reflexão das injeções externas adicionais para a fronteira foi testado para o sistema Sudeste brasileiro, na referência 25, utilizando-se o modelo WE. A precisão obtida foi da mesma ordem daquela das simulações de contingência de configuração interna.

Uma vez que o vetor $\underline{\Delta P}_E$ pode ser expresso em função dos fatores de participação externos (\underline{p}_E), pela relação:

$$\underline{\Delta P}_E = P_k \underline{p}_E \quad (5.22)$$

a equação (5.20b) também pode ser posta na forma:

$$\underline{\Delta P}_F^{eq} = -P_k [B_{FE} B_{EE}^{-1} \underline{p}_E] = P_k \underline{p}_F \quad (5.23)$$

onde

$$\underline{p}_F = -B_{FE} B_{EE}^{-1} \underline{p}_E \quad (5.23a)$$

representa os fatores de participação equivalentes na fronteira. Esse método de representar a participação externa através de fatores equivalentes foi apresentado e testado para o sistema europeu na referência 37, com ótimos resultados.

A precisão dos resultados depende não só da escolha do método de representar a participação externa, como também da representação do efeito PV. Este problema, no entanto, já existia na simulação de contingências de configuração interna. Deve-se considerar também que os erros de configuração externa afetam tanto o circuito reduzido como os fatores de distribuição, justificando que se mantenha o modelo equivalente atualizado.

5.3 - Mudanças de Configuração Externa

A atualização do circuito equivalente é importante para o cálculo das injeções equivalentes, das reações sobre os fluxos de potência e para a obtenção dos fatores de distribuição. Através do ajuste das injeções pelo estado atual, pode-se reproduzir as condições básicas internas, mesmo para um modelo externo errado. O ajuste do caso básico não elimina, contudo, os erros de reação nos fluxos para outros pontos de operação.

Numa situação real, a variação de fluxos em uma ligação qualquer entre dois instantes distintos pode ter diversas causas, como, por exemplo:

- i - mudança aleatória da demanda,
- ii - contingência de configuração
- iii - contingência de injeção,
- iv - combinações de i, ii e iii.

De uma maneira geral, pode-se considerar que a intensidade dos impactos cresce de (i) a (iv), enquanto que a probabilidade do evento decresce. Nas aplicações em tempo real, conhece-se com boa aproximação as mudanças da demanda, uma vez que os intervalos de estimação de estado são pequenos.

As contingências de geração ou carga, mais intensas, interferem no controle de carga e frequência e portanto podem ser detectadas pelo centro, que providencia as ações requeridas.

Uma contingência de configuração externa, por sua vez, nem sempre se manifesta da mesma forma, dificultando a sua detecção. Há, basicamente, duas situações a considerar em relação à ligação modificada:

- i - proximidade elétrica da fronteira;
- ii - carregamento relativo, no instante da contingência.

Foi observado, no capítulo 3, que erros de configuração elétrica - mente distantes da fronteira têm efeito desprezível sobre o sistema interno. Essa conclusão foi obtida pela comparação dos impactos causados na fronteira pela perda de ligações com impedâncias e carregamentos semelhantes, porém com localizações distintas. Dessa forma, o conceito de proximidade fica restrito às características elétricas do circuito externo.

No entanto, as mudanças de configuração, mesmo próximo da fronteira-

ra, nem sempre são detectadas. Quando há pouco fluxo na linha, no instante da contingência, a alteração não será percebida na fronteira, uma vez que não altera a distribuição de fluxos. A representação dessa mudança pode ser essencial para a análise de segurança. Para esses casos não se dispõe, ainda, de métodos de detecção e atualização que independam de informações externas. Nos casos em que a perturbação externa se manifestar na fronteira, pode-se recorrer a um dos métodos de atualização descritos a seguir.

5.3.1 - Atualização do Equivalente

Levando-se em conta a importância da atualização, deve-se estar atento a qualquer mudança brusca no estado da fronteira. Se não houver justificativa interna correspondente, pode-se considerar uma das seguintes formas de atualização do equivalente, particularmente nas aplicações em tempo real:

- i - entra-se em contato (telefônico, por exemplo) com a região externa onde ocorreu o maior impacto. Obtida a informação acerca da modificação, bem como da provável duração, gera-se um novo equivalente, através da redução do circuito externo modificado. O custo associado a esse processo de atualização é baixo e a correção é confiável.
- ii - uma outra alternativa é recorrer a processos de identificação dos novos parâmetros [30,31]. Esses métodos de atualização automática do modelo baseiam-se na minimização de erros através do processamento do novo estado, conforme já mencionado no capítulo 2. Seus principais inconvenientes são a quantidade de cálculos envolvidos e a correção gradual, sujeita a mau condicionamento. Além disso, as linearizações normalmente introduzidas deterioram por si o modelo existente.

Estes processos não excluem a necessidade de busca de soluções mais abrangentes, uma vez que a atualização pressupõe que houve um impacto sobre a fronteira.

5.3.2 - Efeito da Mudança de "Tap"

Transformadores com relação de transformação fixa não criam problemas para a redução de circuitos. No caso dos defasadores, é conveniente representar o efeito defasador através de injeções de potência, para manter a simetria da matriz admitância. Nos transformadores em fase, as ligações para "terra" do modelo π correspondente, também devem ser representadas por injeções, para evitar problemas de mau condicionamento com "shunts".

Dificuldades podem aparecer para representar a mudança automática de "tap". Esse ajuste em carga pode servir para manter constante a tensão de uma barra (transformadores em fase) ou controlar o fluxo de potência ativa na malha (defasadores). Nos dois casos, são introduzidas não-linearidades no sistema. A representação desses efeitos nos modelos reduzidos foi pouco estudada, mesmo porque esse tipo de controle tem uso restrito. Nos casos críticos de transformadores localizados próximo à fronteira, pode-se reter as barras terminais. Isto facilita a simulação do ajuste automático, mas pressupõe o conhecimento do valor atualizado das variáveis controladas. Estudos adicionais são requeridos para se definir a necessidade de refletir o efeito dos "taps" sobre a fronteira, bem como da melhor forma de realizar essa reflexão.

5.3.3 - Limites das Fontes Externas de Reativos

Quando uma barra PV atinge o limite mínimo ou máximo de reativos disponíveis, ela passa a se comportar como uma barra de carga ou PQ. Uma barra PV externa, nessas condições, deixa de exercer o controle sobre as barras de fronteira, alterando as reações externas.

No entanto, para os estudos realizados no sistema interno, pode-se considerar que as barras PV externas não têm limites de reativos, pelas seguintes razões:

- i - as contingências internas solicitam as barras PV internas em maior grau do que as externas;
- ii - as barras PV externas, que estão mais sujeitas a saírem da faixa em consequência das perturbações no sistema interno, localizam-se próximo à fronteira e podem ser eventualmente retidas.

CAPÍTULO 6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

As principais preocupações ao longo do trabalho foram:

1. fazer uma revisão crítica dos métodos,
2. explorar novas versões,
3. definir critérios para a obtenção de equivalentes,
4. testar os principais métodos,
5. comparar o desenho para um sistema brasileiro.

As conclusões mais importantes podem ser resumidas da seguinte forma:

a - Sobre a precisão

A substituição de uma parte do sistema por um modelo reduzido introduz aproximações sob diversas formas:

- i - representação linearizada do sistema externo, como ocorre, por exemplo, nos modelos DC, usados em planejamento;
- ii - representação linearizada das reações do sistema externo, como ocorre nos modelos Jacobiano Reduzido (JR) e Jacobiano Desacoplado (JD);
- iii - redução linear do circuito externo, como é o caso dos modelos Ward e REI;
- iv - linearização das equações para a identificação dos parâmetros.

Nos casos (i), (ii) e (iv), os modelos reduzidos voltam a ter comportamento não linear de circuito, após a fase de redução linear.

Para excursões em torno do caso básico, causadas por contingências, essas linearizações são compatíveis com a precisão exigida para as aplicações feitas "off-line" e "on-line". Verificou-se que os erros resultantes das perturbações introduzidas dependem da intensidade, da proximidade da fronteira, da representação das reações para fluxos de potência ativa, e do efeito de controle de tensão das barras de geração externas.

b - Sobre as vantagens de utilizar equivalentes

Apesar das aproximações que são introduzidas, pode ser vantajoso utilizar modelos reduzidos, pelas seguintes razões:

- i - diminuição do tamanho do sistema a analisar, com significativa economia de memória de computador;
- ii - redução do tempo de processamento, vital nas aplicações "on-line";
- iii - simplificação do sistema e conseqüente facilidade de interpretação dos resultados;
- iv - limitação do problema de aquisição de dados;
- v - representação de um sistema com dados aproximados.

c - Sobre as dificuldades encontradas

As principais dificuldades encontradas na utilização dos diversos tipos de equivalentes foram:

- i - Problemas de convergência, causados por admitâncias "shunt" capacitivas com valores comparáveis às admitâncias série. Verificou-se que o processo de redução de circuitos tende a ampliar as capacitâncias "shunt", originando os problemas de convergência e afetando as admitâncias série equivalentes. Considerou-se que, para fins de redução de circuitos, os elementos "shunt" devem ser tratados como cargas ou gerações. Dessa forma, reduz-se apenas o circuito série externo, representando-se o efeito "shunt" através de injeções equivalentes na fronteira.

- ii - Problemas de convergência no método desacoplado, causados por relações X/R abaixo de 1/3. Ligações com relações anormais praticamente só foram observadas nos modelos WY e REI. Estes problemas foram resolvidos através de um circuito fictício em paralelo com as ligações desfavoráveis (ver apêndice A).
- iii - Problema da representação do efeito das barras PV externas. A eliminação de barras de tensão controlada introduz erros significativos nas reações do sistema. A retenção dessas barras pode ser uma alternativa vantajosa, favorecendo a esparsidade do circuito reduzido e permitindo simular contingências de geração com relativa facilidade. A eliminação dessas barras é vantajosa quando o número de barras PV externas é grande, ou quando não se dispõe de informações operacionais acerca dessas barras. A representação mais simples do efeito incremental das barras PV sobre a fronteira consiste de ligações "shunt" equivalentes do modelo WE.
- iv - Problema de atualização dos equivalentes para representar mudanças externas. As mudanças causadas pela variação da demanda podem ser representadas através do ajuste das injeções para o novo estado estimado. As mudanças causadas por contingências de geração ou carga podem ser representadas através de fatores de participação, refletidos na fronteira. As mudanças na configuração externa exigem nova redução quando se dispõe da informação acerca da alteração ocorrida; caso contrário, é preciso fazer a identificação dos novos parâmetros. Para esse último processo não se dispõe ainda de uma solução plenamente satisfatória em termos de confiabilidade e rapidez.

d - Sobre as limitações dos métodos

A principal limitação dos métodos é o seu caráter incremental: os equivalentes devem ser ajustados para um determinado caso básico. Para utilizar os modelos fora desse ponto de operação, é necessário ter uma boa estimativa ou das injeções equivalentes ou do estado correspondente a esse novo ponto. Nas

aplicações em controle em tempo real esse problema é superado com o auxílio do estimador de estado. Em estudos de planejamento, pode-se recorrer a métodos de previsão de demanda; mas essa é uma área de pesquisa que ainda está em aberto.

e - Sobre as aplicações nos sistemas brasileiros

A principal aplicação de equivalentes nos sistemas brasileiros deverá ocorrer na execução das funções de controle do sistema interligado. A representação, quer das partes internas de menor interesse (subsistemas de distribuição) ou das partes inacessíveis aos centros (outras áreas), deverá ser feita através de equivalentes estáticos. As regiões permanentemente não observáveis são representadas com vantagem através de modelos reduzidos, enquanto que as regiões temporariamente não observáveis (durante a perda de canal de comunicação) são representadas de preferência através de modelos do tipo FCE. A melhor solução vai depender do problema específico. Por isso, é desejável dispor de algoritmos que permitam combinar a representação através de FCE e de modelos reduzidos.

f - Sobre as perspectivas para o estudo de equivalentes

Alguns aspectos que necessitam de um estudo mais aprofundado:

- i - efeito dos limites de tensão das barras externas;
- ii - representação do controle de "tap" externo;
- iii - representação de "links" DC;
- iv - métodos mais eficientes para a detecção, identificação e atualização dos circuitos equivalentes;
- v - obtenção de modelos não incrementais para utilização no Modo 3, descrito no ítem 1.3;
- vi - aplicação de equivalentes em outros problemas: otimização, análise de defeitos e proteção, controle de intercâmbio, despacho econômico, etc.

APÊNDICE A - CONSIDERAÇÕES SOBRE O FLUXO DE CARGA DESACOPLADO RÁPIDO (FCDR)

O FCDR é o método que vem sendo mais utilizado para as análises com fluxo de carga, devido às boas características computacionais: rápida convergência, economia de memória, e facilidade de implementação. Sua utilização com equivalentes revelou dois problemas com relação à convergência:

- i - A representação das ligações "shunt" na matriz de sensibilidade de B'' , dada na referência 12, deve ser corrigida por um fator 2.
- ii - As ligações série com relação $X/R < 1/3$ precisam ser compensadas de forma a se obter relações mais favoráveis para o desacoplamento.

Com relação ao primeiro problema, basta considerar que a relação de sensibilidade entre a injeção de potência reativa e a tensão, em uma barra genérica (k) , é dada por:

$$\frac{\partial Q_k}{\partial V_k} = -2B_{kk}|V_k| + \sum_{\ell \neq k} |V_\ell| (G_{k\ell} \sin \theta_{k\ell} - B_{k\ell} \cos \theta_{k\ell}) \quad (A.1)$$

onde

B_{kk} , $B_{k\ell}$ e $G_{k\ell}$ são elementos da matriz Y .

De acordo com as hipóteses feitas para a obtenção da matriz B'' , a relação (A.1) pode ser aproximada por:

$$B''_{kk} = -2B_{kk} - \sum_{\ell \neq k} B_{k\ell} \quad (A.2)$$

Considerando-se que na matriz Y vale a relação:

$$B_{kk} = B_k^{shunt} - \sum_{l \neq k} B_{kl} \quad (A.3)$$

onde B_k^{shunt} é a admitância "shunt" ligada à barra k , resulta:

$$B_{kk}'' = -2B_k^{shunt} + \sum_{l \neq k} B_{kl} \quad (A.4)$$

Na referência 12 foi omitido o fator 2. Em sistemas onde as ligações "shunt" são fracas, essa correção não é essencial para a convergência. Porém, nos sistemas com elementos "shunt" significativos, provenientes de cabos blindados, transformadores com relações fora da nominal, ou bancos capacitivos, podem ocorrer problemas de convergência, devido ao erro de aproximação da matriz B'' .

Com relação ao segundo problema, já foi observado [12,17] que relações X/R baixas criam problemas de convergência para o FCDR. Em sistemas de transmissão, tem-se normalmente $X > R$. O processo de redução de circuitos tende a uniformizar as relações para as linhas equivalentes em torno do valor X/R médio. No equivalente REI, são criadas ligações fictícias em função das injeções de potência. Durante os testes, foram observadas relações X/R da ordem de 1/50, ou seja, ligações essencialmente resistivas. Dois métodos foram testados para resolver esse problema [40]:

- i - usando compensação série, segundo DyLiacco;
- ii - usando compensação paralela.

Compensação série

Criando-se um nó fictício (f) na ligação desfavorável, pode-se ajustar a relação X/R em cada novo ramo, e compensar a reatância, conforme mostrado na figura A.1.



Fig. A.1 - Compensação X/R série.

No circuito compensado, a impedância k-l total continua a mesma, enquanto que os ramos k-f e f-l apresentam relações X/R favoráveis ao desacoplamento. Esse método, no entanto, não é eficiente quando o fluxo na linha é grande. Nestes casos, a tensão do nó (f) assume valores muito altos ou baixos, causando, por sua vez, problemas de convergência.

Compensação paralela

O problema da tensão anormal pode ser evitado se a compensação for feita em paralelo, conforme mostrado na figura A.2.

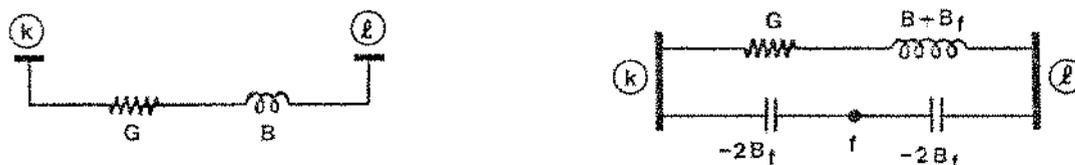


Fig. A.2 - Compensação paralela.

Neste caso, a admitância total permanece a mesma, os ramos tem relações favoráveis, e a tensão do nó fictício (f) é a média das tensões nas barras k e l.

APÊNDICE B - DESCRIÇÃO DOS EXEMPLOS TESTADOS

Foram utilizados, basicamente, quatro exemplos para os testes:

- a. IEEE - 30 barras - Dados IEEE
- b. IEEE - 118 barras - Dados IEEE
- c. SUDESTE - 645 barras, Versão I - Dados Eletrobrás
- d. SUDESTE - 645 barras, Versão II - Dados Eletrobrás

As principais características desses sistemas são dados na tabela B.1.

Tabela B.1 - Características dos exemplos testados.

Quantidade de:		IEEE		SUDESTE	
		a	b	c	d
Barras	Total	30	118	645	645
	Externo	15	79	557	508
	Fronteira	3	4	22	40
Linhas	Total	42	186	1019	1019
	Externo	22	134	901	832
	Intercâmbio	5	4	24	50
Barras PV	Total	7	51	57	57
	Externo	2	37	48	39
MW Gerado	Total	301	4137	14531	14531
	Externo	0	3110	9480	2098
MW Carga	Externo	88	2675	11369	11329

O número de ligações equivalentes dos principais modelos é dado na tabela B.2.

Tabela B.2 - Número de ligações equivalentes

Modelo	IEEE		SUDESTE	
	a	b	c	d
WE	6	10	52	113
JR *	36	64	328	744
JD **	12	17	104	226
REI 1	6	10	65	333
REI 2	10	15	93	908

* Para o JR foram computadas as posições ocupadas pelos elementos não nulos do Jacobiano Reduzido.

** Para o JD foram consideradas as posição não nulas das matrizes B' e B'' , levando-se em conta a simetria.

Os modelos WE e JD apresentam economias comparáveis de memória de computador: enquanto o primeiro armazena impedâncias complexas, o segundo armazena valores reais de B' e B'' .

Do exemplo (a)

No primeiro exemplo, a região externa corresponde ao sistema de baixa tensão (32 KV). Para evidenciar as reações externas, as barras 21 e 30 foram consideradas PV. As contingências internas, para as quais foram obtidos os resultados apresentados nas figuras 4.14 e 4.15 são:

1. Linhas 2-6 e 4-6 simultaneamente
2. Linha 3-4
3. Linha 4-6

São contingências das mais pesadas para esse sistema.

Do exemplo (b)

No segundo exemplo, mais da metade das barras externas são de tensão controlada, resultando um equivalente essencialmente reativo. Das barras de fronteira (24, 33, 34 e 38) as barras 24 e 34, que originalmente eram PV, foram transformadas em barras de carga, para acentuar as reações. Os resultados apresentados correspondem às seguintes contingências internas:

1. Linha 23-25
2. Linha 26-30
3. Linha 30-38

Do exemplo (c)

O terceiro exemplo foi obtido a partir do sistema Sudeste brasileiro para carga pesada, em julho de 1979. Considerou-se como sistema interno o subsistema de Furnas, enquanto que o sistema externo era formado pelas áreas correspondentes à CEMIG, CESP, CPFL, LIGHT-SP, CELG e EXCELSA. Com esse exemplo, pode-se simular o controle de uma área, equivalenciando as demais.

As contingências apresentadas correspondem às linhas de intercâmbio:

1. FURNAS 345 - PIMENTA 345 (FURNAS - CEMIG)
2. GUARULHOS 345 - D. NORDESTE I (FURNAS - LIGHT-SP)
3. MARIMBONDO 400 - A. VERMELHA 500 (FURNAS - CESP)

Do exemplo (d)

No quarto exemplo, também obtido do sistema Sudeste brasileiro, a região interna foi definida como sendo o subsistema de tensão > 345 KV, além das barras geradoras que alimentam esse sistema. As partes de mais baixa tensão constituem o sistema externo. Segundo essa divisão, o sistema interno cobre parte das áreas de FURNAS, CESP, CEMIG e LIGHT-SP. Com esse exemplo pode-se observar as reações de um sistema externo muito interligado, sobre um sistema de extra-alta tensão, pertencente a diferentes áreas.

Para o exemplo (d), as contingências apresentadas correspondem a:

1. ESTREITO 345 - P. CALDAS 345 (FURNAS - FURNAS)
2. GUARULHOS 345 - GUARULHOS 230 (FURNAS - FURNAS)
3. MARIMBONDO 500 - A. VERMELHA 500 (FURNAS - CESP)
4. TAQUARIL 345 - TAQUARIL 138 (CEMIG - CEMIG)
5. S. BÁRBARA 440 - S. BÁRBARA 138 (CESP - CESP)

Observações

- i - Em todos os testes, os "taps" dos transformadores foram supostos na relação nominal.
- ii - Não foram levados em conta os limites de reativos para efeito de teste.

APÊNDICE C - PROCESSO DE SIMULAÇÃO UTILIZADO

Todos os programas e subrotinas foram desenvolvidos em FORTRAN IV e os testes simulados no PDP-10, utilizando-se não mais do que 50K de memória para qualquer execução.

Não houve preocupação em otimizar os programas pilotos, para maior flexibilidade de utilização. Por essa razão, os tempos de computação não foram usados para fins de comparação.

Apesar da ênfase dada às aplicações "on-line", todas as simulações foram feitas "off-line". Isto não representa uma limitação para as análises, uma vez que a diferença básica reside no tempo disponível, em cada caso, para executar as funções.

A figura C.1 mostra o esquema básico utilizado na simulação. A seguir, cada bloco é descrito sucintamente.

1. Banco de dados

Os dados são armazenados de acordo com o formato utilizado no programa de fluxo de carga. A subdivisão em interno, fronteira e externo é feita codificando-se as barras, respectivamente, como I, F ou E.

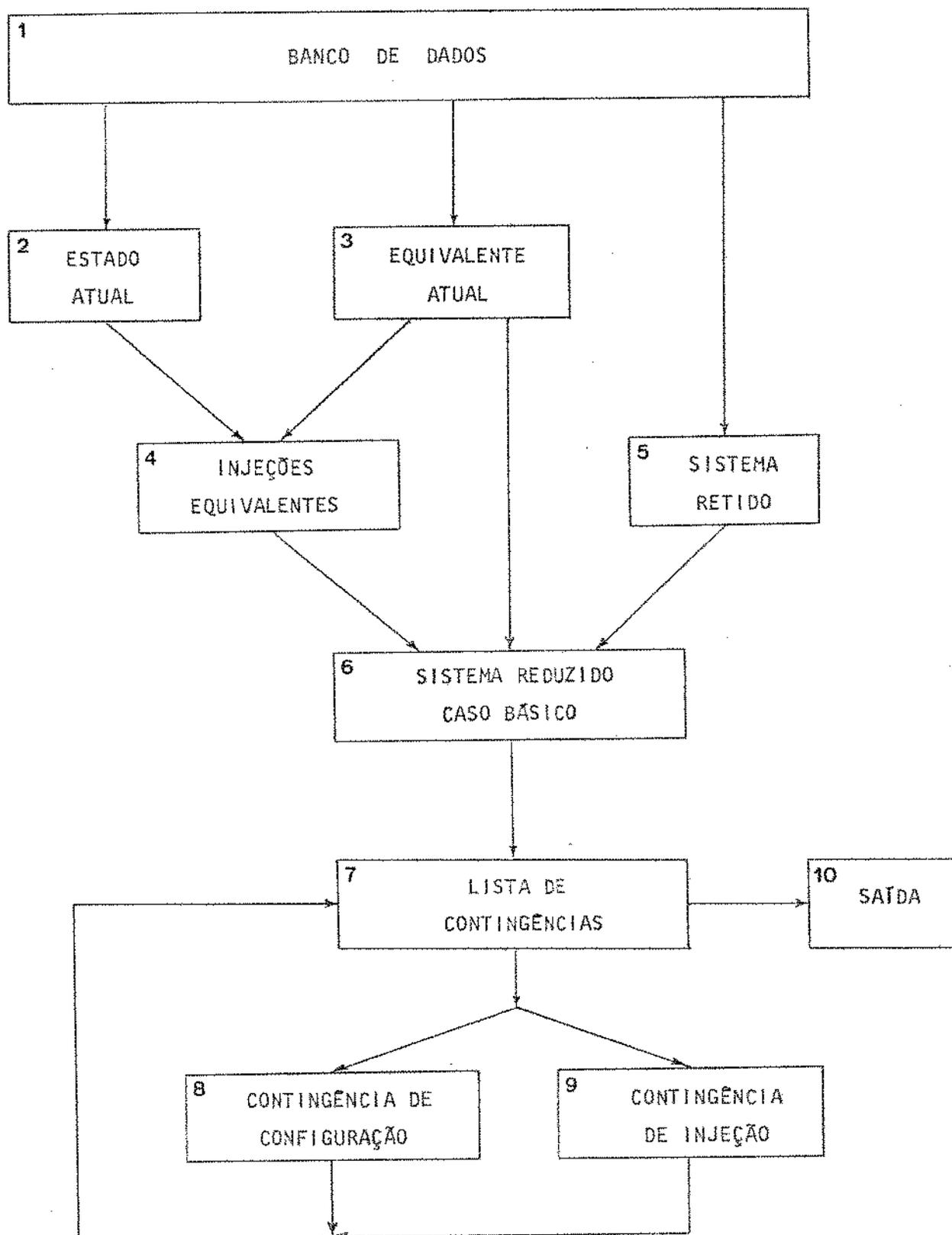


Fig. C.1 - Esquema utilizado nas simulações.

2. Estado atual

Em tempo real, esse estado é fornecido pelo estimador. Na simulação "off-line", calcula-se o estado básico através do fluxo de carga. Com exceção do JR, todos os demais modelos foram simulados com o fluxo de carga desacoplado rápido. Para explorar a esparsidade das matrizes, utiliza-se o método de bifatorização de Zollenkopf [6]. Esse método é especialmente indicado para matrizes simétricas. O critério de convergência utilizado foi: "erro máximo de injeção de potência $\leq 10^{-3}$ ". Para a análise de segurança esse critério pode ser demasiado rigoroso. Foi usado, no entanto, para poder avaliar os erros que são introduzidos pelos equivalentes.

3. Equivalente atualizado

Através da codificação I, F, E, pode-se contruir as matrizes Y, B', B'' ou J, apenas para o sistema externo mais as barras de fronteira. Através da eliminação ordenada de Gauss, reduz-se as barras externas. As matrizes reduzidas de Y, B' e B'' são reinterpretadas através de circuitos equivalentes. As ligações equivalentes assim obtidas passam a integrar a lista de dados do circuito reduzido. Para os modelos de sensibilidade (JR e JD), são guardadas as próprias matrizes reduzidas.

No modelo desacoplado (WD) resultam dois circuitos reduzidos distintos, exigindo alguns cuidados na manipulação dos arquivos.

O processo de ordenação utilizado corresponde ao "mínimo grau dinâmico" - equivalente ao "esquema 2" de Tinney [5].

Para fazer com que as barras de geração sejam eliminadas por fim (com vistas às contingências de geração), soma-se uma constante ao grau inicial dessas barras, garantindo que o grau dinâmico das barras PQ nunca ultrapasse esse valor.

4. Injeções equivalentes

As injeções equivalentes correspondem à soma algébrica dos fluxos em torno de cada barra de fronteira, calculados para o circuito reduzido e o estado atualizados.

5. Sistema retido

Os dados correspondentes ao sistema interno, mais as interligações entre as barras de fronteira e o que se pretende reter do sistema externo, formam o sistema retido.

6. Sistema reduzido

Anexando-se o equivalente ao sistema retido, obtêm-se o sistema reduzido, cujo ajuste ao caso básico é feito pelas injeções equivalentes na fronteira. Note-se que o ajuste perfeito do caso básico não implica que as reações do equivalente sejam corretas. Os erros vão se manifestar através das reações, durante as contingências.

7. Lista de contingências

As contingências a serem simuladas são fornecidas pelo usuário. Por razões de facilidade, são consideradas basicamente contingências simples de configuração e geração.

8. Contingências de configuração

A simulação de perda de linha ou transformador é feita através de compensação [8,27], a partir da solução básica. Esse método é exato e não exige a modificação da matriz original. Procurou-se escolher contingências que provocassem fortes reações externas, ou seja, ligações com fluxos significativos, próximos da fronteira.

9. Contingências de geração

A perda de geração (ou carga), é simulada através de fatores de distribuição. A potência ativa adicional das barras PV externas é refletida para a fronteira através de fatores de distribuição, obtidos durante a redução do sistema externo. Através desse esquema pode-se simular qualquer regra de participação dos geradores externos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- | 1 | J.B. Ward, "Equivalent Circuits for Power-Flow Studies", AIEE Transaction Vol. 68, pp. 373-382, 1949.
- | 2 | J.B. Ward, H.W. Hale, "Digital Computer Solution of Power-Flow Problems", AIEE Transaction, Vol. 75, pp. 398-404, 1956.
- | 3 | T.E. DyLiacco, "The Adaptive Reliability Control System", IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-86, pp. 517-531, Mai. 1967.
- | 4 | W.F. Tinney, C.E. Hart, "Power Flow Solution by Newton's Method", IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-86, pp. 1449-1460, Nov. 1967.
- | 5 | W.F. Tinney, J.W. Walker, "Direct Solutions of Sparse Network Equations by Optimally Ordered Triangular Factorization", Proc. IEEE, Vol. 55, pp. 1801-1809, Nov. 1967.
- | 6 | K. Zollenkopf, "Bi-factorization Basic Computational Algorithm and Programming Techniques", Proc. Conference on Sparse Matrix Techniques, Oxford, Abr. 1970.
- | 7 | H. Duran, N. Arvanitidis, "Simplification for Area Security Analysis: A New Look at Equivalencing", IEEE Trans. Power App. Syst., Vol PAS-91, pp. 670-679, Mar/Abr. 1972.
- | 8 | W.F. Tinney, "Compensation Methods for Network Solutions by Optimally Ordered Triangular Factorization", Proc. PICA Conf., Boston, Mai. 1971.
- | 9 | M.M. Peterson, W.F. Tinney, D.W. Bree, "Iterative Linear AC Power Flow Solution for Fast Aproximate Outage Studies" IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. 90, pp. 2048-2056, Dez. 1971.

- [10] T.G. Deville, F.C. Schweppe, "On-Line Identification of Interconnected Network Equivalents from Operating Data", IEEE PES Summer Meeting, São Francisco, Jul. 1972.
- [11] W.F. Tinney, W.L. Powell, N.M. Peterson, "Sparsity Oriented Network Reduction", Proc. PICA Conf., pp. 385-390, Mineápolis, Mai. 1973.
- [12] B. Stott, O. Alsac, "Fast Decoupled Load-Flow", IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-73, pp. 859-869, Mai/Jun. 1974.
- [13] E.K. Paulson, "Network Equivalents for On-Line Systems", IEEE PES Summer Meeting, Annaheim, Jul. 1974.
- [14] P. Dima, "Nodal Analysis of Power Systems", Abacus Press, Inglaterra, 1975.
- [15] A.S. Debs, "Estimation of External Network Equivalents from Internal System Data", IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-94, pp. 272-279, Mar/Abr. 1975.
- [16] D. Denzel, R. Graf, J. Verstege, "Practical Use of Equivalents for Unobservable Networks in On-Line Security Monitoring", Proc. PSCC, Cambridge, Set. 1975.
- [17] F.F. Wu, "Theoretical Study of the Convergence of the Fast Decoupled Load Flow", IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. 96, pp. 268-275, Jan/Fev. 1977.
- [18] A. Monticelli, S. Deckmann, "Equivalentes Externos Linearizados Aplicados à Análise Estática de Contingências em Sistemas Interligados", Relatório nº 1 do Convênio CEPEL/UNICAMP sobre Equivalentes Externos, Mar. 1977.
- [19] J.F. Dopazo, M.H. Dwarakanath, J.J. Li, A.M. Sasson, "An External System Equivalent Model Using Real-Time Measurements for System Security Evaluation", IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-96, pp. 431-439, Mar/Abr. 1977.
- [20] A.S. Debs, G. Contaxis, "System Identification Approach to External System Equivalents", IEEE Symp. on Circuits and Syst., Fênix, Abr. 1977.
- [21] A. Garcia, A. Monticelli, P. Abreu, "Fast Decoupled State Estimation and Bad Data Processing", F78687-6, IEEE PES Summer Meeting, Los Angeles, Jul. 1978.

- [22] W.F. Tinney, W.L. Powell, "The REI Approach to Power Network Equivalents", Proc. PICA Conf., pp. 314-320, Toronto, Mai. 1977.
- [23] F.L. Alvarado, E.H. Elkonyaly, "Reduction in Power Systems", IEEE PES Summer Meeting, Mexico, Jul. 1977.
- [24] S. Deckmann, A. Garcia, A. Monticelli, "Equivalente de Ward Estendido", Relatório nº 2 do Convênio CEPEL/UNICAMP, sobre Equivalentes Externos, Jul. 1977.
- [25] A. Garcia, A. Monticelli, S. Deckmann, "Equivalentes Externos em Tempo Real para Análise de Segurança Estática", Relatório nº 3 do Convênio CEPEL/UNICAMP, sobre Equivalentes Externos, Nov. 1977.
- [26] E.H. Elkonyaly, F.L. Alvarado, "External System Static Equivalent for On-Line Implementation", IEEE PES Winter Meeting, Nova York, Jan. 1978.
- [27] L.M. Thomé, B. Stott, A. Monticelli, "Análise de Segurança Estática em Tempo Real", 1º Encontro PAEEE, Salvador, Jan. 1978.
- [28] S. Deckmann, A. Monticelli, A. Pizzolante, C. Murari, "Modelagem do Sistema Externo para a Obtenção do Equivalente Ward Estendido", Relatório nº 4 do Convênio CEPEL/UNICAMP, sobre Equivalentes Externos, Mar. 1978.
- [29] G. Contaxis, A.S. Debs, "Identification of External Equivalents for Steady State Security Assessment", IEEE Trans. Power Appl. Syst., Vol. PAS-97, pp. 409-414, Mar/Abr. 1978.
- [30] J.F. Dopazo, G. Irisarri, A.M. Sasson, "Real Time External System Equivalent for On-Line Contingency Analysis", IEEE PES Summer Meeting, Los Angeles, Jul. 1978.
- [31] D. Denzel, F.R. Graf, J. Verstege, "Identification of External Network Equivalents from Estimated Internal System States", Proc. PSCC, Darmstadt, Set. 1978.
- [32] T.E. DyLiacco, S.C. Savulescu, K.A. Ramarao, "An On-Line Topological Equivalent of a Power System", IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-97, pp. 1550-1563, Set/Out. 1978.
- [33] O. Alsaç, "Real-Time Security-Related Functions of System Control Centers" Notas de Curso sobre Funções de Monitoração e Controle em Tempo Real de Sistemas Elétricos de Potência, IEEE/TELECOM, Rio de Janeiro, Set. 1978.
- [34] J.L. Marinho, O. Alsaç, B. Stott, "Real-Time Control Calculations", *Ibid.*

- [35] F.F. Wu, N. Narasimhamurthi, "Necessary Conditions for REI Reduction to be Exact", IEEE PES Winter Meeting, Nova York, Jan. 1979.
- [36] 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, pp. 498-508, Mar/Abr. 1979.
- [37] F.C. Aschmoneit, J.F. Verstege, "An External System Equivalent for On-Line Steady-State Generator Outage Simulation", IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-98, pp. 770-779, Mai/Jun. 1979.
- [38] A. Pizzolante, A. Monticelli, S. Deckmann, "Execução de Funções Avançadas de Controle em Tempo Real em Sistemas Parcialmente Observáveis", 5^a Conf. do SNPTEE, Recife, Nov. 1979.
- [39] S. Deckmann, A. Pizzolante, A. Monticelli, B. Stott, O. Alsaç, "Studies on Power System Load Flow Equivalencing", Submetido ao IEEE PES Winter Meeting, Nova York, Jan. 1980.
- [40] _____ "Numerical Testing of Power System Load Flow Equivalents", Ibid.
- [41] G.C. Ejebe, B.F. Wollenberg, "Automatic Contingency Selection", IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-98, pp. 97-109, Jan/Fev. 1979.
- [42] A.C. Pizzolante, "Representação de Partes Parcialmente Observáveis de Sistemas de Energia Elétrica", Tese de Mestrado apresentada na Faculdade de Engenharia Elétrica da UNICAMP, Out. 1979.