

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
DEPARTAMENTO DE SISTEMAS E CONTROLE DE ENERGIA

*Esta obra, de caráter técnico, foi aprovada  
pela Comissão de Pós-Graduação da  
Universidade Estadual de Campinas em 1987  
e aprovada pela Comissão de Pós-Graduação em 1987*

EQUIVALENTE ESTÁTICO REDUZIDO

UMA REVISÃO CRÍTICA DO MODELO WARD ESTENDIDO

AUTOR:

Paulo Cezar Coelho Tavares

ORIENTADOR:

Sigmar M. Deckmann

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica

Setembro 1987

AO PROFESSOR MÁRIO G. TAVARES (MEU PAI)

## AGRADECIMENTOS

Inicialmente gostaríamos de agradecer ao Prof<sup>o</sup> Sigmar Deckmann pelo incentivo, pela orientação e pela paciência demonstrada ao longo de todo o trabalho.

Sentimo-nos em débito: com a CHESF pelo apoio financeiro; com os engenheiros Saulo Cisneiros, Leonardo Lins e Álvaro Ramos que ajudaram a viabilizar, de modo pioneiro para a época (1981), o nosso treinamento na UNICAMP.

Sem a ajuda de alguns colegas este trabalho não teria se materializado; a Prof<sup>a</sup> Ana C. Lyra pelo apoio durante nossa estada na UNICAMP; a colega Vera Lúcia e o Prof<sup>o</sup> Hector Arango devo parte dos créditos pelo desenvolvimento das rotinas de esparsidade, que tão bons serviços prestaram no decorrer desta pesquisa; ao colega Humberto Doria pelo apoio na modificação e utilização da rotina ASSEMBLER para medição dos tempos de execução entre trechos de programas; aos colegas Técnicos Jailton F. Lima e Adilson Campêlo que digitaram, formataram e emitiram, em micro computador, este trabalho; à desenhista Sheila agradecemos os desenhos.

## SUMÁRIO

O trabalho se propõe a fazer uma revisão da metodologia descrita na literatura para a obtenção do equivalente estático Ward Estendido. Particular atenção foi dedicada à metodologia das reações das barras externas de tensão controlada, das ligações reativas "shunt" e das cargas não-lineares, visando à análise de segurança estática em sistemas parcialmente observáveis. Através de exemplos simples buscou-se estabelecer relações causa-efeito para estudar esses problemas de modelagem. Através desses exemplos foi possível mostrar que tanto as barras de tensão controlada (tipo PV) quanto as ligações reativas "shunt" externas podem ser representadas através de um equivalente reativo exato. Constatou-se ainda que as principais fontes de erros dos equivalentes tipo Ward são provenientes da modelagem de cargas e gerações como sendo injeções de potência constante (ativa e reativa). A criação de ligações "só P", isto é, que não existem do ponto de vista reativo, permite uma representação mais precisa dos caminhos externos efetivamente disponíveis para o fluxo de potência ativa e reativa na presença de barras intermediárias de tensão controlada.

Do ponto de vista computacional foi desenvolvido um algoritmo para a obtenção, num único processo de redução, tanto do equivalente série como do equivalente "shunt", levando em conta o efeito das barras PV eliminadas. Com isso o tempo necessário para a atualização do equivalente foi reduzido de aproximadamente 50%, conforme mostram os exemplos testados.

## ÍNDICE

	PÁGINAS
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	01
1.1 Objetivos do Trabalho	01
1.2 O problema de Equivalentes Estáticos em SEE	02
1.2.1 Utilização "off-line" de Equivalentes	03
1.2.2 Utilização "on-line" de Equivalentes	05
1.2.3 Acoplamento com o sistema em estudo	07
1.3 Organização do Trabalho	08
CAPÍTULO 2 - EQUIVALENTES ESTÁTICOS - O ESTADO ATUAL	09
2.1 Obtenção do Equivalente Ward Estendido (WE)	10
2.1.1 Obtenção da rede equivalente	10
2.1.2 Obtenção das injeções equivalentes	13
2.2 Comentários relativos ao WE	13
2.2.1 Aspectos de compatibilidade	13
2.2.2 Aspectos computacionais	13
2.2.3 Aspectos de precisão	14
2.2.4 Versões adicionais	14

CAPÍTULO 3 - INVESTIGAÇÃO DE PROBLEMAS LIGADOS À	
MODELAGEM ESTÁTICA EM SDE	15
3.1 Modelagem de barra PV externa	15
3.1.1 Conexão radial	16
3.1.2 Conexão em malha	28
3.1.3 Representação exata de barra PV externa	
modelo WRE	35
3.1.4 Algoritmo para obtenção do modelo WRE	40
3.2 Modelagem de elemento "shunt" externo	45
3.2.1 "shunt" em sistema radial	47
3.2.2 "shunt" em sistema malhado	51
3.3 Considerações adicionais sobre a modelagem de	
"shunt" e barras PV	55
3.3.1 Transformação de "shunt" em PV equivalente	56
3.3.2 Transformação de barra PV em PQ equivalente	66
3.4 Modelagem das cargas externas ativas e reativas	75
3.4.1 Influência das barras PV externas no	
fluxo ativo entre barras fronteira	75
3.4.2 Influência das perdas ativas e reativas	77
3.5 Modelagem das resistências externas	78
3.5.1 Modelagem das resistências "Shunts"	78
3.5.2 Modelagem das resistências série	79

CAPÍTULO 4 - EQUIVALENTE WARD ESTENDIDO EM UMA ETAPA E WARD REATIVO EXATO	81
4.1 Equivalente Ward Estendido em Uma Etapa (WEUE)	81
4.1.1 Algoritmo para obtenção do WEUE	81
4.1.2 Aspectos computacionais - Teste numérico	85
4.1.3 Precisão do WEUE	86
4.2 Equivalente Ward Reativo Exato (WRE)	87
4.2.1 Obtenção do WRE	87
4.2.2 Precisão do modelo WRE	87
4.2.3 Características computacionais	88
 CAPÍTULO 5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	 89
5.1 Objetivos perseguidos e resultados alcançados	89
5.2 Desenvolvimentos futuros	92
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 93
 APÊNDICE	 96

## PRINCIPAIS SIGLAS USADAS NO TEXTO

SEE	-	Sistemas de Energia Elétrica
PQ	-	Barra de carga → dados P e Q
PV	-	Barra de tensões controlada → dados P e V
WE	-	Equivalente Ward Estendido
WRE	-	Ward Reativo Exato
WEUE	-	Ward Estendido em Uma Etapa



## INTRODUÇÃO

Empresas de energia elétrica utilizam, com frequência, técnicas de simplificação de redes para realizar diversos tipos de estudos operacionais e de planejamento. Com a viabilização da supervisão computadorizada da operação de Sistemas de Energia Elétrica (SEE), tem aumentado nos últimos 10 anos o interesse pela representação precisa dos componentes da rede interligada. A realização das chamadas funções avançadas nos centros de supervisão e controle depende fundamentalmente da capacidade de se modelar corretamente o sistema em operação, bem como de prever as reações do sistema às alterações que possam vir a ocorrer durante a operação.

Os avanços alcançados na área de equivalentes estáticos mostram bem como essa busca por modelos mais precisos para a análise estática da rede tem sido intensa em diversos centros de pesquisa. O equivalente Ward Estendido (WE) resultou de pesquisas nessa área desenvolvidas na UNICAMP a partir de 1976 e que estão detalhadas nas referências [6 a 9]. Novas melhorias foram sendo introduzidas e testadas a partir de então [10 a 15, 17].

Dado o grande interesse que esse assunto despertou nas empresas do setor elétrico, surgiu em 1981 a oportunidade do engajamento, como engenheiro de empresa concessionária (CHESF), nessa área de pesquisa. Os estudos desenvolvidos, bem como os resultados alcançados estão sintetizados na forma do presente trabalho acadêmico. Em virtude do estágio avançado das pesquisas existentes ao início deste trabalho, foram colocados os seguintes objetivos básicos para o estudo:

### 1.1 Objetivos do trabalho

- i) Realizar uma investigação crítica das características do equivalente WE;

- ii) Desenvolver esquemas de obtenção mais eficientes;
- iii) Obter modelos reduzidos mais precisos.

Tendo como base as pesquisas anteriormente desenvolvidas nessa área, buscou-se continuar a investigação das características dos equivalentes estáticos tipo Ward [1] utilizados em sistemas elétricos de potência. No tocante ao aspecto de modelagem dos componentes do sistema a ser equivalenciado, são realizadas investigações e apresentadas alternativas, devidamente testadas e analisadas. No enfoque computacional é proposto e testado um novo algoritmo para obtenção do equivalente Ward Estendido através de uma redução única. O objetivo fundamental é melhorar as características de precisão e esforço computacional dos modelos atualmente disponíveis.

O trabalho está dirigido basicamente para as aplicações em tempo real ("on-line"), embora sejam possíveis utilizações no modo estudo ("off-line").

## 1.2 O problema de Equivalentes Estáticos em SEE

Considere-se um sistema elétrico de potência no qual se deseja realizar um estudo de regime permanente, por exemplo, análise de fluxo de carga. Suponha-se que o sistema está particionado em interno e externo, de acordo com o grau de interesse nas grandezas sob análise, ou disponibilidade de dados do sistema representado:

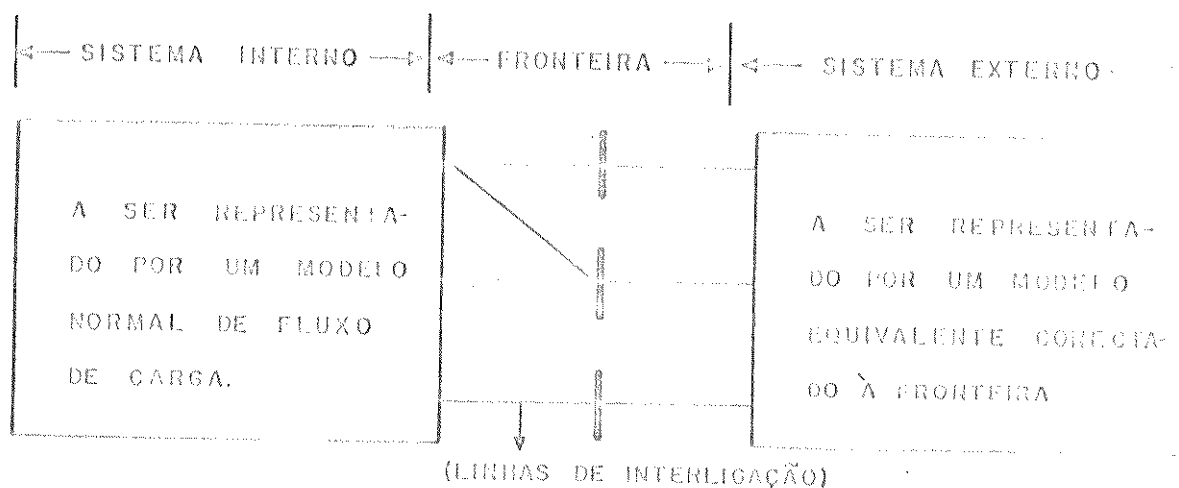


Figura 1.1 - Partições do SEE

Conforme mostrado na Figura 1.1, é conveniente dividir o sistema interligado em três partes:

- a) SISTEMA INTERNO - É a área de interesse para estudos ou controle. São conhecidos os dados de configuração e condição operacional. A análise é realizada utilizando-se um modelo normal de fluxo de carga.
- b) SISTEMA EXTERNO - É a área que pode ser substituída por equivalentes, pois é formada pelas partes não essenciais para o estudo. Dependendo do tipo de aplicação, os dados do sistema externo podem ser parcial ou totalmente conhecidos.
- c) BARRAS DE FRONTEIRA - São as barras que ligam os sistemas interno e externo.

### 1.2.1 - Utilização "Off-Line" de Equivalentes

No modo "off-line" são disponíveis informações do sistema externo relativos à topologia (configuração) e condições operativas (cargas ativas e reativas, tap's, níveis de tensão em barras PV, etc.). Neste modo a utilização de equivalentes para o sistema externo visa apenas à redução da dimensão do sistema

a ser analisado. Esta redução implica em benefícios em dois aspectos básicos: economia de tempo de estudo, pois há uma diminuição do volume de dados a ser manuseado e analisado; economia de custos computacionais devido à redução da dimensão do problema. A contrapartida a estes benefícios é a redução da precisão, pois os equivalentes não são, em geral, exatos.

A utilização de equivalentes no modo "off-line" é corriqueiramente feita nas empresas do setor elétrico nacional. Um método muito usado é o do simples corte das ligações com o sistema externo e substituições dos fluxos correspondentes por injeções de potência na fronteira, (método do programa da PECO), conforme ilustrado na Figura 1.2. Caso haja, pelo sistema externo, algum caminho entre as barras de fronteira ou existam barras de tensão controlada no sistema externo, este método apresentará erros significativos.

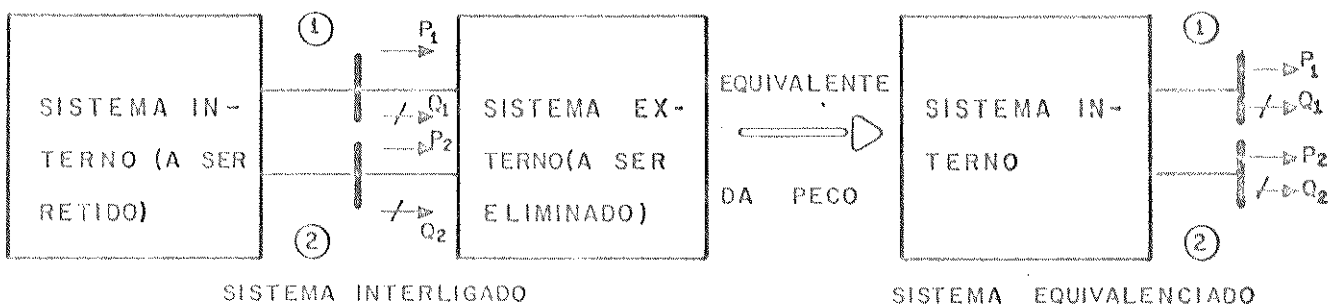


Figura 1.2 - Método de Equivalente através de corte (PECO)

Outra técnica usada consiste na redução passiva considerando as cargas externas como impedâncias (método do programa NETEQUIV), conforme mostrado na Figura 1.3.

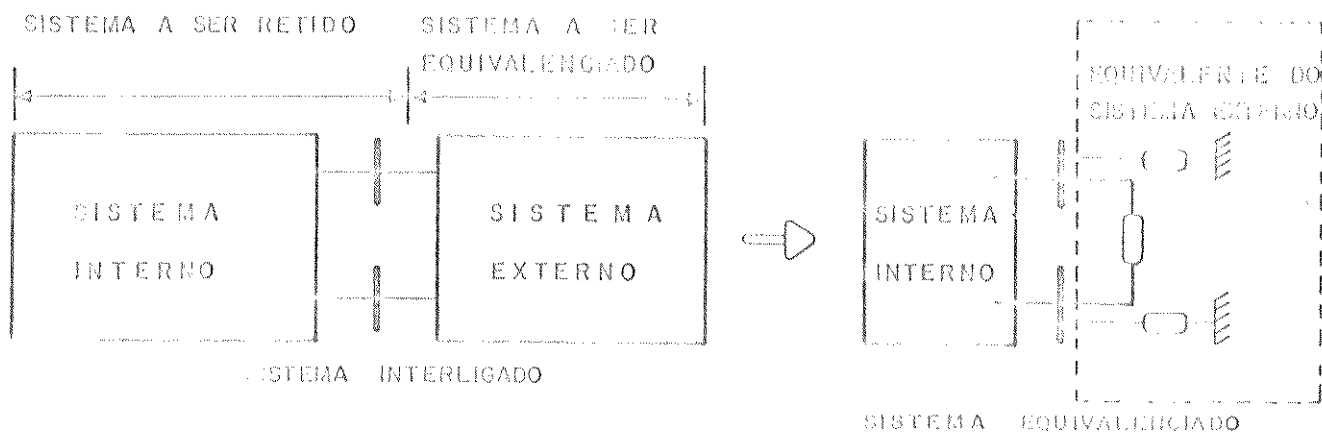


Figura 1.3 - Método de Equivalente utilizando rede passiva

Este método é, em geral, superior ao método de corte anteriormente descrito. A técnica da rede passiva é, no entanto, bastante deficiente pois não modela de modo conveniente algumas não linearidades do sistema externo como as cargas e as barras de tensão controlada.

No modo "off-line" as técnicas de equivalentes são utilizadas basicamente nos estudos que envolvem soluções repetidas de fluxo de carga.

Já existe hoje disponível nas empresas uma metodologia melhorada de equivalentes, baseada no equivalente Ward Estendido (que será apresentado no capítulo 2). Uma dificuldade deste programa é a incompatibilidade com os arquivos de dados atualmente disponíveis para outras aplicações nas empresas.

### 1.2.2 - Utilização "On-Line" de Equivalentes

Neste modo de aplicação, em geral, não se dispõe de informações completas do sistema externo. Geralmente são

conhecidas as informações referentes à configuração (incluindo a localização das barras de tensão controladas) e se ignoram as informações sobre a condição operacional do sistema externo (cargas ativa e reativa, tap's, etc.).

No modo "on-line" as técnicas de equivalentes não são utilizadas para executar algumas funções nos centros de supervisão e controle em tempo real.

Com o propósito de exemplificar a utilização "on-line" de equivalentes, considere-se a função de análise estática de segurança em tempo real. Esta função requer uma análise de contingências, que consiste em simular eventos prováveis de ocorrer no sistema interno (sistema monitorado pelo centro de controle). No modo tempo-real (Figura 1.4), um estimador de estado fornece as variáveis do estado base atual para o sistema observável.

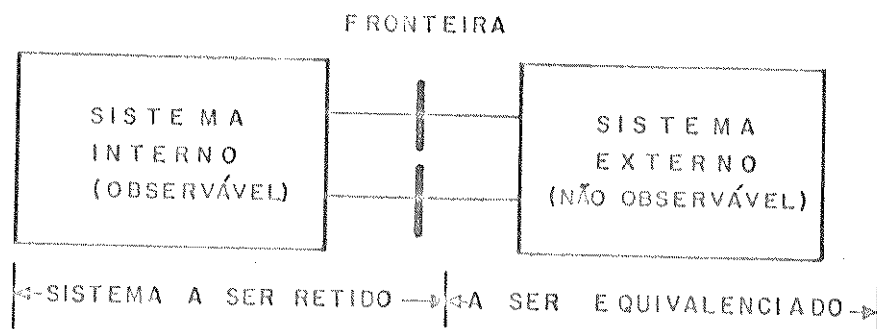


Figura 1.4 - Equivalenciamento em tempo real

No sistema externo só é conhecida a configuração, já que a condição operativa não é disponível em tempo real. Para simular

uma contingência no sistema interno, é necessário, em geral, representar as reações do sistema externo. O modelo equivalente do sistema externo é construído de modo a representar com a máxima fidelidade possível as reações do sistema externo para contingências no sistema interno.

### 1.2.3 Acoplamento com o sistema em estudo

Tanto nas aplicações "off-line" quanto nas "on-line", uma vez obtido o modelo do sistema externo, este deve ser acoplado, através de um processo denominado ajuste ou casamento de fronteira com o sistema retido (veja Figura 1.5). Este casamento consiste em calcular o balanço de potência ativa e reativa na fronteira para o estado atual disponível.

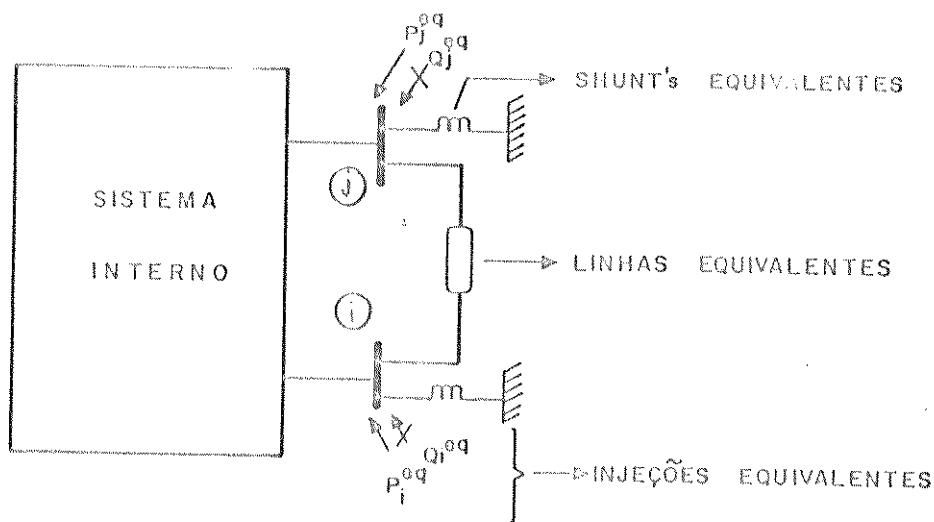


Figura 1.5 - Sistema retido com equivalente externo acoplado

Após o acoplamento do equivalente externo com o sistema retido, é possível iniciar a análise de contingência no sistema interno e avaliar o grau de segurança do sistema monitorado.

### 1.3 Organização do Trabalho

O presente trabalho apresenta a seguinte estrutura:

CAPÍTULO 1 - É introduzido o assunto, são definidos os objetivos, e apresentadas as formas de utilização de equivalentes em sistemas elétricos de potência.

CAPÍTULO 2 - É descrita a obtenção e são comentadas as características básicas do equivalente Ward Estendido (WE).

CAPÍTULO 3 - São investigados os problemas relativos à modelagem de barras PV, "shunts" e cargas não lineares. Apresenta-se um modelo reativo exato, comprovado através de exemplos. Considerações adicionais mostram a possibilidade de se interpretar qualquer "shunt" por uma barra PV equivalente, através de modelagem exata.

CAPÍTULO 4 - São apresentados os algoritmos de obtenção do Ward Estendido em uma redução e do Ward Reativo Exato desenvolvidos neste trabalho. Testes numéricos com o sistema IEEE-118 são apresentados.

CAPÍTULO 5 - Apresenta uma discussão dos resultados e as conclusões do trabalho.

APÊNDICE A - Comenta os programas digitais desenvolvidos no decorrer deste trabalho.



## CAPÍTULO 2

## EQUIVALENTES ESTÁTICOS - O ESTADO ATUAL

A linha Ward de equivalentes tem sua origem no trabalho [1] de J. B. Ward. Este trabalho pioneiro introduz a utilização da transformação Y-A para eliminar os nós externos, considerando as cargas como admitâncias. Como consequência, foi desenvolvida a utilização da matriz Y associada à eliminação gaussiana de modo a se obter a rede reduzida. O processo de eliminação gaussiana, quando aplicado a sistemas lineares, fornece resultados exatos. A aplicação desta técnica linear a um sistema não linear (com barras PV e cargas não lineares), no entanto, apresenta uma série de problemas [6, 7, 8, 9]. O principal problema está relacionado com a representação das barras PV e dos "shunts" externos. Para superar estas dificuldades foram desenvolvidas novas idéias e modelos. Este esforço de pesquisa [6 a 13] levou à obtenção do modelo Ward Estendido (WE), derivado das equações do fluxo de carga. Embora existam outras versões derivadas do modelo WE [12, 13, 16], pode-se caracterizar este modelo como representando o atual estado da arte para os equivalentes tipo Ward.

Este capítulo resume a obtenção do modelo WE e comenta suas características de compatibilidade, esforço computacional e de precisão, com relação às principais áreas de aplicação: estudos "off-line" e análise "on-line" da operação de SEE interligados.

## 2.1 Obtenção do equivalente Ward Estendido (WE)

### 2.1.1 Obtenção da rede equivalente

Originalmente o equivalente WE foi desenvolvido a partir das equações do Fluxo de carga desacoplado [12]. A obtenção da rede equivalente WE pode ser descrita em duas etapas:

a) Obtenção das ligações série equivalentes:

a1) Formação da matriz admitância nodal  $Y$  do sistema externo mais barras de fronteira, ignorando nesta matriz todas as ligações "shunt".

$$Y = \begin{array}{|c|c|} \hline Y_{EE} & Y_{EF} \\ \hline Y_{FE} & Y_{FF} \\ \hline \end{array} \quad (2.1)$$

a2) Redução das barras externas através da eliminação de Gauss.

$$Y_{red} = \begin{array}{|c|c|} \hline \text{Hatched Triangle} & \\ \hline 0 & Y_{FF}^{eq} \\ \hline \end{array} \quad (2.2)$$

a3) Interpretação da matriz  $Y_{FF}^{eq}$  através de uma rede equivalente. Observar que na equação (2.1) não foram considerados os "shunts" externos. Em função disso a rede equivalente só possui elementos série.

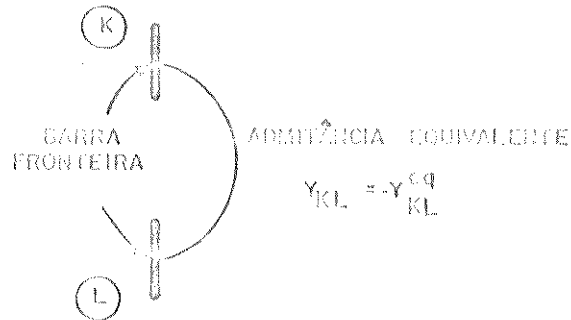


Figura 2.1-1

b) Obtenção das ligações "shunts" equivalentes

b1) Formação da matriz admitância nodal  $Y$  das barras externas e de fronteira, "aterrando" as barras PV.

$$Y' = \begin{bmatrix} Y'_{EE} & Y'_{EF} \\ Y'_{FE} & Y'_{FF} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

b2) Redução das barras externas e obtenção da matriz  $Y'_{red}$ .

$$Y'_{red} = \begin{bmatrix} \text{hatched} & \\ 0 & Y'_{FF} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

b3) A matriz  $Y'_{red}$  tem geralmente elementos "shunt" elevados nas barras de fronteira. Dividindo-se as susceptâncias "shunts" por 2 obtém-se as ligações "shunts" equivalentes do modelo

WE. Pode-se demonstrar que estes elementos "shunts" representam com boa aproximação o efeito reativo das barras PV externas eliminadas [12].

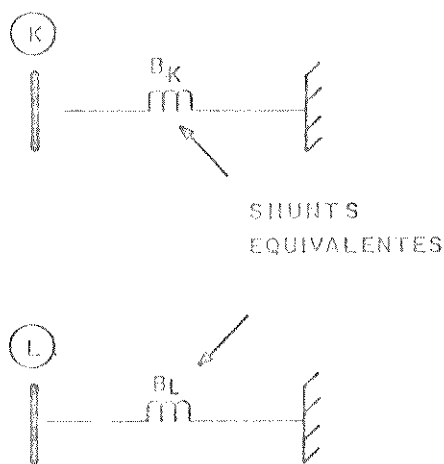
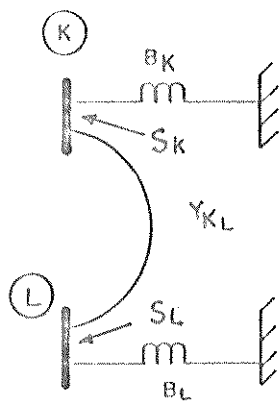
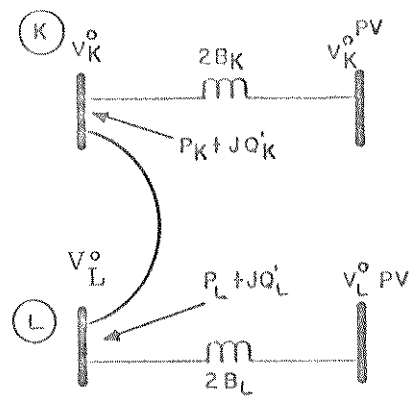


Figura 2.1-2

Uma vez obtida a rede equivalente, o modelo WE pode ser colocado na forma (a) ou (b) da Figura 2.1-3.



(a) Rede equivalente WE com ligações shunt e injeções equivalentes



(b) Equivalente WE com injeções equivalentes e com PV fictícia

Figura 2.1-3

### 2.1.2 Obtenção das injeções equivalentes

A figura 2.1-3 mostra a rede equivalente com as injeções equivalentes ( $S_K$  e  $S_L$ ). Estas injeções equivalentes são necessárias para ajustar a rede equivalente às condições do caso base do sistema retido. O cálculo destas injeções pode ser realizado pelo seguinte processo:

- i) Conectar a rede equivalente às barras fronteira;
- ii) Considerar as barras fronteira e as suas vizinhas internas com a tensão complexa do caso base. Nas aplicações em tempo real estas tensões são calculadas pelo estimador de estado;
- iii) Calcular as injeções de potência ativa e reativa ( $S_K$  e  $S_L$ ) requeridas em cada barra fronteira para manter o estado descrito em (ii).

## 2.2 Comentários Relativos ao WE

### 2.2.1 Aspectos de Compatibilidade

O modelo WE é simples e de fácil implementação. Pode ser utilizado por qualquer programa padrão de fluxo de carga sem necessidade de modificações ou adaptação, desde que se disponha de informações suficientes para o ajuste ao caso básico em estudo.

### 2.2.2 Aspectos Computacionais

O equivalente WE completo envolve duas fases distintas: a obtenção da rede equivalente e o ajuste às condições do caso básico. É importante ressaltar que o equivalente é construído apenas com informações da topologia da rede externa, enquanto o estado da rede externa afeta apenas o cálculo das injeções na fronteira. Esta propriedade é fundamental para as aplicações em

tempo real, pois é possível atualizar o equivalente, quando o estado da rede muda, simplesmente recalculando as injeções na fronteira.

### 2.2.3 Aspectos de Precisão

Através de testes com diversas redes e nas mais variadas condições de operação [13], verifica-se que o WE fornece bons resultados para a análise de contingências em sistemas interligados. Alguns casos isolados foram registrados em que erros menores seriam desejáveis, principalmente com relação aos valores da tensão e dos fluxos de reativos resultantes.

### 2.2.4 Versões Adicionais

As referências [10, 12, 13] descrevem algumas versões do método WE. Para aplicação em tempo real o método WE, aqui descrito, é o que reúne até o momento as melhores características computacionais e de precisão, aliadas à simplicidade e facilidade de implementação. O método WE é utilizado no programa "ANAREDE", desenvolvido pelo CEPEL, (Centro de Pesquisas da Eletrobrás), para uso nas empresas do setor elétrico brasileiro. Mais recentemente surgiu a proposta de unificar a obtenção do equivalente para aplicações em tempo real com o processo de estimação de estado [15].

## CAPÍTULO 3

## INVESTIGAÇÃO DE PROBLEMAS LIGADOS À MODELAGEM ESTÁTICA EM SEE

Neste capítulo são apresentados alguns avanços obtidos com relação à modelagem estática equivalente de componentes do SEE.

A motivação inicial para essas investigações foi determinar as relações causa-efeito dos erros de reação do equivalente. Para isso, procurou-se isolar os problemas através de exemplos tão simples quanto possível. Esse método de decomposição levou à observação de novas propriedades que permitiram reformular o processo de obtenção do equivalente, aumentando o nível de precisão e limitando o esforço computacional necessário.

### 3.1 Modelagem de Barra PV externa

Neste item analisa-se, com detalhes, como o equivalente WE modela o efeito das barras PV do sistema externo. Procura-se determinar as causas dos erros e eliminá-las. Para viabilizar esta análise as cargas não lineares (ativas e reativas), as resistências série das linhas e os "shunts" do sistema externo, serão, por enquanto, ignoradas. O sistema externo fica constituído apenas de barras PV e de barras PQ (sem carga).

### 3.1.1 Conexão radial

- Considere-se o sistema mostrado na Figura 3.1.1-1

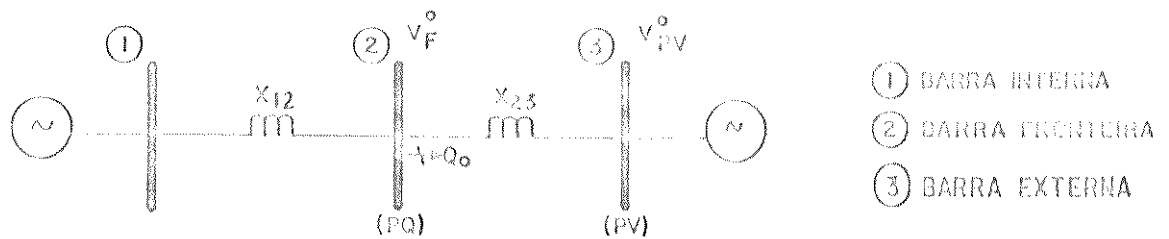


Figura 3.1.1-1

Embora extremamente simples, este sistema permite alcançar várias conclusões importantes. Inicialmente será mostrado que mesmo a versão WE com PV fictícia não modela, em geral, o efeito PV externo de modo exato. No caso em que  $V_{PV}^\circ = V_F^\circ$  o equivalente é o próprio sistema completo.

Seja o caso geral, onde  $V_{PV}^\circ \neq V_F^\circ$ . Considere-se o caso teste mostrado na Figura 3.1.1-2.

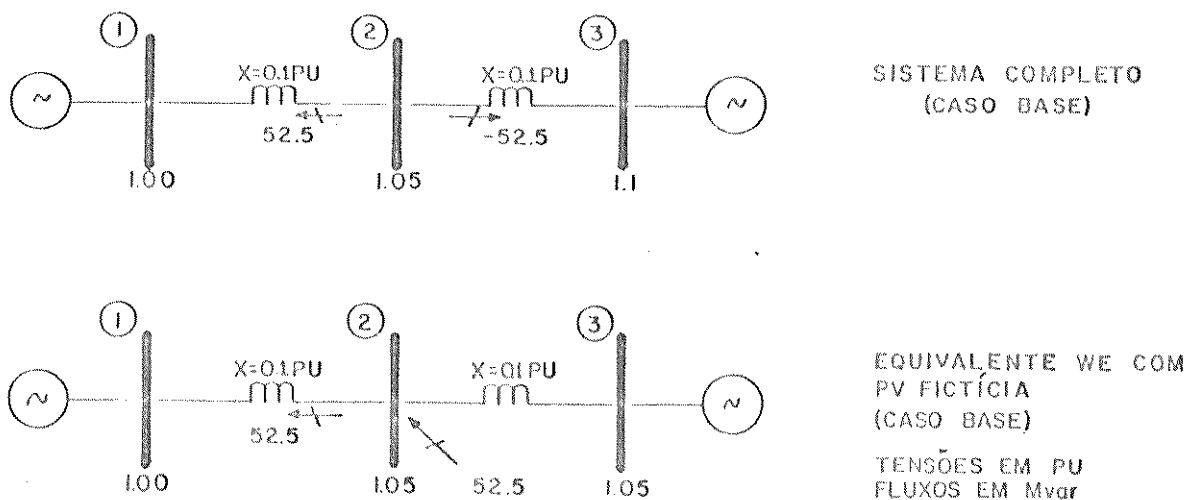


Figura 3.1.1-2



Considere-se uma perturbação no sistema interno que irá consistir em diminuir a tensão da barra  $V_1$  em 30%. Os resultados estão na tabela a seguir:

VARIÁVEIS		$V_1$	$V_2$	$Q_{21}$
CASO BASE		1,0000	1,0500	52,5
CASO	COMPLETO	0,7000	0,9000	180,00
PERTURBADO	WE COM PV FLCTFÍCIA	0,7000	0,9040	184,50

Tensões em PU  
Fluxo em Mvar

Uma análise dos resultados mostra que houve um erro na reação reativa do sistema equivalente de aproximadamente 4,5 Mvar. Conseqüentemente a tensão da barra 2 que deveria ser 0,9000 ficou em 0,9040. Conforme demonstra-se adiante, a principal fonte de erro é a diferença entre as tensões da PV externa e da barra fronteira, no caso base. O erro depende também da condição de carga do sistema interno.

O equivalente WE (versão com "shunt" equivalente) para o sistema da Figura 3.1.1-2 é mostrado na Figura 3.1.1-3.

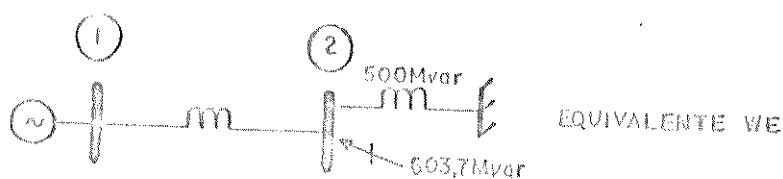


Figura 3.1.1-3

Neste equivalente o valor de  $V_2$  para o sistema perturbado é 0,9093 PU e  $Q_{21} = 190,3$  Mvar. Portanto, o erro, neste caso, aumentou. A pergunta que surge é a seguinte: É possível eliminar a PV externa sem cometer erro? A resposta, conforme se verificará, é sim.

Para analisar o problema supõe-se que devido a uma contingência, no sistema interno, a tensão  $V_F^o$  varia para  $V_F = V_F^o + \Delta V_F$ , e conseqüentemente o fluxo  $Q_{23}$  (reação do sistema externo) varia de  $Q_o$  para  $Q = Q_o + \Delta Q$ . Sendo  $X_{23} = X$ , pode-se equacionar:

$$Q_o = ((V_F^o)^2 - V_F^o V_{PV}^o) / X \quad (3.1)$$

$$Q = ((V_F^o + \Delta V_F)^2 - (V_F^o + \Delta V_F) (V_{PV}^o)) / X \quad (3.2)$$

Logo  $\Delta Q \cong Q - Q_o$ , vale

$$\Delta Q = (2\Delta V_F V_F^0 - \Delta V_F V_{PV}^0 + (\Delta V_F)^2) / X \tag{3.3}$$

Para que o equivalente seja exato ele deve produzir o mesmo  $\Delta Q$  do sistema completo, conforme mostra a Figura 3.1.1.4.

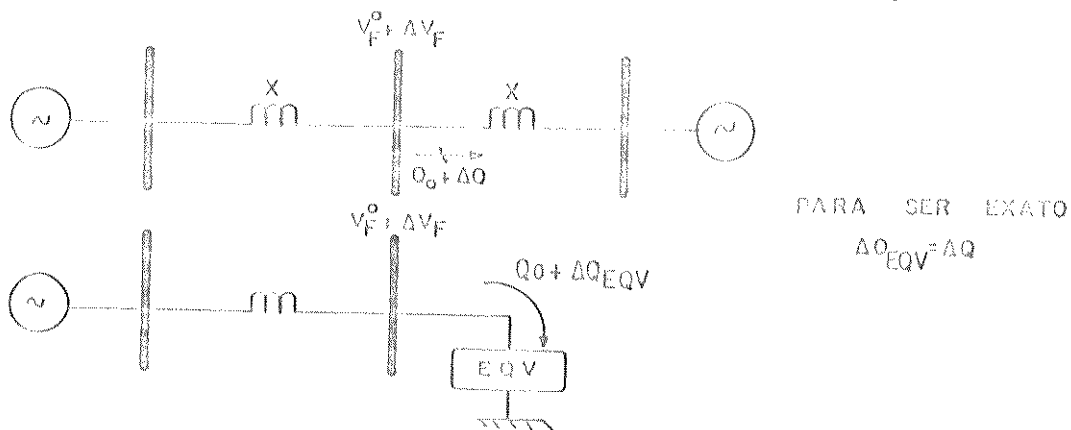


Figura 3.1.1-4

No equivalente tipo WE, a reação de PV externa é modelada conforme a Figura 3.1.1-5

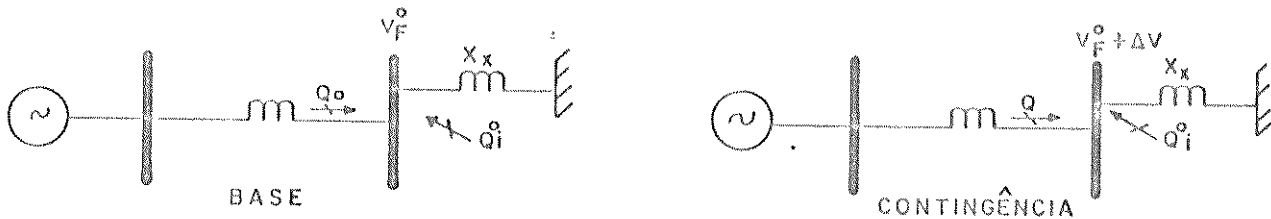


Figura 3.1.1-5

Deseja-se determinar o valor de  $X_X$  ("shunt" equivalente) de modo a termos a reação reativa do WE igual à do sistema completo (equação 3.3).

Para ajustar com o caso base deve-se ter

$$Q_i^0 = ((V_F^0)^2 / X_X) - Q_0 \text{ ou } Q_0 = ((V_F^0)^2 / X_X) - Q_i^0$$

Quando a tensão na fronteira varia

$$Q = ((V_F^o + \Delta V_F)^2 / X_X) - Q_i^o$$

como

$$\begin{aligned} \Delta Q &= Q - Q_o \Rightarrow \Delta Q = ((V_F^o + V_F)^2 / X_X) - ((V_F^o)^2 / X_X) \\ \Delta Q &= (2 \Delta V_F V_F^o + \Delta V_F^2) / X_X \end{aligned} \quad (3.4)$$

Para que o modelo WE seja exato, o  $\Delta Q$  dado por (3.4) deve ser igual ao  $\Delta Q$  dado por (3.3). Logo:

$$(2 \Delta V_F V_F^o + \Delta V_F^2) / X_X = (2 \Delta V_F V_F^o - \Delta V_F V_{PV}^o + \Delta V_F^2) / X$$

e

$$X_X = X(2 \Delta V_F V_F^o + \Delta V_F^2) / (2 \Delta V_F V_F^o - \Delta V_F V_{PV}^o + \Delta V_F^2) \quad (3.5)$$

Observando a expressão (3.5) verifica-se que o valor da reatância "shunt"  $X_X$  é função de  $\Delta V_F$ . Como o equivalente deve ser exato para qualquer contingência e  $X_X$  não pode ser definido, baseado apenas em função de grandezas do caso base, conclui-se que não é possível obter um equivalente WE exato.

O modelo WE faz as seguintes aproximações:

supondo  $V_{PV}^o \approx V_F^o$ , a expressão (3.5) fica:

$$X_X = X (2 \Delta V_F V_F^o + \Delta V_F^2) / (\Delta V_F V_F^o + \Delta V_F^2) \quad (3.6)$$

desprezando o termo de 2ª ordem  $\Delta V_F^2$ , resulta

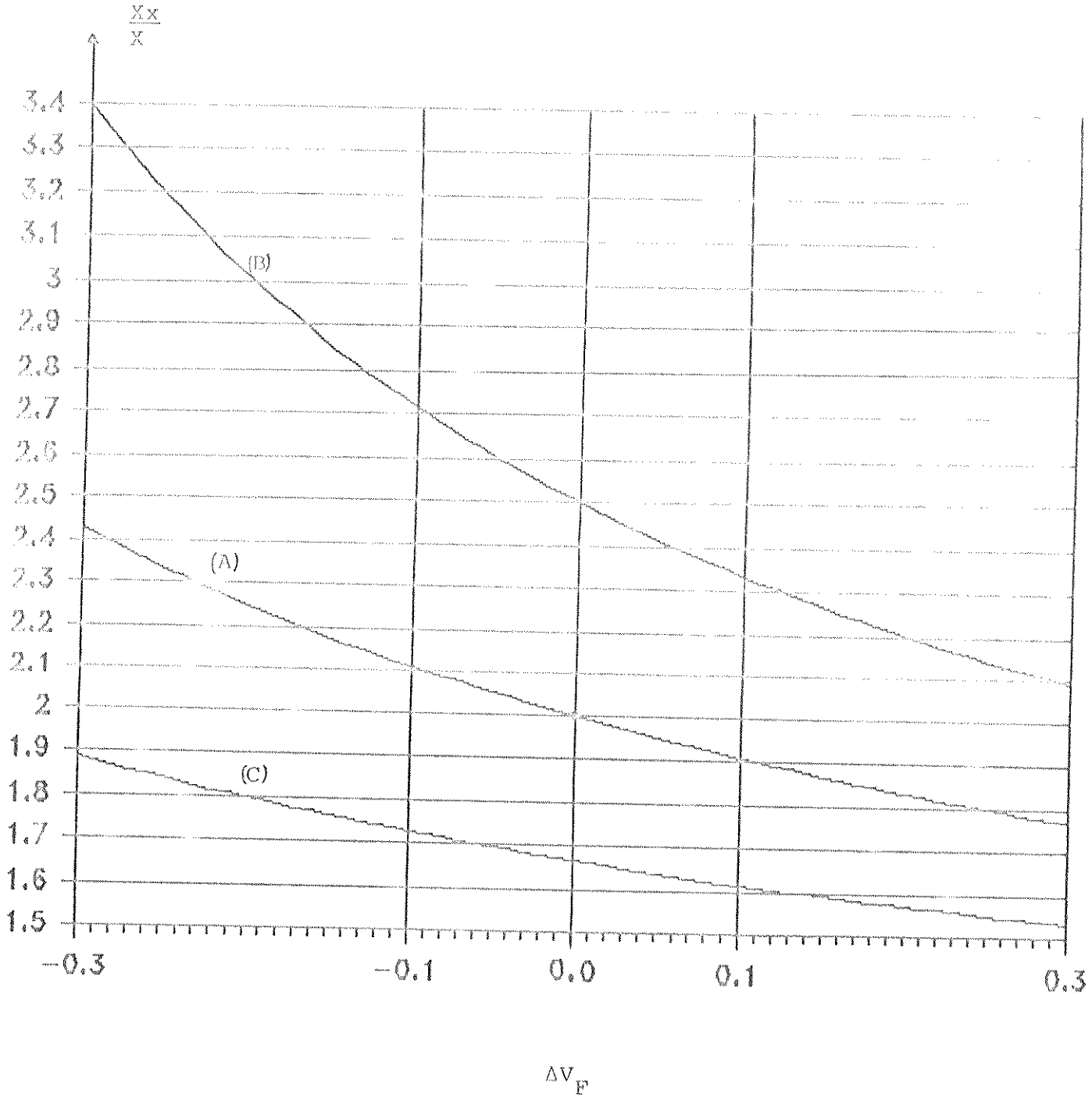
$$X_X = 2X \quad (3.7)$$

A expressão (3.7) é utilizada no equivalente WE. A Figura 3.1.1-6 mostra a variação da relação  $X_x/X$  para três valores distintos de  $V_{PV}^0$  (supondo  $V_F^0 = 1$  PU). Pode-se fazer as seguintes observações:

- i) Na curva (A) da Fig. 3.1.1-6, mostra-se o caso em que  $V_{PV}^0 = 1$  PU. Notar que quando a contingência é no sentido de baixar a tensão ( $\Delta V_F$  é negativo), o valor da reatância que reproduz exatamente a resposta reativa da barra PV externa é superior ao valor adotado pelo WE. Neste caso o modelo WE vai "segurar" demais a tensão na barra de fronteira. No caso de  $\Delta V_F$  positivo, ocorre o contrário, isto é, a reatância que reproduz exatamente a resposta reativa da barra PV externa é inferior ao calculado pelo WE. Neste caso o modelo vai "soltar" demais a tensão da barra fronteira.
- ii) Na curva (B) da Fig. 3.1.1-6, mostra-se o caso  $V_{PV}^0 > V_F^0$ . Neste caso o modelo WE sempre segura demais o valor da tensão da barra fronteira.
- iii) Na curva (C) da Fig. 3.1.1-6, observa-se que o modelo WE sempre "solta" demais a tensão da barra fronteira.

#### Introdução de termo linear

Já foi visto que, colocando na barra fronteira uma reatância que absorve reativos com o quadrado da tensão, e uma injeção fixa de Mvar não é possível reproduzir, exatamente, a reação reativa externa. Pode-se introduzir no modelo um elemento linear que absorve reativos com a primeira potência da tensão, isto é, uma carga reativa tipo  $I = cte$ . Vamos chamar este modelo de WE1. A Figura 3.1.1-7 mostra este modelo.



- (A) CURVA PARA  $V_{PV}^{\circ} = 1$  PU  
 (B) CURVA PARA  $V_{PV}^{\circ} = 1.2$  PU  
 (C) CURVA PARA  $V_{PV}^{\circ} = 0.8$  PU

Figura 3.1.1-6

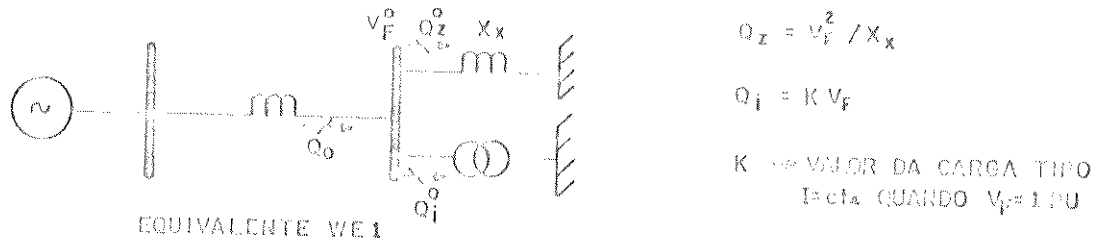


Figura 3.1.1-7

Quer-se verificar se é possível definir  $X_X$  e  $K$  de modo a resultar um equivalente exato para o sistema da Figura 3.1.1-4.

No caso base, tem-se

$$Q_O = Q_Z^o + Q_I^o$$

porém

$$Q_Z^o = (V_F^o)^2 / X_X \quad \text{e} \quad Q_I^o = K V_F^o$$

logo

$$(V_F^o)^2 / X_X + K V_F^o = Q_O \tag{3.8}$$

Segundo a Figura 3.1.1-1,  $Q_O$  é dado por:

$$Q_O = ((V_F^o)^2 - V_F^o V_{PV}^o) / X \tag{3.9}$$

Portanto para "casar" o caso básico, devemos ter:

$$(V_F^o)^2 / X_X + K V_F^o = ((V_F^o)^2 - V_F^o V_{PV}^o) / X \tag{3.10}$$

Quando a tensão na barra fronteira variar para  $V_F^0 + \Delta V_F$ , o reativo absorvido pelo equivalente WEI será:

$$Q = Q_Z + Q_I = (V_F^0 + \Delta V_F)^2 / X_X + K (V_F^0 + \Delta V_F)$$

E  $\Delta Q$  será

$$\Delta Q = Q - Q_O = (V_F^0 + \Delta V_F)^2 / X_X + K(V_F^0 + \Delta V_F) - ((V_F^0)^2 / X_X + KV_F^0)$$

$$\Delta Q = (2\Delta V_F V_F^0 + \Delta V_F^2) / X_X + K\Delta V_F \quad (3.11)$$

Para que o equivalente seja exato,  $\Delta Q$  dado por (3.11) deve ser igual ao  $\Delta Q$  dado por (3.3): Logo

$$(2\Delta V_F V_F^0 + \Delta V_F^2) / X_X + K\Delta V_F = (2\Delta V_F V_F^0 - \Delta V_F V_{PV}^0 + \Delta V_F^2) / X \quad (3.12)$$

Explicitando K na equação (3.10)

$$K = (V_F^0 - V_{PV}^0) / X - V_F^0 / X_X \quad (3.13)$$

substituindo o valor de K dado por (3.13) em (3.12) obtém-se:

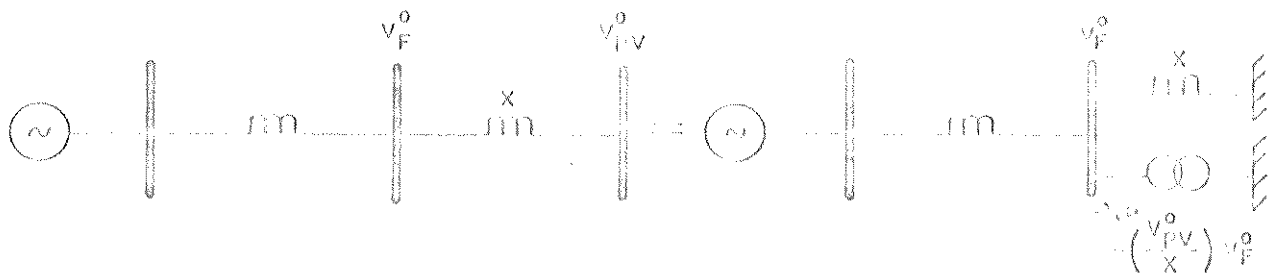
$$X_X = X \quad (3.14)$$

e substituindo este valor de  $X_X$  em (3.13), temos:

$$K = - V_{PV}^0 / X \quad (3.15)$$



As equações (3.14) e (3.15) nos permitem concluir que o equivalente reativo WE1 só depende do estado básico e portanto é exato para as condições assumidas.

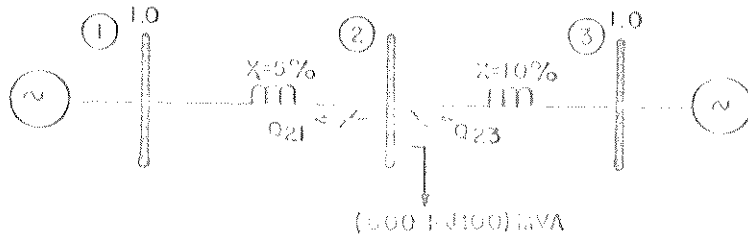


Equivalente Reativo Exato

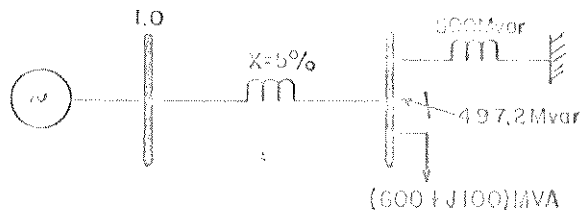
Figura 3.1.1-8

É importante lembrar que o modelo WE1 pode ser utilizado na maioria dos programas comerciais, atualmente disponíveis nas empresas, sem necessidade de adaptação. O programa POWERMOD, disponível em todas as empresas participantes do CCOI, possui a modelagem de carga ativa e reativa tipo I = cte. O programa ANAREDE desenvolvido pelo CEPEL também possui modelagem de carga tipo I = cte.

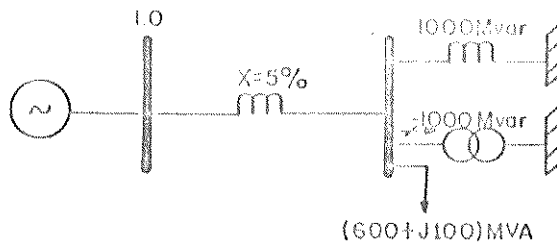
Considere-se um exemplo numérico. A Figura 3.1.1-9 mostra os casos básicos do sistema completo e dos equivalentes WE e WE1.



BASE CO. S.L.L.T.O



BASE WE



BASE WE 1

Figura 3.1.1-9

A tabela que se segue, sintetiza os resultados obtidos ao aplicar-se uma perturbação (diminuição) da tensão da barra de folga em 30%.

VARIÁVEIS		$V_1$	$\theta_1$	$V_2$	$\theta_2$	$\theta_{21}$
CASO BASE		1,000	0	0,928	-18,9	-33,4
CASO	COMPLETO	0,700	0	0,613	-44,4	137,4
PERTURBADO	WE	0,700	0	0,668	-39,9	172,6
	WE1	0,700	0	0,613	-44,4	137,4

Tensões em PU; Ângulos em graus; Fluxos em Mvar.

Com relação aos resultados obtidos neste teste pode-se destacar os seguintes pontos:

- a) A reação do WE1, conforme esperado, é exata.
- b) Em um sistema muito carregado, (como neste caso) o erro de reação reativa do WE causa erro também nos ângulos das tensões.

- Para aplicação em tempo real o equivalente WE1 requer a informação do nível de tensão das barras PV's externas. A prática operacional nas empresas, é definir o nível de tensão das barras PV's para as condições de carga máxima, média e mínima. Portanto, esta informação, assim como a topologia do sistema externo, pode ser obtida em aplicações de tempo real.

- Observa-se que o equivalente WEI, para o caso de  $N$  barras PV externas radialmente conectadas à fronteira pode ser facilmente obtido. Basta utilizar as equações (3.14) e (3.15), para cada PV e tecer, somar as susceptâncias "shunt" e somar as cargas tipo I = cte nas barras de fronteira correspondentes.

### 3.1.2 Conexão em malha

Neste item continua-se a analisar apenas a reação reativa do sistema externo. Portanto, suponha-se que o sistema externo só possui barras PV e barras PQ sem carga. As resistências série das linhas e os elementos "shunt" continuam sendo, por enquanto, ignorados.

- Seja o exemplo da Figura 3.1.2-1, onde está mostrado o caso base do sistema completo e do equivalente WE.

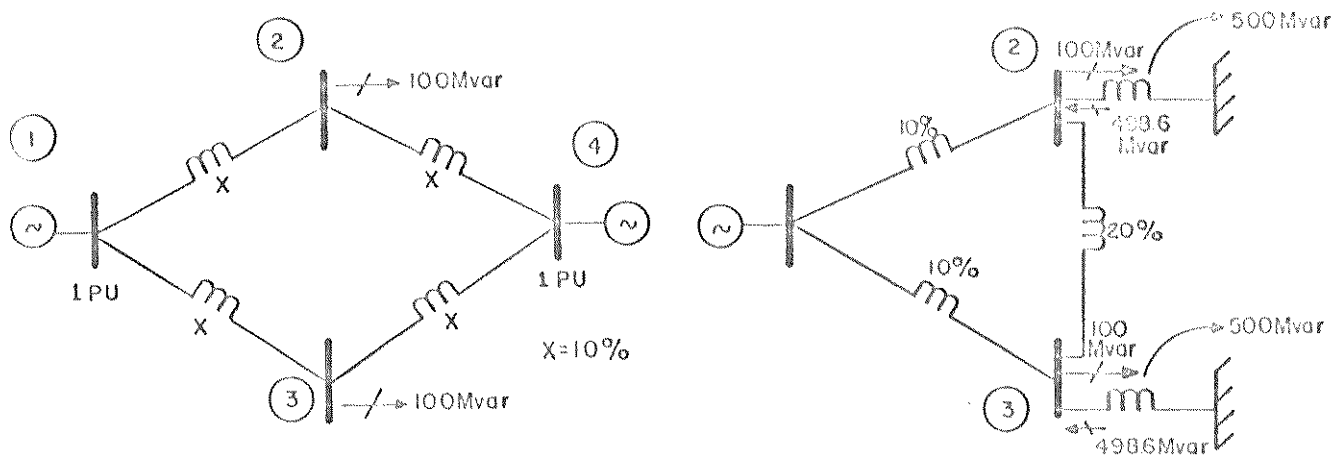


Figura 3.1.2-1

Como contingência considere-se a perda da linha entre as barras 1 e 2. Nesta contingência a ligação equivalente do modelo WE é altamente solicitada. Observa-se que contingências de variação na tensão da barra "swing" recaem nos casos já analisados no item 3.1.1.

A tabela seguinte resume os resultados encontrados:

VARIÁVEIS		$V_1$	$V_2$	$V_3$	$Q_{21}$	$Q_{31}$	$Q_{34}$	$Q_{32}$
CASO BASE		1,000	0,9472	0,9472	-50,0	-50,0	-50,0	-
CASO	COMPLETO	1,000	0,8873	0,9472	-	-50,0	-50,0	-
PERTUR-								
BADO	WE	1,000	0,9084	0,9393	-	-57,0	-	14,5

Analisando os resultados da tabela, verifica-se que no sistema completo a contingência só afeta a tensão da barra 2. Isto é natural, pois não há qualquer ligação, sob a ótica da potência reativa, entre a barra 2 e 3, em função da presença, no sistema externo, da barra 4, que é tipo PV. O equivalente WE introduz no modelo equivalente uma ligação para a potência reativa entre as barras 2 e 3. Esta ligação possui, neste caso, uma reatância  $x = 20\%$ . Esta ligação contribui para introduzir erros na resposta reativa do equivalente. Observa-se na tabela:

$Q_{32} = 14,5$  MVar (deveria ser zero).

- Uma alternativa para resolver este problema, seria considerar a reatância da linha equivalente como infinita para a potência reativa. Isto pode ser implementado facilmente em um programa de fluxo de carga desacoplado, considerando-se dois tipos de linhas: Linhas Q, usadas no cálculo ativo e reativo e linha P, usadas apenas no cálculo ativo. Vamos ilustrar esta idéia em um exemplo simples, conforme ilustrado em 3.1.2-2.

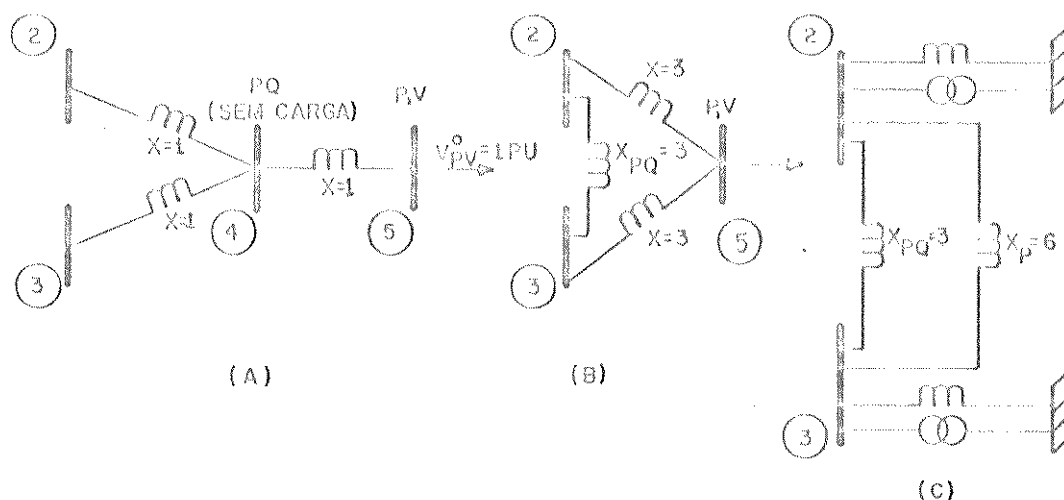


Figura 3.1.2 -2.

A Figura 3.1.2-2 mostra que a idéia é gerar os 2 conjuntos de linhas equivalentes. As ligações entre barras fronteiras provenientes da eliminação das PQ externas são linhas PQ, para potência ativa e reativa.

As linhas adicionais provenientes da eliminação das PV's do sistema externo são linhas apenas para a potência ativa. No exemplo da Figura 3.1.2-2, temos  $X_{PQ}$  (linha normal) = 3 PU e  $X_P$  (linha "só p") = 6 PU. No caso anterior da (Figura 3.1.2-1) a rede tem apenas a linha "só p" com  $\chi = 20\%$ .

Em um programa de Fluxo de carga desacoplado o conjunto de linhas "só p" pode ser facilmente implementado da seguinte forma:

- a) inclua as linhas "só p" na formação de  $B'$ .
- b) Considere as linhas "só p" no cálculo do "mismatch" ativo ( $\Delta P$ ) nas barras de roteira. Ignore as linhas "só p" no cálculo do "mismatch" reativo  $\Delta Q$ .

A Figura 3.1.2-3 mostra o equivalente que incorpora a idéia da linha "só p", designado temporariamente como WE2.

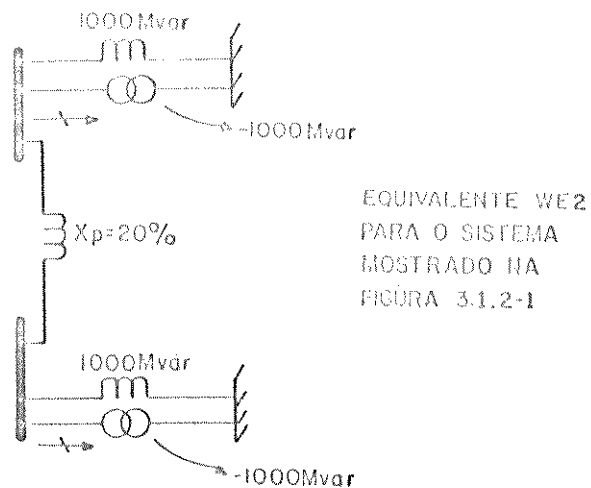


Figura 3.1.2-3

A tabela seguinte mostra uma comparação entre os equivalentes WE e WE2, para o exemplo da Figura 3.1.2-1. A perturbação considerada é a perda da linha 1-2.

VARIÁVEIS		$v_1$	$v_2$	$v_3$	$Q_{21}$	$Q_{31}$	$Q_{34}$	$Q_{32}$
CASO BASE		1,000	0,9472	0,9472	-50,0	-50,0	-50,0	-
CASO COMPLETO		1,000	0,8873	0,9472	-	-50,0	-50,0	-
PERTURBADO	WE	1,000	0,9084	0,9393	-	-57,0	-	14,5
	WE2	1,000	0,8873	0,9472	-	-50,0	-	0

O equivalente WE2, para o caso da tabela anterior, é mostrado na Figura 3.1.2-4, que se segue:

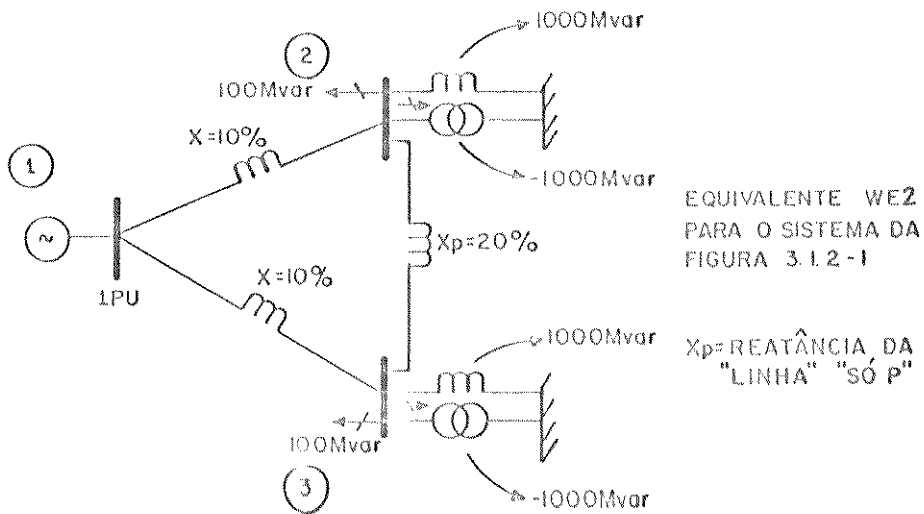


Figura 3.1.2-4

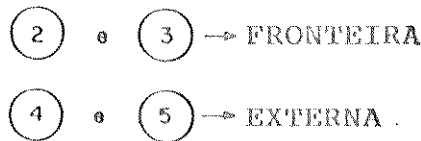
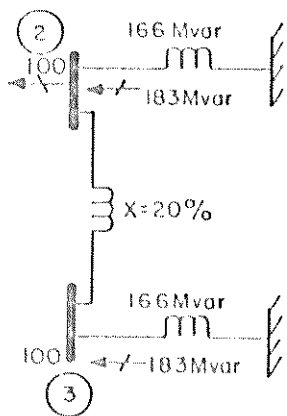


Observando os resultados da tabela anterior verifica-se que a resposta do equivalente WE2 é exata. Isto pode ser explicado da seguinte forma:

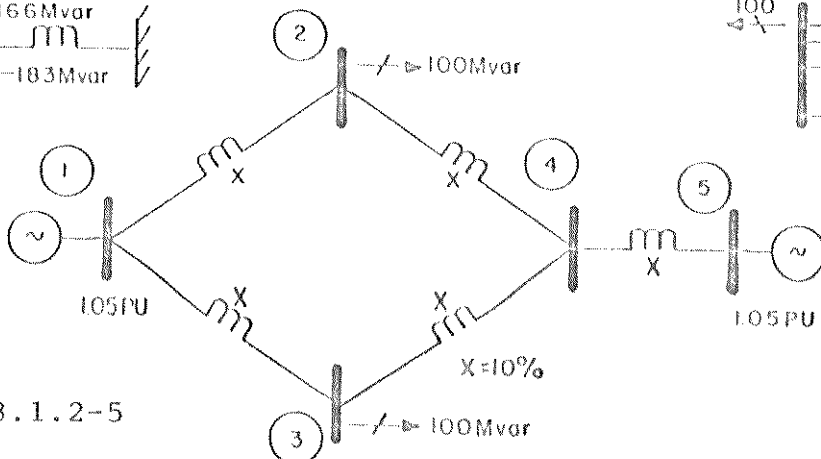
- a) A reação reativa dos "chunts" equivalentes na barra 2, (reator de 1000 Mvar e carga I = cte de -1000 Mvar) reduz exatamente a reação reativa que a barra 4, do sistema completo exerce sobre a barra 2. Este fato foi demonstrado no item 3.1.1.
- b) A ligação reativa de  $x = 20\%$ , existente no WE, é substituída, no WE2, por uma "ligação"  $x_p = 20\%$ . Como, por definição, esta linha só conduz potência ativa o isolamento reativo, entre as barras 2 e 3 é preservado.

Será útil analisarmos um exemplo um pouco mais geral, como no exemplo da Figura 3.1.2-5. Observa-se que a ligação equivalente entre as barras 2 e 3 no modelo WE é uma linha com  $x = 20\%$ . No modelo WE2 temos uma linha com  $x_{pq} = 30\%$  (ligação ativa e reativa) e uma ligação  $x_p = 60\%$  (ligação apenas para a potência ativa). A Figura 3.1.2-5 mostra o caso básico para o sistema completo e para os equivalentes WE e WE2.

(a) EQUIVALENTE WE



(c) SISTEMA COMPLETO



(b) EQUIVALENTE WE2

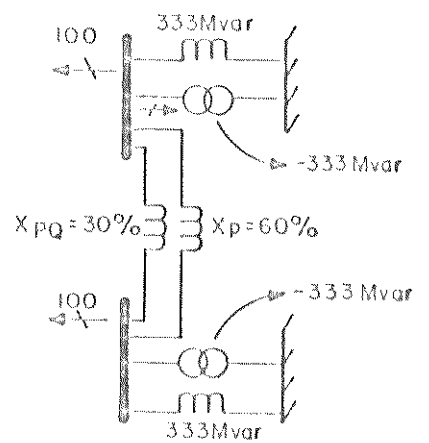


Figura 3.1.2-5

Considere-se como contingência a perda da linha 1-2. Nesta contingência as linhas equivalentes do sistema são bastante solicitadas. Os resultados estão resumidos na tabela seguinte:

VARIÁVEIS		$V_1$	$V_2$	$V_3$	$Q_{21}$	$Q_{31}$	$Q_{34}$	$Q_{23}$	$Q_{G1}$
CASO BASE		1,0500	0,9719	0,9729	-75,0	-75,0	-25,0	-	161,9
SISTEMA COMPLETO		1,0500	0,8083	0,9377	-	105,2	5,34	-	117,9
PERDIDO WE		1,0500	0,8494	0,9378	-	105,2		-37,5	117,8
TURBADO WE2		1,0500	0,8083	0,9377	-	105,3	-	-34,9	117,9

Uma análise dos resultados da tabela permite destacar os seguintes fatos:

- O equivalente WE2 reproduz exatamente a reação reativa do sistema externo.
- A diferença fundamental, neste caso, entre os modelos WE e WE2 estão na tensão  $V_2$  e no fluxo  $Q_{23}$ . Isso mostra que a reatância de  $x_{PQ}=30\%$  para a potência reativa é mais adequado que  $x = 20\%$ .

É importante observar que, dentro das hipóteses adotadas, a eliminação das barras PQ (sem carga) do sistema externo não introduz erros de reação. No item 3.1.4 iremos examinar um caso mais geral com mais de uma barra PQ e PV no sistema

externo. Antes, porém, será útil analisar alguns aspectos no tocante aos resultados até agora apresentados. Isto é feito no item que se segue.

3.1.3 Representação exata de barra LV externa - Modelo WRE

As equações 3.14 e 3.15 podem ser aplicadas ao caso de m barras conectadas radialmente à fronteira. Conforme mostrado na Figura 3.1.3-1.

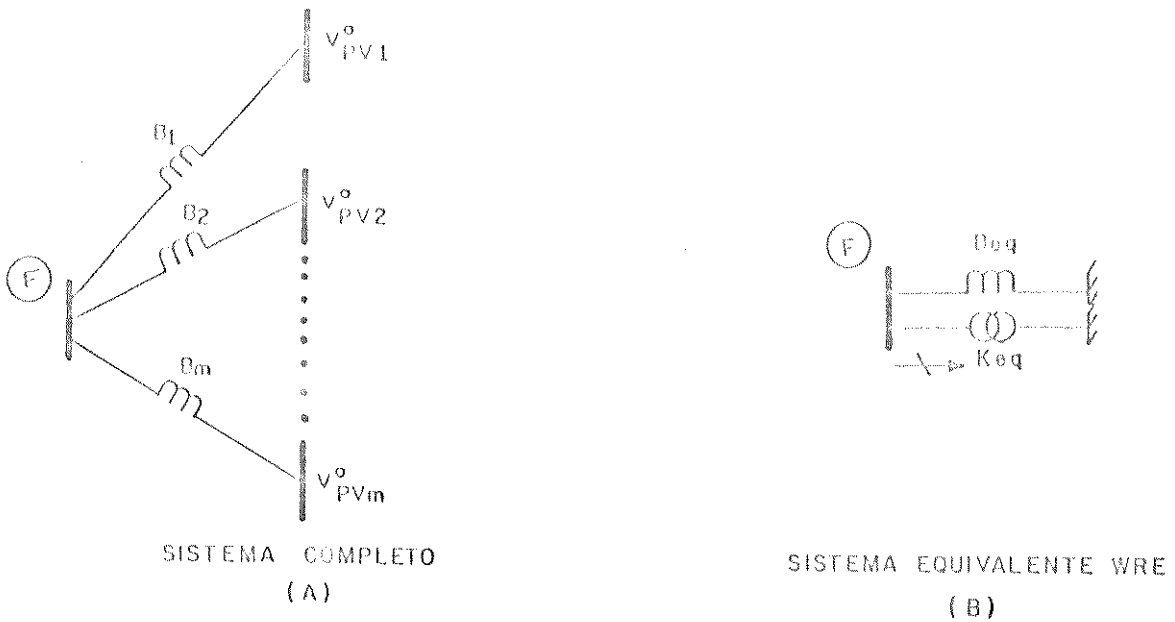


Figura 3.1.3-1

neste caso

$$B_{eq} = \sum_{i=1}^m B_i \tag{3.16}$$

$$K_{eq} = \sum_{i=1}^m B_i V_{PVi}^o \tag{3.17}$$

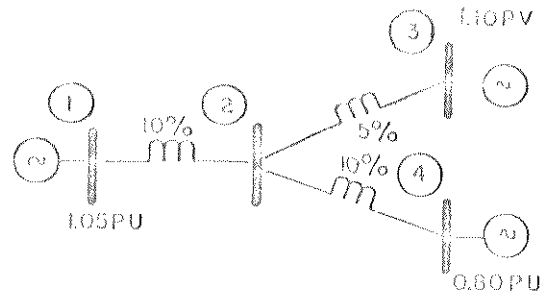
As equações (3.16) e (3.17) são decorrência imediata de (3.14) e (3.15) respectivamente. A equação (3.16) indica a susceptância equivalente ao paralelo das reatâncias dadas por (3.14). A equação (3.17) é a soma das cargas tipo I=cte dadas

pela equação (3.15). Notar que quando os  $B_i$  forem indutivos (susceptâncias negativas), o valor de  $K_{eq}$  será negativo (carga negativa). Vale destacar na Figura 3.1.3-1 e nas equações (3.16) e (3.17) os seguintes pontos:

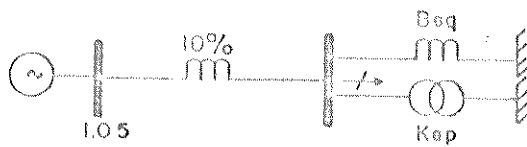
- O equivalente WE possui um elemento (injeção equivalente) que não varia com a tensão da barra fronteira. Conseqüentemente quando o estado da fronteira varia a injeção equivalente precisa ser recalculada. O equivalente WRE por outro lado "casa" automaticamente com o caso básico. Não necessita a etapa de casamento na fronteira para a representação do efeito PV externo.
- Notar que o lado (b) da Figura 3.1.3-1 pode ser interpretado como o equivalente de uma única barra PV externa. Esta PV se liga com a fronteira através de uma susceptância  $B_{eq}$  e tem como tensão de operação  $V_{PV} = K_{eq} / B_{eq}$ . Logo, o modelo WRE pode funcionar com um programa de fluxo de carga que não tenha modelagem de carga reativa tipo  $I=cte$ . Basta usar o artifício de adicionar, para cada fronteira, uma PV fictícia. Esta PV fictícia se conecta com a fronteira através da susceptância  $B_{eq}$ , dada por (3.16) e tem um nível de tensão dado por:

$$V_{PVe}^{\circ} = \frac{K_{eq}}{B_{eq}} = \frac{\sum_{i=1}^m B_i V_{PVi}^{\circ}}{\sum_{i=1}^m B_i} \quad (3.18)$$

A tensão de operação da PV fictícia corresponde à média das tensões PV externas, ponderada pelas susceptâncias das ligações com a fronteira. A Figura 3.1.3-2 exemplifica esta versão do equivalente WRE.



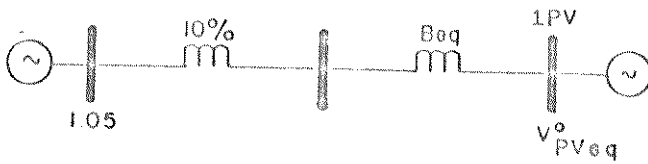
(a) SISTEMA COMPLETO



(b) EQUIVALENTE WRE

$$B_{dq} \text{ (PU)} = (-20 - 10) = -30 \rightarrow -3000 \text{ Mvar}$$

$$K_{eq} = (-20 \times 1) - 10 \times 0.8 = -30 \rightarrow -3000 \text{ Mvar}$$



(c) EQUIVALENTE WRE COM PV FICTÍCIA

$$V_{PVeq}^o = K_{eq} / B_{dq} = -30 / -30 = 1 \text{ PU}$$

Os sistemas (a), (b) e (c) são exatamente equivalentes do ponto de vista reativo. As duas listagens, que se seguem, mostram o caso base e contingências de ±30% na tensão da barra "swing" para o sistema completo ((a) na Figura 3.1.3-2), e para o equivalente WRE com PV fictícia ((c) na Figura 3.1.3-2), respectivamente. Notar que o equivalente WRE com PV fictícia é exatamente igual, em termos de reação reativa, ao sistema completo.

```

I ESTUDO DE FLUXO DE CARGA I
I DADOS DE SAIDA I
I TOLERANCIA PARA POTENCIA ATIVA E REATIVA 0.00010 PU I
I *** CASO BASE COMPLETO *** EXEMPLO FIGURA 3.1.3-2 *** I
I FLUXO DESACOPLADO I
I NB NL NI NIAP NREA SLACK I
I 4 3 0 0 2 1 I
I MEIAS ITERACOES 0 I
I BARRA TENSÃO DELTA HW HVAR BARRA HW HVAR HVAI I
I 1 1.0500 0.00 0.00 52.50 2 0.00 52.50 52.50 I
I 2 1.0000 0.00 0.00 -50.00 4 0.00 200.00 200.00 I
I 3 0.00 0.00 -200.00 200.00 I
I 1 0.00 -50.00 50.00 I
I 3 1.1000 0.00 0.00 220.00 2 0.00 220.00 220.00 I
I 4 0.8000 0.00 0.00 -160.00 2 0.00 -160.00 160.00 I
I *** COMPLETO *** CHANGE *** TENSÃO NA SWING 1.35PU I
I FLUXO DESACOPLADO I
I NB NL NI NIAP NREA SLACK I
I 4 3 0 0 2 1 I
I MEIAS ITERACOES 2 I
I BARRA TENSÃO DELTA HW HVAR BARRA HW HVAR HVAI I
I 1 1.3500 0.00 0.00 370.06 2 0.00 370.06 370.06 I
I 2 1.0759 0.00 0.00 -50.00 4 0.00 296.82 296.82 I
I 3 0.00 0.00 -51.90 51.90 I
I 1 0.00 -294.92 294.92 I
I 3 1.1000 0.00 0.00 53.06 2 0.00 53.06 53.06 I
I 4 0.8000 0.00 0.00 -220.71 2 0.00 -220.71 220.71 I
I *** COMPLETO *** CHANGE *** TENSÃO NA SWING 0.75PU I
I FLUXO DESACOPLADO I
I NB NL NI NIAP NREA SLACK I
I 4 3 0 0 2 1 I
I MEIAS ITERACOES 2 I
I BARRA TENSÃO DELTA HW HVAR BARRA HW HVAR HVAI I
I 1 0.7500 0.00 0.00 130.48 2 0.00 -130.48 130.48 I
I 2 0.9240 0.00 0.00 -50.00 4 0.00 114.55 114.55 I
I 3 0.00 0.00 -325.29 325.29 I
I 1 0.00 160.75 160.75 I
I 3 1.1000 0.00 0.00 387.26 2 0.00 387.26 387.26 I
I 4 0.8000 0.00 0.00 -99.18 2 0.00 -99.18 99.18 I
    
```

```

-----
I ESTUDO DE FLUXO DE CARGA
I
I DADOS DE SAIDA **EXEMPLO TITULO 3.1.3-2**
I TOLERANCIA PARA POTENCIA ATIVA E REATIVA 0.00010 PU
I
I ***SISTEMA EQUIVALENCIADO *** EQUIVALENTE WRE ***
I *****
I *** CASO BASE *** EQUIVALENCIADO ***
I *****
I FLUXO DESACOPLADO
I NB NL NI NIAP NREA SLACK
I 3 2 0 0 1 1
I
I REIAS ITERACOES 0
I
I BARRA TENSAO DELTA MW HVAR-----BARRA MW HVAR HVA
I 1 1.0500 0.00 0.00 52.50 ----- 2 0.00 52.50 52.50
I 2 1.0000 0.00 0.00 -50.00 ----- 3 0.00 0.00 0.00
I 3 1.0000 0.00 0.00 0.00 ----- 1 0.00 -50.00 50.00
I 2 0.00 0.00 0.00
I
I *** SISTEMA EQUIVALENCIADO **EQ. WRE** TENSAO NA SWING 1.05PU
I
I FLUXO DESACOPLADO
I NB NL NI NIAP NREA SLACK
I 3 2 0 0 1 1
I
I REIAS ITERACOES 2
I
I BARRA TENSAO DELTA MW HVAR-----BARRA MW HVAR HVA
I 1 1.3500 0.00 0.00 370.06 ----- 2 0.00 370.06 370.06
I 2 1.0759 0.00 0.00 -50.00 ----- 3 0.00 244.92 244.92
I 3 1.0000 0.00 0.00 -227.65 ----- 1 0.00 -274.92 274.92
I 2 0.00 -227.65 227.65
I
I *** SISTEMA EQUIVALENCIADO ** EQ. WRE** TENSAO NA SWING .75PU
I
I FLUXO DESACOPLADO
I NB NL NI NIAP NREA SLACK
I 3 2 0 0 1 1
I
I REIAS ITERACOES 2
I
I BARRA TENSAO DELTA MW HVAR-----BARRA MW HVAR HVA
I 1 0.7500 0.00 0.00 -130.48 ----- 2 0.00 -130.48 130.48
I 2 0.9240 0.00 0.00 -50.00 ----- 3 0.00 -210.74 210.74
I 3 1.0000 0.00 0.00 228.09 ----- 1 0.00 160.75 160.75
I 2 0.00 228.08 228.08
I
-----

```

### 3.1.4 Algoritmo para obtenção do modelo WRE

A obtenção do modelo WRE para um sistema externo com  $m$  barras PQ e  $n$  barras PV, conforme mostrado na parte (b) da Figura 3.1.4-1, pode ser realizada nas seguintes fases:

- a) Formação da matriz  $Y_B$  das barras fronteira e externas, e eliminação das  $m$  barras PQ do sistema externo. As linhas que surgirem entre as barras fronteira farão parte do conjunto de linhas equivalentes PQ, para potência ativa e reativa.
- b) Cálculo para cada barra fronteira, do "shunt" equivalente ( $B_{eq}$ ) e a carga reativa tipo I-cte ( $K_{eq}$ ). Para tanto use as equações (3.16) e (3.17). As barras PV que não estiverem diretamente conectadas com a fronteira, conforme mostrado na Figura 3.1.3-1, não são consideradas no somatório para cálculo de  $B_{eq}$  e  $K_{eq}$ .
- c) Continue com o processo de eliminação, eliminando as  $n$  barras PV do sistema externo. As linhas que aparecem entre as barras de fronteira são as "ligações" "só P".
- d) Não é necessário o casamento do equivalente com o caso base. Ele já está automaticamente casado.
- e) Se desejar o WRE com PV fictícia, use a equação 3.18.



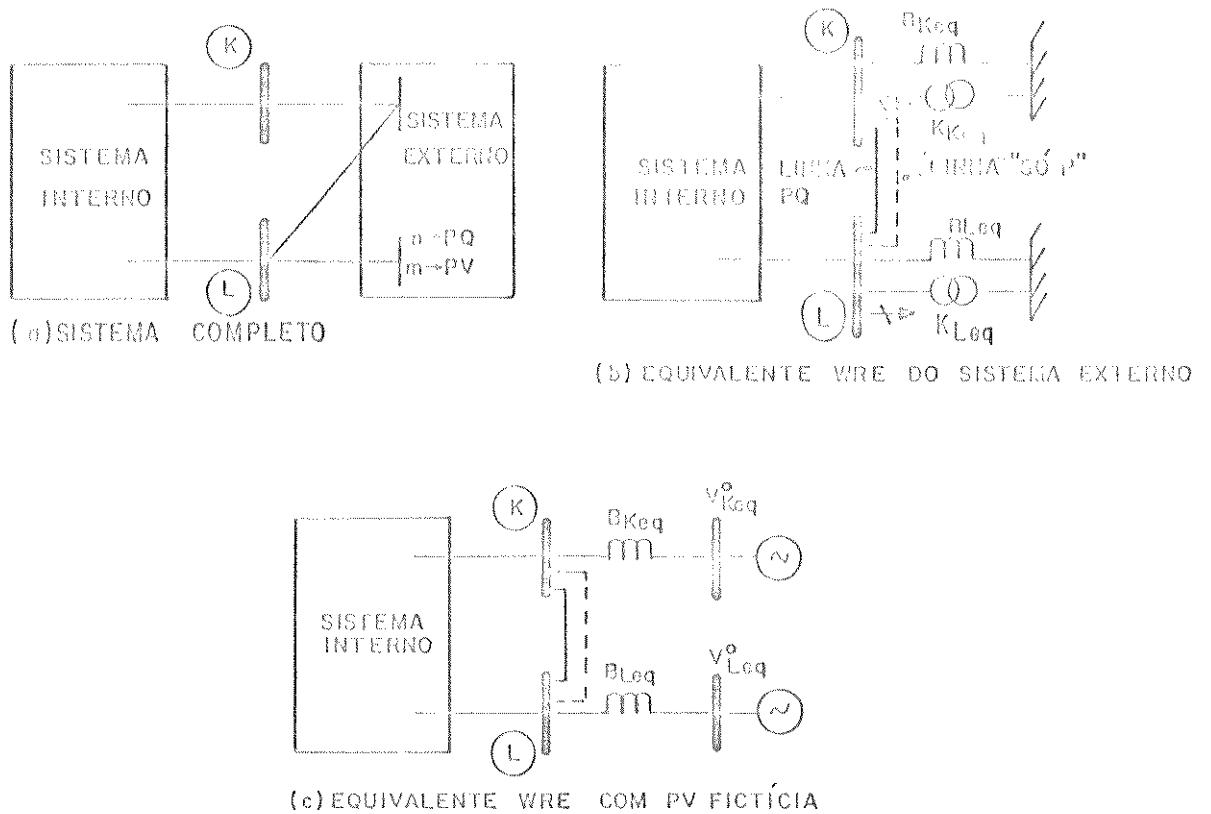
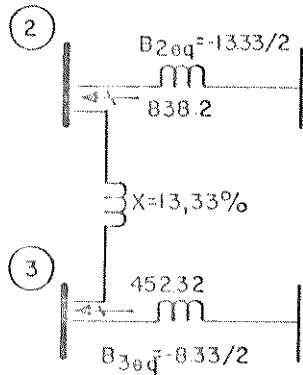
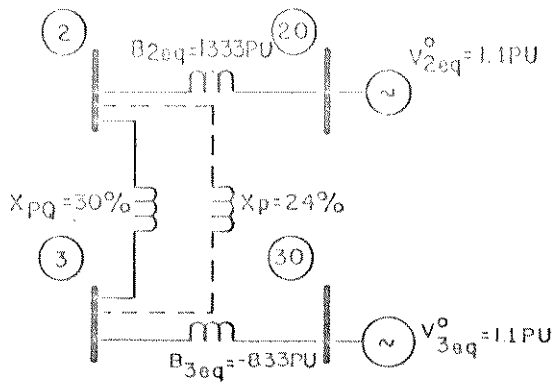
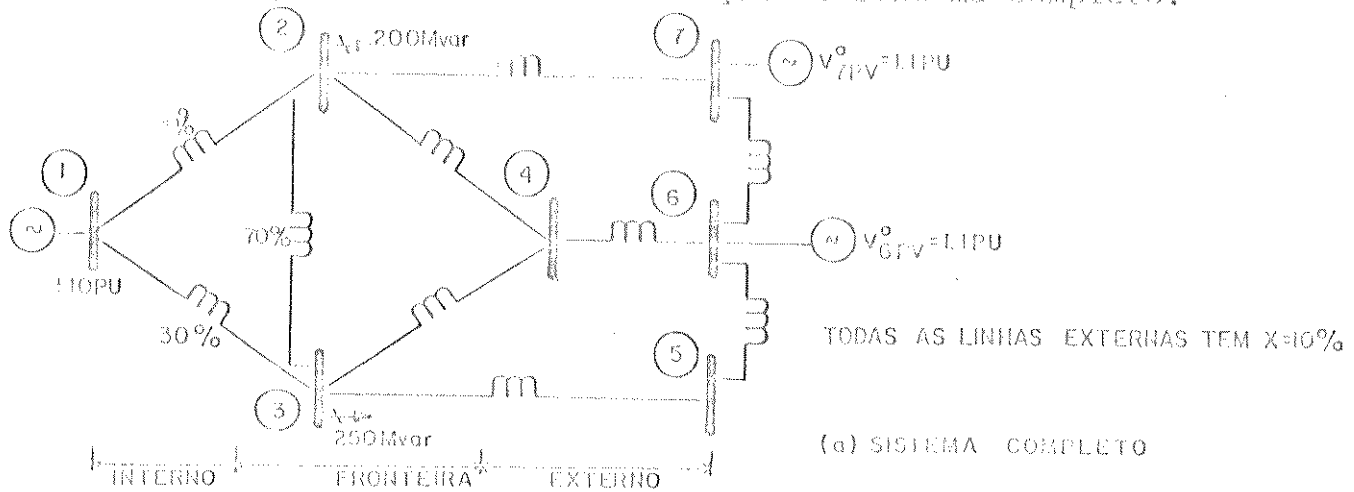


Figura 3.1.4-1

Para exemplificar, considere-se a obtenção do equivalente WRE com PV fictícia para o sistema mostrado na Figura 3.1.4-2. Para testar a precisão do equivalente foi realizada uma contingência de perda da linha 1 - 2. A listagem 3.1.4-1 mostra o caso base do sistema completo, do equivalente WE, e do equivalente WRE com PV fictícia. Notar que o modelo equivalente WRE com PV fictícia não necessita de "casamento" com o estado do caso base. Observa-se que no caso base do equivalente WRE (versão com PV fictícia) a primeira linha entre as barras 2 e 3 é uma linha "só P" indicada na listagem pelo símbolo "P...". A listagem 3.1.4-2 mostra os resultados para a contingência de perda da linha 1 - 2. Notar que o modelo WE apresenta erros

para a tensão nas barras de fronteira. O modelo WRE (com PV fictícia) reproduz exatamente a equação do sistema completo.



"SHUNTS" EM PU  
INJEÇÕES EM Mvar

Figura 3.1.4-2

ESTUDO DE FLUXO DE CARGA  
 DADOS DE SAÍDA EXEMPLO DA FIGURA 3.1.4-2\*\*  
 TOLERANCIA PARA POTENCIA ATIVA E RELATIVA 0.00010 PU

\*\*\* CASO BASE SISTEMA COMPLETO \*\*\*

NO	NL	NI	NIAP	AREA	SLACK	BARRA	MW	MVAR	MVAI
MEIAS LIRACOES			3						
BARRA	TENSAO	DELTA		MW	MVAR	BARRA	MW	MVAR	MVAI
1	1.1000	0.00		0.00	189.09	3	0.00	73.16	73.161
						2	0.00	115.93	115.931
6	1.1000	0.00		0.00	221.55	7	0.00	0.00	0.001
						5	0.00	109.74	109.741
7	1.1000	0.00		0.00	115.93	4	0.00	111.00	111.001
						6	0.00	0.00	0.001
2	0.9946	0.00		0.00	-200.00	2	0.00	115.93	115.931
						7	0.00	-104.82	104.821
						4	0.00	-3.73	3.731
						3	0.00	13.38	13.381
3	0.9005	0.00		0.00	-250.00	1	0.00	-104.82	104.821
						5	0.00	-89.84	89.841
						4	0.00	-88.15	88.151
						2	0.00	-12.11	12.111
4	0.9984	0.00		0.00	0.00	1	0.00	-59.89	59.891
						6	0.00	-101.47	101.471
						3	0.00	97.73	97.731
5	1.0002	0.00		0.00	0.00	2	0.00	3.74	3.741
						6	0.00	-99.79	99.791
						3	0.00	99.79	99.791

\*\*\* CASO BASE EQUIVALENTE WORD EXTENDIDO

NO	NL	NI	NIAP	AREA	SLACK	BARRA	MW	MVAR	MVAI
MEIAS LIRACOES			3						
BARRA	TENSAO	DELTA		MW	MVAR	BARRA	MW	MVAR	MVAI
1	1.1000	0.00		0.00	189.06	3	0.00	73.14	73.141
						2	0.00	115.92	115.921
2	0.9946	0.00		0.00	638.20	3	0.00	70.20	70.201
						3	0.00	13.37	13.371
3	0.9005	0.00		0.00	202.30	1	0.00	-104.81	104.811
						2	0.00	-63.55	63.551
						2	0.00	-12.11	12.111
						1	0.00	-59.88	59.881

\*\*\* CASO BASICO EQUIVALENTE WRE (VERSÃO COM PV FICTICIA) \*\*\*

NO	NL	NI	NIAP	AREA	SLACK	BARRA	MW	MVAR	MVAI
MEIAS LIRACOES			3						
BARRA	TENSAO	DELTA		MW	MVAR	BARRA	MW	MVAR	MVAI
1	1.1000	0.00		0.00	189.11	3	0.00	73.17	73.171
						2	0.00	115.95	115.951
2	0.9946	0.00		0.00	-200.00	3	0.00	0.00	0.001
						20	0.00	-139.74	139.741
						3	0.00	31.21	31.211
						3	0.00	13.38	13.381
3	0.9005	0.00		0.00	-249.99	1	0.00	-104.84	104.841
						2	0.00	0.00	0.001
						30	0.00	-149.73	149.731
						2	0.00	-28.26	28.261
						2	0.00	-12.11	12.111
20	1.1000	0.00		0.00	154.55	1	0.00	-59.89	59.891
30	1.1000	0.00		0.00	182.92	2	0.00	154.55	154.551
						3	0.00	182.92	182.921

\*\*\* LISTAGEM 3.1.4-1 \*\*\*

TESTE COMPLETO SEM LINHA 1-2										
NB	NL	NI	NIAP	BREA	SLACK		BARRA	NW	HVAR	NVAI
METAS ITERACOES				4						
BARRA	TENSAO	DETA	NW	HVAR	BARRA	NW	HVAR	NVAI		
1	1.1000	0.00	0.00	82.95	3	0.00	82.95	82.95		
6	1.1000	0.00	0.00	273.22	7	0.00	0.00	0.00		
					5	0.00	124.42	124.42		
7	1.1000	0.00	0.00	197.57	4	0.00	140.00	140.00		
					6	0.00	0.00	0.00		
2	0.9204	0.00	0.00	-200.00	2	0.00	197.58	197.58		
					7	0.00	-165.31	-165.31		
					4	0.00	-40.81	-40.81		
3	0.8738	0.00	0.00	-250.00	3	0.00	6.13	6.13		
					5	0.00	-98.93	-98.93		
					4	0.00	-72.46	-72.46		
					2	0.00	-5.02	-5.02		
4	0.9647	0.00	0.00	0.00	1	0.00	-65.89	-65.89		
					6	0.00	-130.50	-130.50		
					3	0.00	82.73	82.73		
5	0.9869	0.00	0.00	0.00	2	0.00	42.77	42.77		
					6	0.00	-111.62	-111.62		
					3	0.00	111.62	111.62		
EQUIVALENTE DE CONDUTANCIA SEM A LINHA 1-2										
NB	NL	NI	NIAP	BREA	SLACK		BARRA	NW	HVAR	NVAI
METAS ITERACOES				4						
BARRA	TENSAO	DETA	NW	HVAR	BARRA	NW	HVAR	NVAI		
1	1.1000	0.00	0.00	83.09	3	0.00	83.09	83.09		
2	0.9369	0.00	0.00	638.20	3	0.00	44.61	44.61		
					3	0.00	8.50	8.50		
3	0.8734	0.00	0.00	202.30	2	0.00	-41.59	-41.59		
					2	0.00	-7.92	-7.92		
					1	0.00	-65.97	-65.97		
EQUIVALENTE WRE COM PV FICTICIA SEM A LINHA 1-2										
NB	NL	NI	NIAP	BREA	SLACK		BARRA	NW	HVAR	NVAI
METAS ITERACOES				4						
BARRA	TENSAO	DETA	NW	HVAR	BARRA	NW	HVAR	NVAI		
1	1.1000	0.00	0.00	82.95	3	0.00	82.95	82.95		
2	0.9204	0.00	0.00	-200.00	P...	3	0.00	0.00	0.00	
						20	0.00	-220.41	-220.41	
						3	0.00	14.29	14.29	
3	0.8738	0.00	0.00	-250.00	P...	3	0.00	6.12	6.12	
						2	0.00	0.00	0.00	
						30	0.00	-164.73	-164.73	
						2	0.00	-13.56	-13.56	
						2	0.00	-5.01	-5.01	
						1	0.00	-65.89	-65.89	
20	1.1000	0.00	0.00	263.43		2	0.00	263.43	263.43	
30	1.1000	0.00	0.00	207.38		3	0.00	207.38	207.38	

\*\*\* LISTAGEM 3.1.4-2 \*\*\*

### 3.2 Modelagem de elemento "shunt" externo

Em equivalentes do tipo Ward, a representação dos elementos "shunt" do sistema externo é uma questão essencial e que apresenta vários problemas. Tinney reporta que após o processo de redução podem aparecer valores anormais nas admitâncias equivalentes. Deckmann [9] apresenta uma síntese dos problemas oriundos da representação dos "shunts", analisa as alternativas de modelagem, e mostra como o equivalente WE resolve estes problemas. Neste item demonstra-se que o modelo WE ainda apresenta deficiências na modelagem dos elementos "shunts". Apresenta-se um novo enfoque à essa questão e mostra-se como as deficiências do WE podem ser resolvidas.

É importante observar que nos artigos que descrevem testes em equivalentes [13] a rede externa no caso completo é representada como cargas ativas e reativas que independem da tensão. Nestes artigos os "shunts" são devidos exclusivamente às susceptâncias capacitivas das linhas e aos reatores de compensação "shunt". Este fato minimiza a importância pois não aparecem no sistema completo, os "shunts" devido às cargas do sistema. A tabela 3.2 - 1 mostra a característica das cargas do sistema norte/nordeste. Observa-se que a carga reativa é constituída de 100%  $Z = cte$ , e a carga ativa é em grande parte 50%  $Z = cte$ .

## DISTRIBUIÇÃO DA CARGA EM FUNÇÃO DA TENSÃO

ÁREA	CARGA ATIVA	CARGA REATIVA
CENTRO	70% Z + 30% P	100% Z
SUL	50% Z + 50% P	100% Z
LESTE	50% Z + 50% P	100% Z
NORTE	60% Z + 40% P	100% Z
OESTE	50% Z + 50% P	100% Z
MARANHÃO	70% Z + 30% P	100% Z
TUCURUÍ	60% Z + 40% P	100% Z
BELÉM	60% Z + 40% P	100% Z

TABELA 3.2 - 1

### 3.2.1 "Shunt" em sistema radial

Considere-se, neste item, que o sistema externo é constituído de barras PV, barras PQ (sem cargas não lineares) e elementos "shunt" como mostrado na Figura 3.2.1-1:

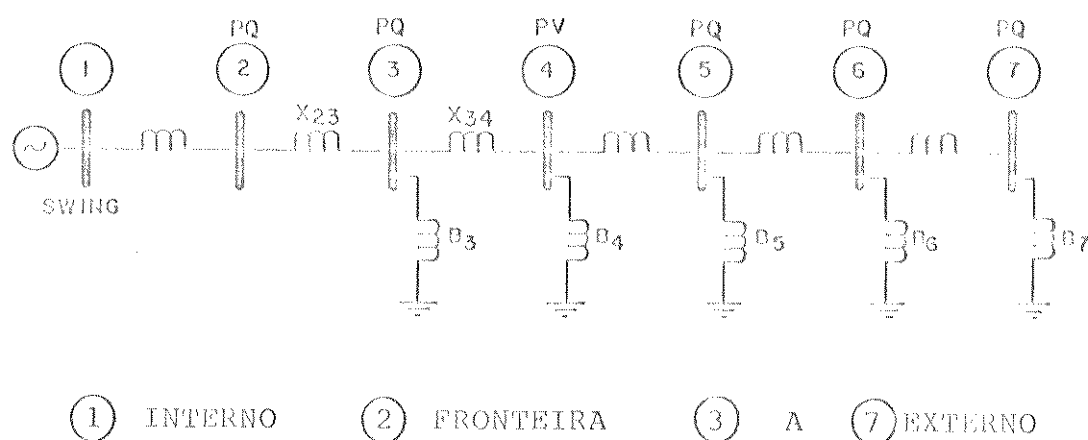


Figura 3.2.1-1

Este sistema é utilizado [9] para ilustrar os problemas decorrentes da eliminação dos "shunts" externos. Como a barra 4 é PV, os "shunts" B<sub>4</sub>, B<sub>5</sub>, B<sub>6</sub> e B<sub>7</sub> estão isolados (do ponto de vista reativo) da fronteira. Pode-se, portanto, reduzir o sistema de interesse para o sistema (a) na Figura 3.2.1-2.

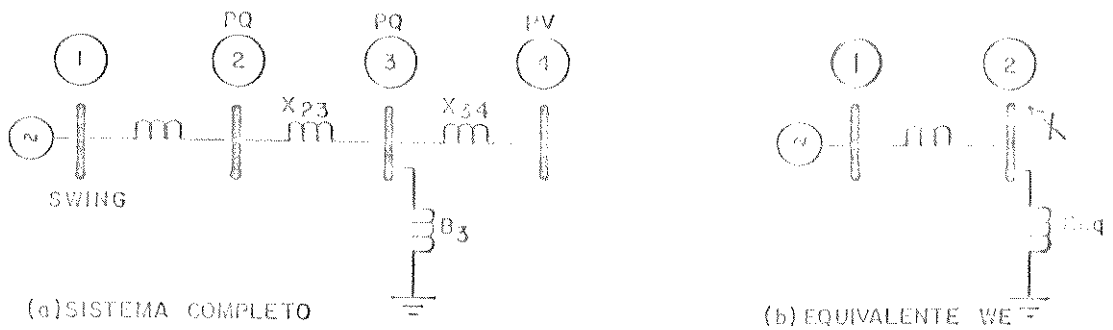


Figura 3.2.1-2

Na parte (b) da Figura 3.2.1-2 temos o equivalente WE. O equivalente WE o "shunt" é calculado da seguinte forma:

- i) Aterra-se a barra 4 (PV);
- ii) Reduz-se a barra 3;
- iii) Divide-se a susceptância "shunt" que aparece na barra 2 por um fator 2.

Com estas operações (sendo  $x_{3s}$  a reatância do "shunt"  $B_3$ ) a reatância "shunt" equivalente vale:

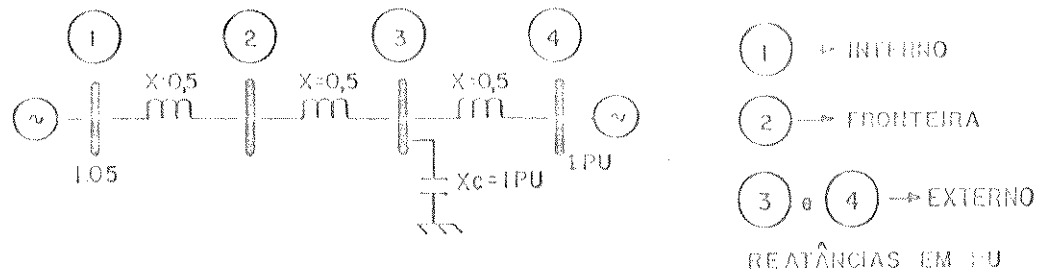
$$x_{2eq} = 2 \left[ x_{23} + (x_{3s} // x_{34}) \right] = 2x_{23} + 2(x_{3s}x_{34}) / (x_{3s} + x_{34}) \quad (3.19)$$

Como se está interessado na reação do "shunt", supõe-se, por enquanto, que a PV está eletricamente afastada da barra 3. Esta situação está mostrada na parte (a) da Figura 3.2.1-3

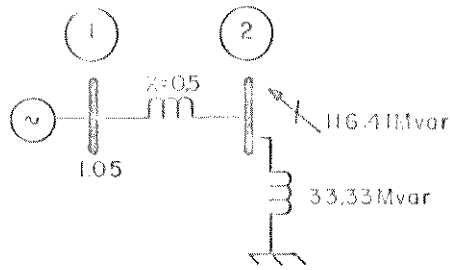




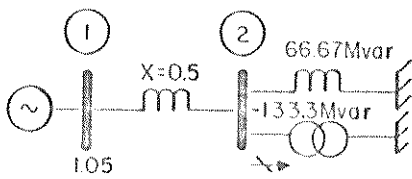
Este "shunt" é exatamente o valor correto dado na parte (c) da Figura 3.2.1-3. Observe-se o exemplo da Figura 3.2.1-4.



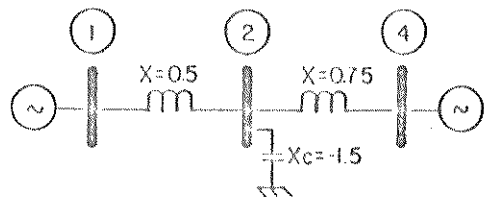
(a) SISTEMA COMPLETO



(b) EQUIVALENTE WE



(c) EQUIVALENTE WRE



(d) EQUIVALENTE WRE COM PV FICTÍCIA

Figura 3.2.1-4

A tabela seguinte mostra o resultado de uma contingência de - 34,5% na tensão da barra de referência 1.

VARIÁVEIS		$V_1$	$V_2$	$Q_{21}$	$Q_{G1}$
CASO BASE		1,050	1,2875	61,16	-49,87
CASO PERTURBADO	COMPLETO	0,705	1,0287	66,61	-45,65
	WE	0,705	1,074	78,21	-51,52
	WRE	0,705	1,0287	66,61	-45,65

Os resultados obtidos revelam que o equivalente WRE reproduz exatamente a resposta reativa do sistema externo, constituído, neste caso, de barra PV e "shunt". Testes realizados com "shunts" indutivos em sistemas radiais mostram que o equivalente WRE continua exato. É importante verificar que o equivalente WRE com PV fictícia, mostrado na parte (d) da Figura 3.2.1-4, é o próprio sistema completo com a barra 3 eliminada.

### 3.2.2 "Shunt" em sistema malhado

Os "shunts" do sistema externo podem ser particionados em dois conjuntos: 1) Conjunto dos "shunts" não isolados das barras de fronteira sob o aspecto reativo; 2) conjunto dos

"shunts" isolados das barras de fronteira sob o aspecto reativo. Dentro da formulação do WRE o primeiro conjunto afeta os "shunts" equivalentes e as linhas equivalentes. O segundo conjunto, por outro lado, só afeta as linhas tipo "só p". Isto pode ser visualizado na Figura 3.2.2-1, onde o "shunt"  $Z_a$  pertence ao primeiro conjunto e  $Z_b$  ao segundo.

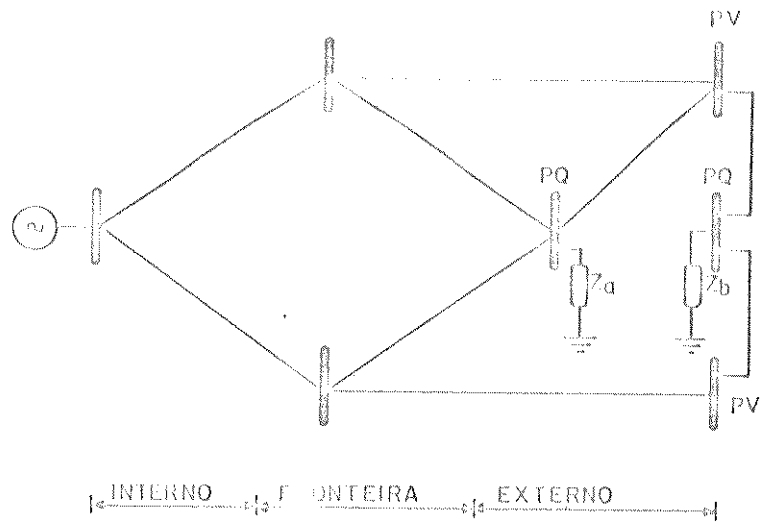


Figura 3.2.2-1

Vejamos como um "shunt" do primeiro conjunto afeta a ligação equivalente. Seja o sistema da Figura 3.2.2-2

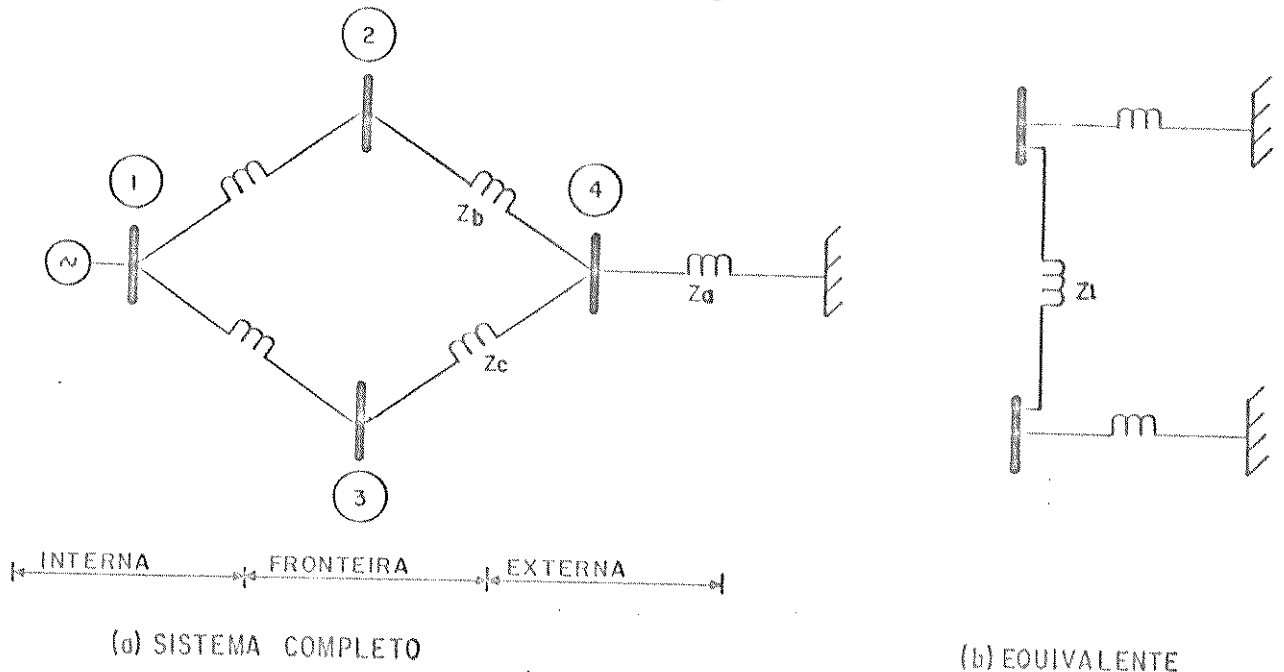
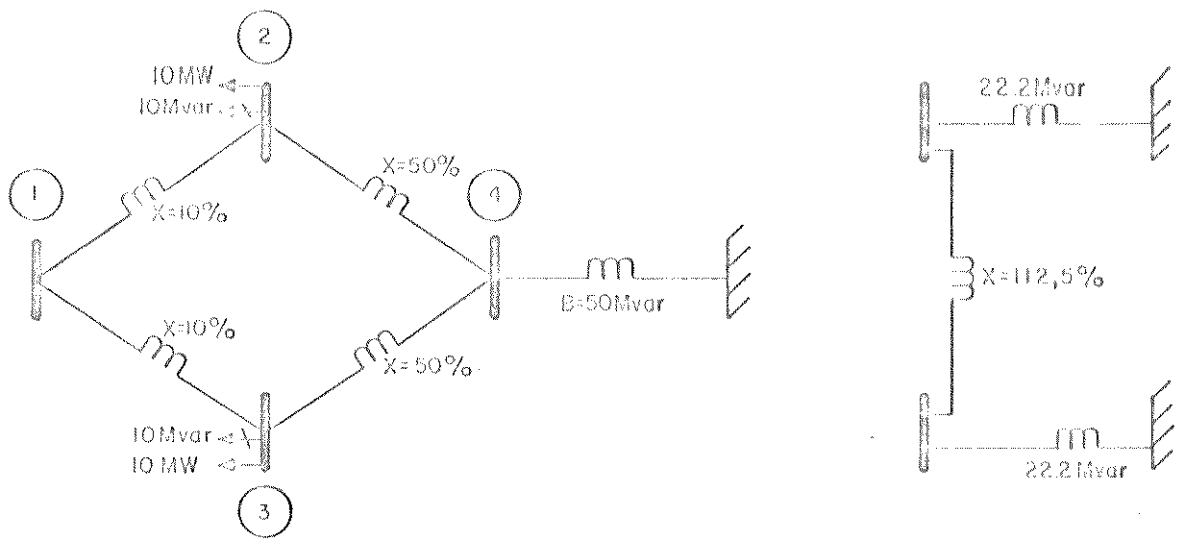


Figura 3.2.2-2

A ligação equivalente  $Z_1$  é perturbada por  $Z_a$  de acordo com:

$$Z_1 = Z_b + Z_c + (Z_b Z_c) / Z_a \quad (3.20)$$

Através de um teste pode-se verificar se a equação (3.20) introduz erro na linha equivalente. O caso base e o equivalente estão mostradas na Figura 3.2.2-3.



CASO BASE Figura 3.2.2-3

A tabela seguinte mostra os resultados obtidos. A perturbação considerada foi a perda da linha entre as barras 1 e 2.

VARIÁVEIS	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$\theta_2^\circ$	$\theta_3^\circ$	$Q_{31}$	$Q_{G1}$
CASO BASE	1,100	1,067	1,067	-0,5	-0,5	-35,3	73,0
CASO PERTURBADO							
COMPLETO	1,100	0,687	1,035	-10,1	-1,0	-66,7	71,3
WRE							
	1,100	0,687	1,035	-10,1	-1,0	-66,7	71,3

Observa-se, pela análise dos resultados, que a eliminação do "shunt" não introduz erros, nem na parte reativa, nem na parte ativa do equivalente. O equivalente WE, ao não modelar corretamente os elementos "shunts" externos nas ligações equivalentes introduz um erro na reação reativa (e também ativa) do equivalente.

O próximo teste visa mostrar que o equivalente WRE modela exatamente os "shunts" do sistema externo, mesmo na presença de barras PV. A Figura 3.2.2-4 mostra a configuração do caso base do sistema completo e dos equivalentes WRE e WE.

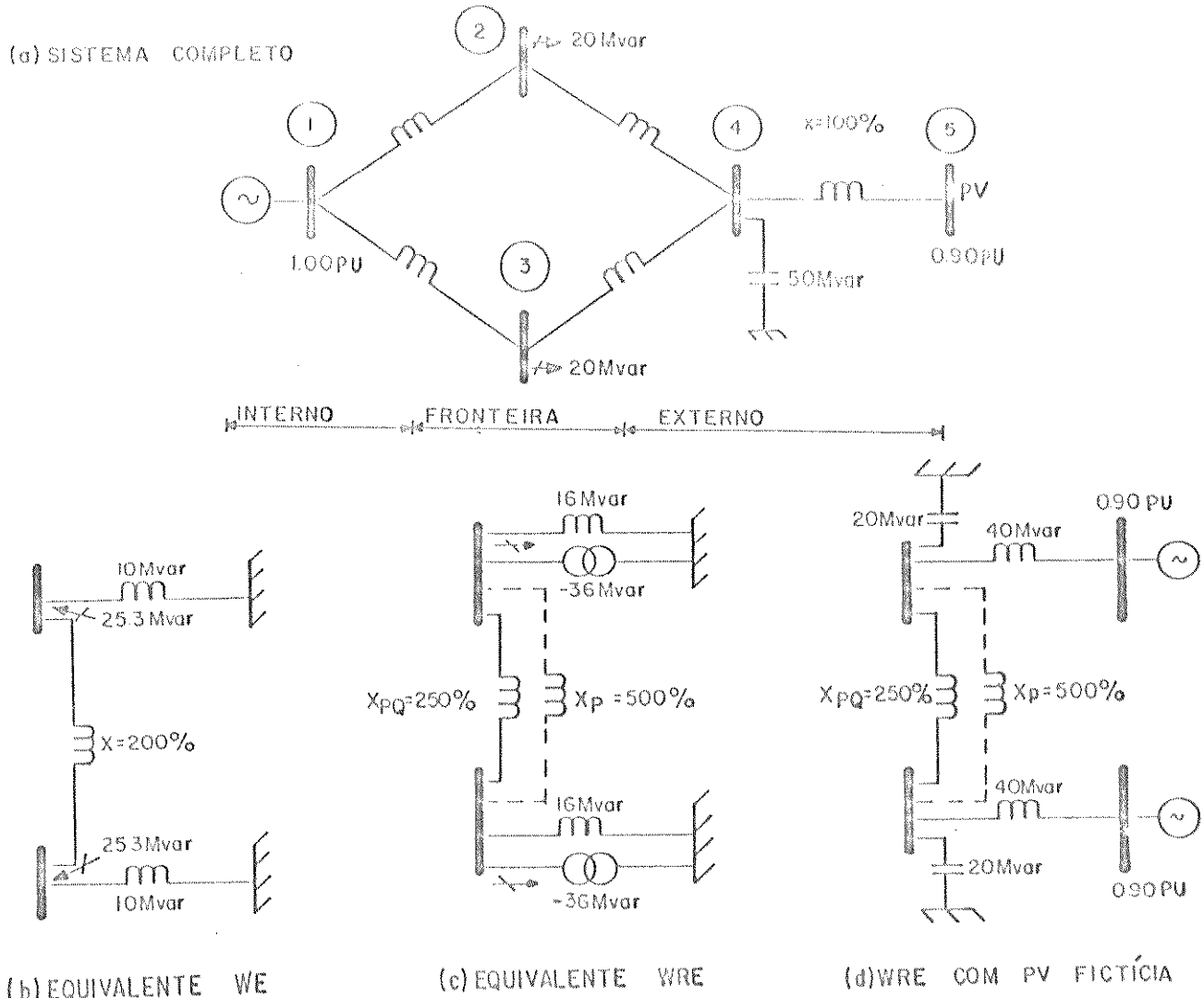


Figura 3.2.2-4

Os resultados para a contingência de perda da linha entre as barras 1 e 2, são mostrados na tabela abaixo:

VARIÁVEIS		$V_1$	$V_2$	$V_3$	$Q_{31}$	$Q_{11}$
CASO BASE		1,000	0,960	0,960	-3,9	8,1
CASO PERTURBADO	COMPLETO	1,000	0,771	0,904	-8,6	9,6
	WE	1,000	0,880	0,936	-6,0	6,4
	WRE	1,000	0,771	0,904	-8,6	9,6

Os resultados mostram que a reação reativa do sistema externo é modelada exatamente pelo WRE. Observa-se que, embora o exemplo seja em um sistema externo simples, a conclusão é geral pois se houvesse "shunts" não vistos (sob a ótica de Mvar) pela fronteira eles só iriam afetar o valor das linhas "só p".

### 3.3 Considerações adicionais sobre a modelagem de "shunt" e barras PV

As equações (3.16), (3.17) e (3.18) podem ser interpretadas como uma transformação de "shunts" em barras PV e vice-versa. Neste item explora-se este aspecto. Mostra-se que dado um sistema externo com "shunts" e barras PV, é possível

obter um sistema que não tenha "shunt" ou que não tenha barras PV. O caso de "shunt" resistivo será analisado no item 3.5.

### 3.3.1 Transformação de "shunt" em PV Equivalente

Considere-se o sistema simples mostrado na Fig. 3.3.1-1

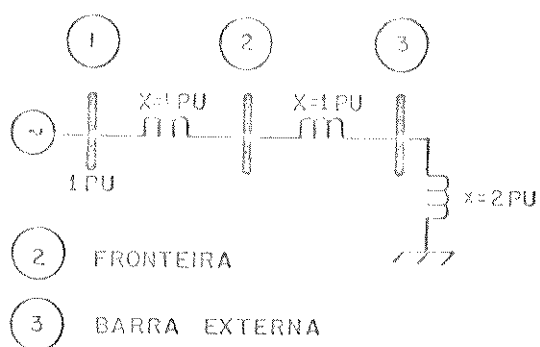


Figura 3.3.1-1

O sistema externo é trivial e é evidente que a barra 3 pode ser eliminada fornecendo um "shunt" na fronteira de 33.3 Mvar (ou  $x_{2s} = 3 \text{ PU}$ ). Notamos que o "shunt" na barra 3 pode, alternativamente, sofrer a transformação descrita na Fig. 3.3.1-2.

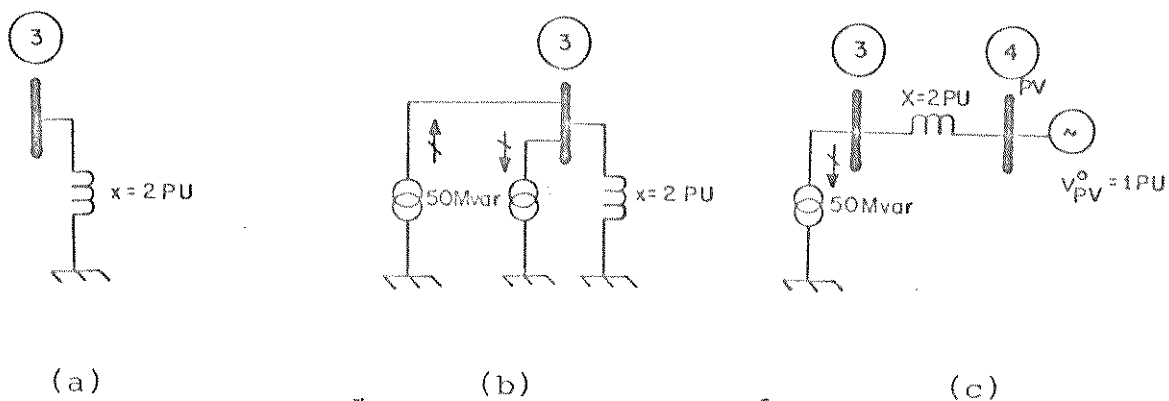


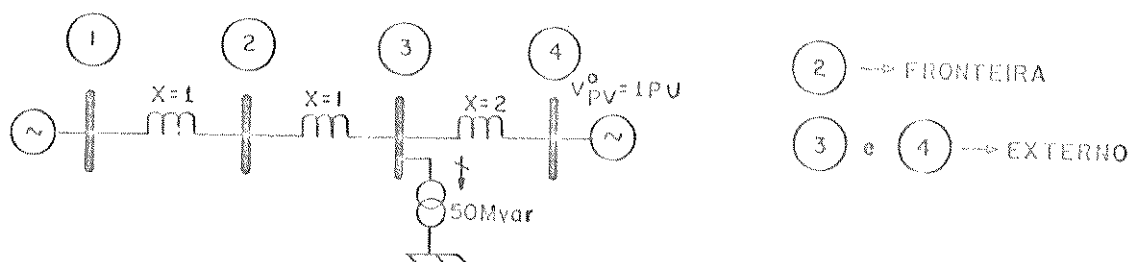
Figura 3.3.1-2



A seqüência na Fig. 3.3.1-2 é a seguinte:

- i) Somar e subtrair à barra 3 uma carga reativa tipo I e II de 50 Mvar (na tensão de 1 PU).
- ii) Interpretar o par "shunt" e carga negativa como o equivalente de uma barra PV, radialmente conectada com a barra 3. A reatância de ligação é  $x = 2$  PU (50 Mvar) e a tensão é 1 PU, de acordo com o item 3.1.3.

O sistema da Figura 3.3.1-1, após as transformações consideradas, fica com a configuração mostrada na Figura 3.3.1-3. Observa-se que nesse equivalente criou-se uma barra PV adicional, numa transformação inversa à descrita no item 3.1.1.



SISTEMA EXTERNO SEM "SHUNT"

Figura 3.3.1-3

A tabela seguinte mostra uma comparação do sistema externo com "shunt" (Fig. 3.3.1-1) e sem "shunt" (Fig. 3.3.1-3). A contingência considerada foi uma variação de + 30% na tensão da barra de referência 1. Como pode-se verificar, os resultados são idênticos.

VARIÁVEIS		$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$Q_{21}$	$Q_{23}$	$Q_{G1}$
CASO BASE		1,000	0,750	0,500	-	-18,7	18,7	25
CASO PERTURBADO	COM SHUNT	1,300	0,975	0,650	-	-31,7	31,7	42,5
	SEM SHUNT	1,300	0,975	0,650	1,000	-31,7	31,7	42,2

Tensões em PU e Reativos em Mvar

Seja outro exemplo como o sistema mostrado na Fig. 3.3.1-4

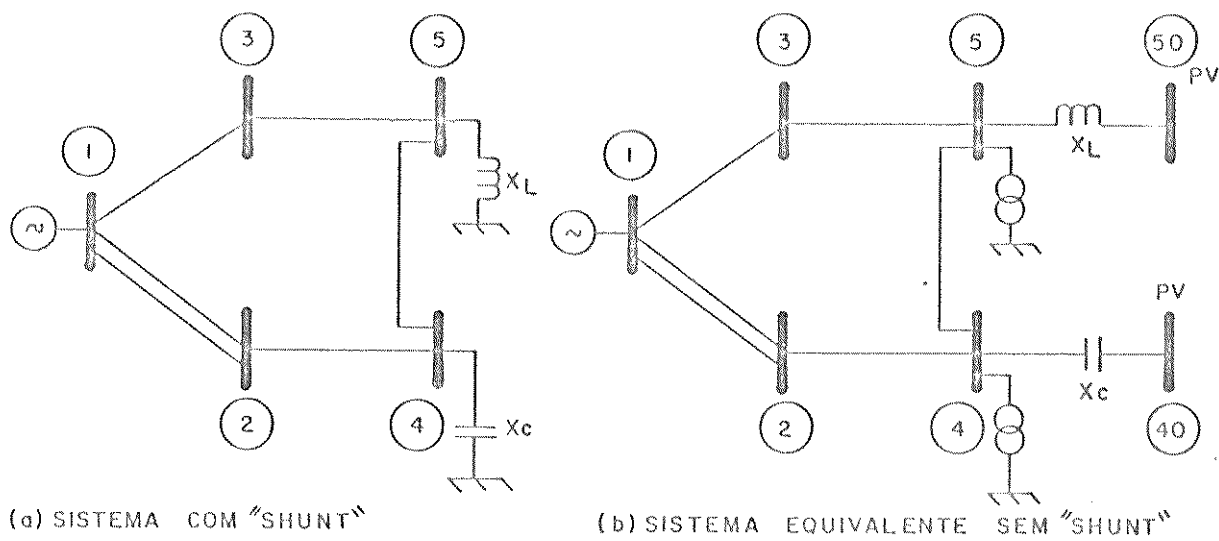


Fig. 3.3.1-4

A listagem 3.3.1-1 mostra os dados de barra e de linha do sistema com "shunt" (parte (a) da Fig 3.3.1-4).

A listagem 3.3.1-2 apresenta o estudo do caso base do sistema com "shunt". Na listagem 3.3.1-3 inclui-se o estado do sistema com "shunt", considerando uma contingência de perda da linha entre as barras 1 e 3. A contingência considerada é bastante severa, e a tensão da barra 3 cai para 0,604 PU. As listagens 3.3.1-4 e 3.3.1-5 mostram, respectivamente, os dados de entrada (barras e linhas) e o estado do sistema equivalente sem "shunt" (parte (b) da Fig. 3.3.1-4). Notar a reatância negativa entre as barras 4 e 40 e o modelo de carga para as barras 4 e 5. Comparando as listagens 3.3.1-5 e 3.3.1-2 observa-se que os casos básicos estão perfeitamente ajustados. A listagem 3.3.1-6 mostra o estado do sistema equivalente sem "shunt" para a mesma contingência. Novamente observa-se que a resposta incremental do sistema com e sem "shunt" é idêntica.

A transformação de "shunt" em barra PV, aqui apresentada, pode ser aplicada a qualquer elemento "shunt" reativo (reitor ou capacitor), em qualquer sistema. Isto é conceitualmente importante, pois mostra que os elementos "shunt" do sistema externo podem ser transformados em elementos série combinados com barras PV e cargas reativas. Portanto todo o problema de modelar os elementos "shunt" pode ser encarado como um problema de modelar barras PV e cargas reativas. Assim os problemas descritos por Deckmann [13] e Tinney [20] relativos a elementos "shunt" em equivalentes tipo WARD podem ser resolvidos, em face da transformação aqui descrita.

\*\*\* TESTE TRANS. SHUNT EM PV. BASE \*\*\*\*\*  
 CASO BASE

DADOS DE LINHA E TRANSFORMADOR

DA BARRA	P/ BARRA	CIRC	RESIST (%)	REACTAN (%)	SUSCEP (MVAR)	ESPEC	TAP MIN	MAX	ANG DEFAS	BARRA CONT.	CAPAC (MVAR)
1	0	0	10.00	50.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00	0	0.0
1	0	0	10.00	50.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00	0	0.0
1	0	0	10.00	50.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00	0	0.0
4	0	0	10.00	50.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00	0	0.0
3	0	0	10.00	50.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00	0	0.0

\*\*\* TESTE TRANS. SHUNT EM PV. BASE \*\*\*\*\*  
 CASO BASE

DADOS DE BARRA

NUM.	BARRA NOME	TP	AR	BARRA CONT.	TENSAO MOD	ANG	LT	GER MW	ESPEC	MIN	MAX	GER MVAR	ESPEC	MAX	CARGA MW	MVAR	SHUNT MVAR
1	BARRA 1	0	1	0	1.0000	0.00	0	0.0	0.0	-9999.0	0	9999.0	0	0	0.0	0.0	0.0
2	BARRA 2	0	1	0	1.0000	0.00	0	0.0	0.0	0.00	0	0.0	0	0	0.0	0.0	0.0
3	BARRA 3	0	1	0	1.0000	0.00	0	0.0	0.0	0.00	0	0.0	0	0	0.0	0.0	0.0
4	BARRA 4 SC	0	1	0	1.0000	0.00	0	0.0	0.0	0.00	0	0.0	0	0	0.0	0.0	0.0
5	BARRA 5 SI	0	1	0	1.0000	0.00	0	0.0	0.0	0.00	0	0.0	0	0	0.0	0.0	0.0

DADOS DE BARRA E LINHA DO SISTEMA COMPLETO COM SHUNT

\*\*\* TESTE TRANS. SHUNT EM PV. BASE \*\*\*

CASE BASE

RELATORIO COMPLETO DO SISTEMA \*\* AREA 1 \*\*

DA BARRA	TIPD	TENSÃO	GERACAO	CARGA	SHUNT	INJ EQV	PARA BARRA	FLUXOS	FLUXOS	FLUXOS	FLUXOS
NUM.	NOME	MOD/	MVAR	MW/	MVAR/	MVAR/	NUM.	CIRC	NW	MVAR	DEFAO TL
1	2	AND	MVAR	MVAR	EGUIV	MVAR	NOME	X	X	X	X
BARRA 1	2	1.000	30.7	0.0	0.0	0.0					
		0.0	10.0	0.0	0.0	0.0					
BARRA 2	0	0.989	0.0	10.0	0.0	0.0	BARRA 2 S	0	0.0	0.7	
		-2.3	0.0	5.0	0.0	0.0	BARRA 3	0	0.0	0.7	
BARRA 3	0	0.941	0.0	15.0	0.0	0.0	BARRA 4 SC	0	-9.0	-0.4	
		-0.9	0.0	5.0	0.0	0.0	BARRA 4 SI	0	-9.0	-0.4	
BARRA 4 SC	0	1.000	0.0	5.0	20.2	0.0	BARRA 5 SI	0	-14.4	-2.0	
		-4.2	0.0	0.0	0.0	0.0	BARRA 3 SI	0	-5.9	15.7	
BARRA 5 SI	0	0.927	0.0	0.0	-17.6	0.0	BARRA 3 SC	0	0.0	-14.3	
		-3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	BARRA 4 SC	0	-0.0	-14.3	

ESTADO DO SISTEMA COMPLETO COM SHUNT

LISTAGEM 3.3.1-2

\*\*\* TESTE TRANS. SHUNT ER PV. SEM A LINHA ENTRE 1-3 \*\*\*  
 CASO BASE

RELATORIO COMPLETO DO SISTEMA \*\* AREA 1 \*\*

DA BARRA NUM. NOME	TENSÃO MOD/ANG	GERACAO MW/MVAR	CARGA MW/MVAR	SHUNT MVAR/EGDIV	INJ EQU MW/MVAR	PARA BARRA NUM. NOME	F L U X O S CIRC	MU	FLUXUS MVAR	TAP	DEFAS T
BARRA 1	2 1.000 0.0	33.5 22.8	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0						
BARRA 2	0 0.929 -4.5	0.0 0.0	10.0 5.0	0.0 0.0	0.0 0.0	2 BARRA 2	0	16.8	11.4		
BARRA 3	0 0.604 -27.8	0.0 0.0	15.0 5.0	0.0 0.0	0.0 0.0	1 BARRA 1 4 BARRA 4 SC	0	-16.4	-9.4		
BARRA 4 SC	0 0.828 -11.8	0.0 0.0	5.0 0.0	14.0 0.0	0.0 0.0	5 BARRA 5 SI	0	-15.0	-5.0		
BARRA 5 SI	0 0.680 -18.0	0.0 0.0	0.0 0.0	-9.2 0.0	0.0 0.0	3 BARRA 3 5 BARRA 5 SI	0	-21.9	26.7		
						3 BARRA 3 4 BARRA 4 SC	0	-18.7	8.3		
							0	-17.8			

ESTADO DO SISTEMA COMPLETO COM SHUNT. CONSIDERANDO A CONTINGÊNCIA  
 DE PERDA DA LINHA ENTRE AS BARRAS 1 E 3.

LISTAGEM 3.3.1-3



\*\*\* \*\* TESTE TRANS. SHUNT EM PV. \*\* BASE SEM SHUNT  
 CASO BASE

RELATORIO COMPLETO DO SISTEMA \*\* AREA 1 \*\*

DA BARRA		TENSÃO GERAÇÃO		BARRA		SHUNT		INJEÇÃO		PARA BARRA		FLUXOS		LINHAS		
NUM.	TIPO	MVA	MVAR	MVA	MVAR	MVA	MVAR	MVA	MVAR	NUM.	NOME	CIRC	MVA	MVAR	NUM.	
1	BARRA 1	2	1.000 0.0	30.7 10.7	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	3	BARRA 2	0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.7	0.7
2	BARRA 2	0	0.989 -2.3	0.0 0.0	10.0 5.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	4	BARRA 4 SC	0	0.0 0.0	0.0 0.0	14.7 9.0	9.0
3	BARRA 3	0	0.941 -3.9	0.0 0.0	15.0 5.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	5	BARRA 5 SI	0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0
4	BARRA 4 SC	0	1.006 -4.2	0.0 0.0	5.0 -20.1	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	35	BARRA 35 PVE	0	0.0 0.0	0.0 0.0	14.4 1.0	1.0
5	BARRA 5 SI	0	0.927 -3.5	0.0 0.0	0.0 10.5	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	40	BARRA 40 PVE	0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0
40	BARRA 4 PVE	1	1.000 -4.2	0.0 0.1	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	50	BARRA 50 PVE	0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0
50	BARRA 5 PVE	1	1.000 -3.5	0.0 1.5	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	4	BARRA 4 SC	0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0
										5	BARRA 5 SI	0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 1.5	1.5

ESTADO DO SISTEMA EQUIVALENTE SEM SHUNT

LJSTAGEM 3.3.1-5



\*\*\* TESTE TRANS. SHUNT EM PV. \*\* SEM SHUNT \*\* SEM LINHA ENTRE 1-3  
 CASO BASE

RELATORIO COMPLETO DO SISTEMA \*\* AREA 1 \*\*

DA BARRA NUM. NOME	TENSAO MOD/ ANG	GERACAO MW/ MVAR	CARGA MW/ MVAR	SHUNT MVAR/ EQUIV	INJ EGV MW/ MVAR	PARA BARRA NUM. NOME	CIRC	FLUXOS MW MVAR	LI N H A S
BARRA 1	2 1.000 0.0	23.5 22.7	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0				
BARRA 2	0 0.927 -4.5	0.0 0.0	10.0 5.0	0.0 0.0	0.0 0.0	2 BARRA 2	0 0	10.0 16.8	11.4 11.4
BARRA 3	0 0.604 -27.6	0.0 0.0	15.0 5.0	0.0 0.0	0.0 0.0	1 BARRA 1 4 BARRA 4 SC	0 0 0	-10.4 -10.4 22.7	-9.4 -9.4 13.7
BARRA 4 SC	0 0.897 -11.8	0.0 0.0	5.0 -16.7	0.0 0.0	0.0 0.0	5 BARRA 5 SI	0	-15.0	-5.0
BARRA 5 SI	0 0.680 -18.0	0.0 0.0	0.0 13.6	0.0 0.0	0.0 0.0	3 BARRA 3 SI 40 BARRA 4 PV1	0 0 0	-21.9 16.9 0.0	-9.7 23.7 2.7
BARRA 4 PV1	1 1.000 -11.8	0.0 -3.3	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	3 BARRA 3 SI 4 BARRA 4 SC 50 BARRA 5 PV2	0 0 0	15.7 -15.7 0.0	9.7 -17.4 -14.4
BARRA 5 PV2	1 1.000 -18.0	0.0 3.4	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	4 BARRA 4 SC 5 BARRA 5 SI	0 0	0.0 0.0	-0.3 6.4

ESTADO DO SISTEMA EQUIVALENTE SEM SHUNT CONSIDERANDO  
 A CONTINGÊNCIA DE PERDA DA LINHA ENTRE A

BARRA 1-3

3.3.2 Transformação de barra PV em PQ equivalente

A Figura 3.3.2-1 ilustra a idéia básica desta transformação.

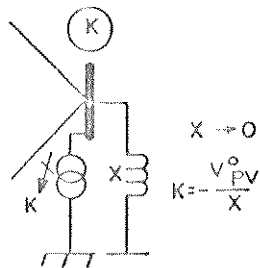


Sistema original com barra PV

O efeito PV é transferido para a barra m, que se liga com K através de uma reatância X "desprezível" ( $X \rightarrow 0$ ).

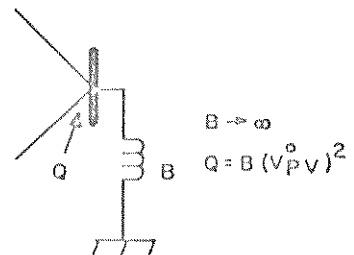
(a)

(b)



O efeito da barra PV é transformado em "shunt" equivalente

(c)



Com B "muito grande" a carga  $I = cte$  pode ser substituída por uma injeção reativa fixa

(d)

Figura 3.3.2-1

Como se pode ver na parte (b) da Fig. 3.3.2-1 a idéia consiste em transferir o efeito PV para uma outra barra através de uma reatância desprezível. Se tomarmos  $x = 10^{-3}$  PU a transformação será praticamente exata, considerando as redes normalmente utilizadas em estudos de Fluxo de carga. Observe-se que a passagem de (b) para (c) é exata, conforme já visto no item 3.2 (equações (3.14) e (3.15)). Como a barra PQ está praticamente aterrada, a carga  $I = cte$  pode ser considerada como uma injeção fixa de reativos.

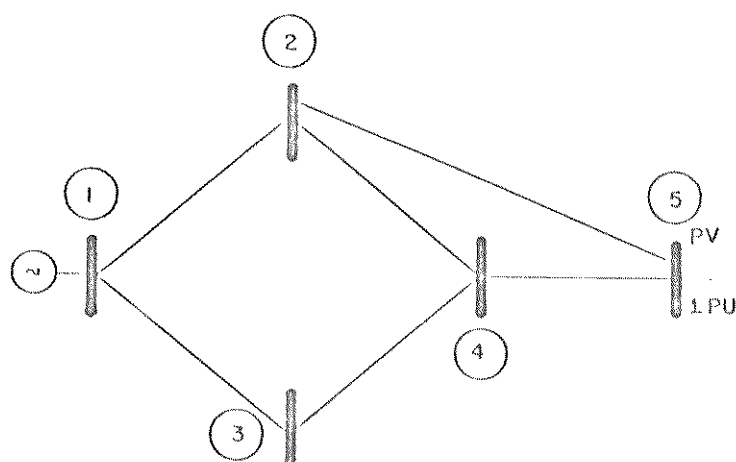
A Fig. 3.3.2-2 ilustra numericamente essa transformação:



Transformação PV em PQ equivalente

Figura 3.3.2-2

Para verificar a exatidão da transformação mostrada na Figura 3.3.2-2, considere-se o exemplo apresentado na Figura 3.3.2-3.



Sistema para demonstrar a transformação de barra PV em barra PQ.

Figura 3.3.2-3

As listagens seguintes são apresentadas adiante:

Listagem 3.3.2-1 Dados de barra e linha do sistema com barra PV

Listagem 3.3.2-2 Estado do sistema com barra PV.

Listagem 3.3.2-3 Estado do sistema com barra PV, considerando a perda da linha 1 - 2.

Listagem 3.3.2-4 Dados de barra e linha do sistema equivalenciando a barra PV por uma barra PQ com "shunt" de 9.999 Mvar.

Listagem 3.3.2-5 Estado do sistema equivalente considerando a perda da linha 1 - 2.

Listagem 3.3.2-6 Estado do sistema equivalente, com "shunt" de 99.999 Mvar, considerando a perda da linha 1-2.

Analisando e comparando as listagens 3.3.2-6 com a 3.3.2-3 verificamos que a reação do sistema equivalente (sem barra PV) é exatamente igual ao sistema com barra PV. É importante observar na listagem 3.3.2-5 que o "shunt" de 9.999 Mvar não é suficientemente grande, pois aparecem pequenos erros.

Uma aplicação prática da transformação aqui apresentada é modelar barras PV em programas que não dispõem de modelagem de barras PV. Basta utilizar a transformação exemplificada na Fig. 3.3.2-2 na entrada de dados para o programa.

Do ponto de vista conceitual esta transformação mostra que é possível gerar um sistema equivalente sem barras PV.

COMPANHIA HIDROELÉTRICA DO SAO FRANCISCO

\*CHESF\* DEPARTAMENTO DE MOVIMENTO DE ENERGIA  
 DIRETORIA DE OPERACAO/ESTUDO DE FLUXO DE CARGA

\*\*\*\* TRANS. DE BARRA PV EM BARRA DADOS DE BARRA \*\*\*\*  
 \*\* BASE \*\* COM BARRA PV \*\*

BARRA	TENSAO	GERACAO	CARGA	RT/CP
NUM.	NOME	PU	MW	MVAR
1	BARRA 1	1.000	0.0	0.0
2	BARRA 2	1.000	0.0	0.0
3	BARRA 3	1.000	50.0	0.0
4	BARRA 4	1.000	20.0	0.0
5	BARRA 5 PV	1.000	0.0	0.0

CARACTERISTICAS DE LINHAS E TRANSF.

LINHAS/TRAFOS	NC	RESIST.	REACT.	APERT.	TPU
		PERC.	PERC.	PERC.	
1 - BARRA 1	1	10.000	50.000	0.000	
2 - BARRA 2	1	10.000	50.000	0.000	
3 - BARRA 3	1	10.000	50.000	0.000	
4 - BARRA 4	1	10.000	50.000	0.000	
5 - BARRA 5 PV	1	10.000	50.000	0.000	

\*\*\*\*\*  
 NUM.BARRAS= 5  
 TOLER.= 0.00010000  
 NUM.LTS/TRAFOS= 6  
 NUM.MAX DE ITER.= 900  
 CONVERGENCIA OBTIDA COM 12 ITERACOES  
 ACR=1.500 ACI=1.500  
 \*\*\*\*\*

DADOS DE BARRA E LINHA DO SISTEMA COM BARRA PV

BARRA	NUM.	NOME	TENSÃO	BARRA	EM	TI	DO	GERACAO	REAT/CAP
			%		CA	DA	S	MW	MVAR
			GRAUS					MVAR	MVAR
1	BARRA	1	100.0					65.6	0.0
2	BARRA	2	93.6					0.0	0.0
3	BARRA	3	-10.6					0.0	0.0
4	BARRA	4	-17.4					0.0	0.0
5	BARRA	5	-9.1					0.0	0.0
			100.0					10.0	0.0
								21.1	0.0

L I N H A S E T R A N S F O R M A D O R E S

1	2	3	4	5	FLUXO DE POTENCIA	MISMATCH
					MW	MVAR
1	-BARRA 1					
2	-BARRA 2					
		3	-BARRA 2		36.9	10.7
		3	-BARRA 3		26.6	6.2
						-0.003 -0.006
3	-BARRA 3					
		4	-BARRA 1		-35.5	-3.3
		4	-BARRA 4		-3.4	-4.7
		5	-BARRA 5 PV		-8.1	-12.0
						-0.002 0.018
4	-BARRA 4					
		4	-BARRA 1		-25.0	-2.7
		4	-BARRA 4		-4.9	-2.3
						-0.006 -0.011
5	-BARRA 5 PV					
		3	-BARRA 2		6.5	5.4
		3	-BARRA 3		-4.5	2.5
		5	-BARRA 5 PV		-1.6	-7.6
						0.003 0.005
		4	-BARRA 4		1.6	7.9
		2	-BARRA 2		8.4	13.2
						0.002 -0.006

PERDA TOTAL DO SISTEMA= 2.6 MW 3.6 POR CENTO

ESTADO DO SISTEMA COM BARRA PV

BARRA NUM.	BARRA NOME	TENSAO %	GRAUS	BARRA CARGA MW	MVAR	GERACAO MW	MVAR	REAT/CAP MVAR.
1	BARRA 1	100.0	0.0	0.0	0.0	73.0	30.7	0.0
2	BARRA 2	83.3	-54.2	50.0	20.0	0.0	0.0	0.0
3	BARRA 3	84.3	-23.4	20.0	5.0	0.0	0.0	0.0
4	BARRA 4	86.9	-42.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	BARRA 5 PV	100.0	-48.6	0.0	0.0	10.0	59.5	0.0

L I N H A S E T R A N S F O R M A D O R E S

LINHA/TRAFO	3	4	5	1	4	2	3	4	2	5	MU	MISMATCH MVAR
1 -BARRA 1	3 -BARRA 3	4 -BARRA 4	5 -BARRA 5 PV	1 -BARRA 1	4 -BARRA 4	2 -BARRA 2	3 -BARRA 3	4 -BARRA 4	2 -BARRA 2	5 -BARRA 5 PV	0.011	0.012
2 -BARRA 2												
3 -BARRA 3											0.031	-0.008
4 -BARRA 4											0.014	0.005
5 -BARRA 5 PV											0.005	-0.003

PERDA TOTAL DO SISTEMA= 13.0 MW 15.7 POR CENTO

ESTADO DO SISTEMA COM BARRA PV, CONSIDERANDO A PERDA DA LINHA 1 - 2.

COMPANHIA HIDROELETRICA DO SAO FRANCISCO

\*CHESF\*  
 DIRETORIA DE OPERACAO/DEPARTAMENTO DE MOVIMENTO DE ENERGIA  
 ESTUDO DE FLUXO DE CARGA  
 \*\*\* TRANS. DE BARRA PV EM PQ EGV.\*\*SEM BARRA PV \*\*SEM LT 1-2  
 DADOS DE BARRA

BARRA NUM.	NOME	TENSAD PU	GERACAO MW	MUAR	PDT. MU	CARGA IMP. MU	CTE. MUAR	RT/CP	GVSHUNT (MW)
1	BARRA 1	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	BARRA 2	1.000	0.0	0.0	50.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	BARRA 3	1.000	0.0	0.0	2	0.0	0.0	0.0	0.0
4	BARRA 4	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	BARRA 5 PQ	1.000	10.0	9999.0	0.0	0.0	0.0	-9999.0	0.0

CARACTERISTICAS DE LINHAS E TRANSF.

LINHAS/ TRAFOS	NC	RESIST. PERC.	REACT. PERC.	ADMIT. TPU
1 -BARRA 1 /	3	10.000	50.000	0.000
2 -BARRA 2 /	4	10.000	50.000	0.000
3 -BARRA 3 /	5	10.000	50.000	0.000
4 -BARRA 4 /	2	10.000	50.000	0.000
5 -BARRA 5 PQ /	1	10.000	50.000	0.000

\*\*\*  
 NUM.BARRAS= 5  
 TOLER.=0.00010000  
 NUM.LTS/TRAFOS= 5  
 NUM.MAX DE ITER.= 900  
 CONVERGENCIA OBTIDA COM 34 ITERACOES  
 ACR=1.500  
 ACI=1.500

DADOS DE BARRA E LINHA DO SISTEMA EQUIVALENCIANDO A BARRA

PV POR UMA BARRA PQ COM SHUNT DE 9.999Mvar.



BARRA	NOME	TENSÃO	GRAUS	MM	CARGA	MVAR	GERACAO	MW	MVAR	REAT/CAP
1	BARRA 1	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	73.1	31.1	0.0	0.0
2	BARRA 2	82.9	-54.5	50.0	25.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	BARRA 3	84.1	-23.4	20.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	BARRA 4	95.6	-43.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	BARRA 5	99.7	-48.0	0.0	0.0	0.0	10.0	999.0	0.0	-999.5

L I N H A S E T R A N S F O R M A D O R E S

LINHA/TRAFO	FLUXO DE POTENCIA	MVA	MISMATCH	MW	MVAR
1 -BARRA 1	3 -BARRA 3	73.1 31.1 79.4	0.010	0.010	0.011
2 -BARRA 2	4 -BARRA 4	-28.9 2.8 39.1			
5 -BARRA 3	5 -BARRA 5 PQ	-21.1 -22.8 31.0	0.028	-0.007	
4 -BARRA 4	1 -BARRA 1	-66.8 0.4 66.8			
5 -BARRA 5 PQ	4 -BARRA 4	46.8 -5.4 47.1	0.011	0.004	
	2 -BARRA 3	30.1 0.9 30.9			
	3 -BARRA 3	-43.7 21.1 48.5			
	5 -BARRA 5 PQ	13.5 -24.5 28.0	0.006	-0.003	
	4 -BARRA 4	-12.5 29.7 32.3			
	2 -BARRA 2	22.5 29.8 37.3	-0.018	0.005	

PERDA TOTAL DO SISTEMA= 13.1 MW 15.0 POR CENTO

ESTADO DO SISTEMA EQUIVALENTE CONSIDERANDO A

PERDA DA LINHA 1 - 2

NUM.	BARRA NOME	TENSÃO % GRAUS	BARRA M E N T O S CARGA MW MVAR	GERACAO MW MVAR	REAT/CAP MVAR
1	BARRA 1	100.0	0.0 0.0	73.0 30.7	0.0 0.0
2	BARRA 2	89.2	50.0 20.0	0.0 0.0	0.0 0.0
3	BARRA 3	84.3	20.0 5.0	0.0 0.0	0.0 0.0
4	BARRA 4	86.8	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0
5	BARRA 5 PG	100.0	0.0 0.0	10.0 99999.0	0.0 0.0

L I N H A S E T R A N S F O R M A D O R E S

LINHA/TRAFO	FLUXO DE POTENCIA MW MVAR	MISMATCH MW MVAR
1 -BARRA 1	73.0 30.7	0.015 0.016
2 -BARRA 2		
3 -BARRA 3		
4 -BARRA 4		
5 -BARRA 5 PG		
1 -BARRA 1	-28.9 2.8	0.026 -0.006
2 -BARRA 2	-21.1 -22.8	
3 -BARRA 3		
4 -BARRA 4		
5 -BARRA 5 PG		
1 -BARRA 1	-66.7 0.6	0.006 0.003
2 -BARRA 2	46.7 -5.6	
3 -BARRA 3		
4 -BARRA 4		
5 -BARRA 5 PG		
1 -BARRA 1	30.1 0.3	0.008 -0.003
2 -BARRA 2	-48.6 21.3	
3 -BARRA 3	18.5 -24.5	
4 -BARRA 4		
5 -BARRA 5 PG		
1 -BARRA 1	-12.5 29.7	-0.007 0.091
2 -BARRA 2	22.4 29.8	
3 -BARRA 3		
4 -BARRA 4		
5 -BARRA 5 PG		

PERDA TOTAL DO SISTEMA= 13.1 MW 15.7 POR CENTO

ESTADO DO SISTEMA EQUIVALENTE, COM SHUNI DE 99.999 Mvar,  
CONSIDERANDO A PERDA DA LINHA 1 - 2.

### 3.4 Modelagem das cargas externas ativas e reativas

Neste item explicitam-se os erros que aparecem no equivalente WE (e também WRE) quando consideramos a inclusão, no sistema externo, de cargas não lineares (PQ).

#### 3.4.1 Influência de Barras PV Externas no Fluxo Ativo Entre Barras Fronteira.

Este efeito fica evidente ao analisarmos o sistema sem perdas da Figura 3.4.1-1.

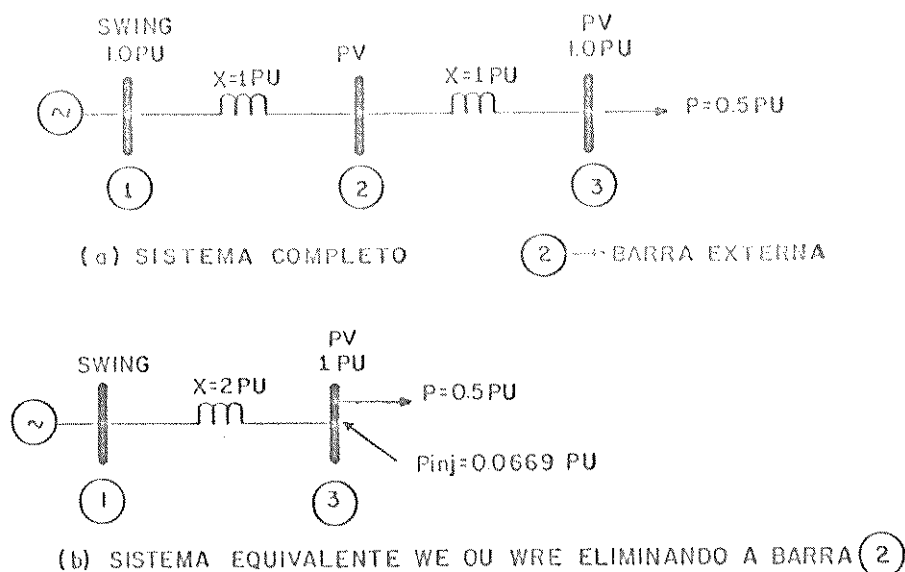


Figura 3.4.1-1

A parte (a) da Figura 3.4.1-1 mostra o sistema completo. Na parte (b) tem-se o sistema equivalente. Notar que a injeção de 0.0669 PU é para ajustar o caso básico. Observa-se que o sistema equivalente perde o efeito de suporte de tensão no fluxo ativo no meio da linha. A tabela seguinte apresenta o resultado de uma análise de contingência. A perturbação considerada foi um acréscimo de 10% na tensão da barra "swing".

VARIÁVEIS		$V_1$	$\theta_2$	$\theta_3$
CASO BASE		1,00	-30,0°	-60,0°
SISTEMA	COMPLETO	1,10	-27,0°	-54,1°
PERTURBADO	WE OU WRE	1,10	-	-51,9°

O resultado deste teste mostra que no equivalente WE, a eliminação de uma barra PV externa introduz, além dos erros na resposta reativa (item 3.1), erros também na resposta ativa. O equivalente WRE sofre a mesma deficiência do WE na resposta ativa. Em geral esse tipo de erro é desprezível e só aparece quando o sistema é fraco e o suporte de tensão é essencial.

### 3.4.2 Influência das Perdas Ativas e Reativas.

Este efeito pode ser visualizado na Figura 3.4.2-1.

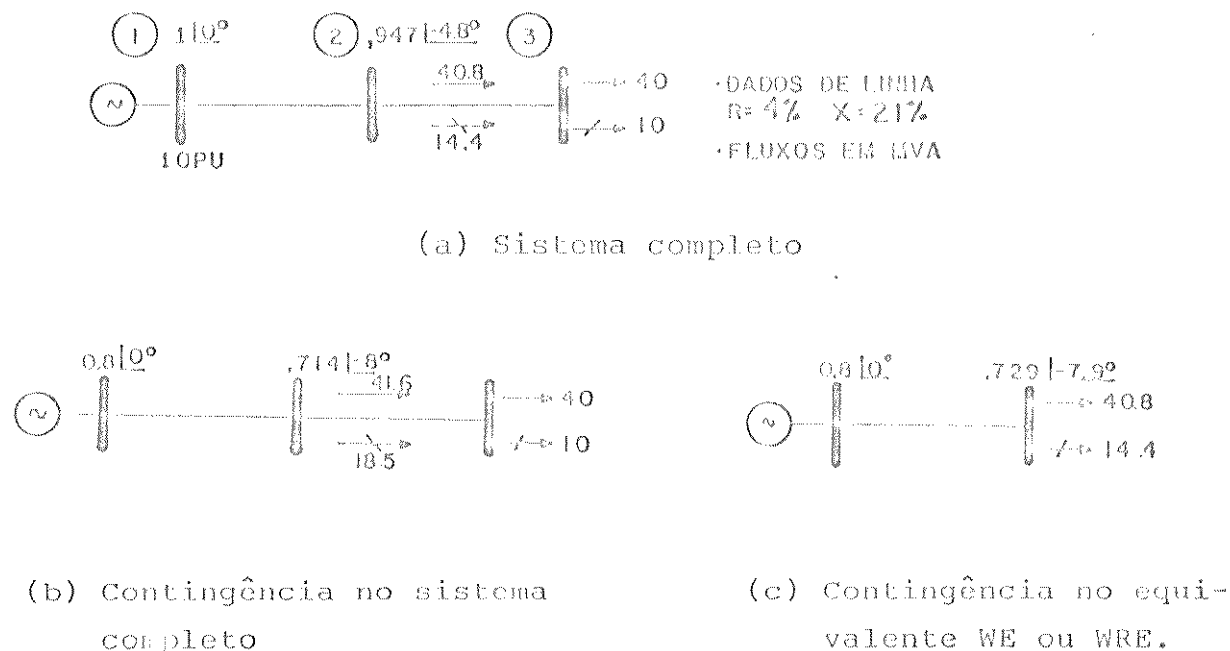


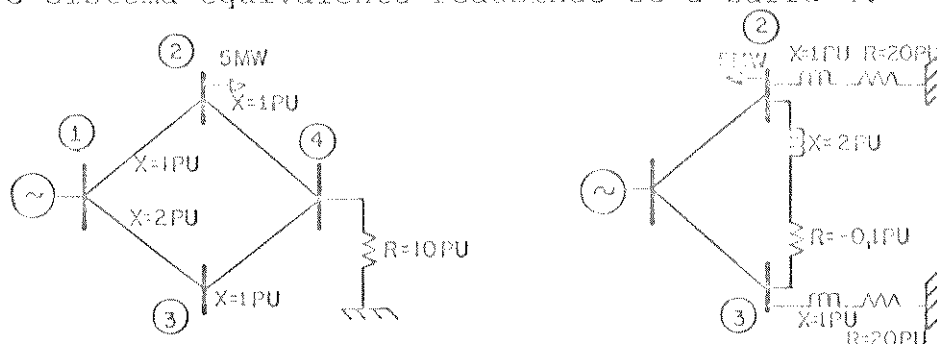
Figura 3.4.2-1

Quando ocorre um distúrbio no sistema interno, no sentido de baixar a tensão, o fluxo ativo e reativo na linha 2 - 3 aumenta (parte b), pois as perdas aumentam. Observar que se o fluxo na linha 2 - 3 for negativo (chegando na barra 2) quando a tensão do sistema interno cair, o fluxo que chega diminui, pois as perdas aumentam. Portanto, a não representação da variação das perdas com a tensão nas barras de fronteira, pode introduzir erros no sentido de baixar ou subir as tensões das barras fronteira, dependendo do sentido dos fluxos de intercâmbio. Esta também é uma fonte de erros secundários de difícil solução em equivalentes, uma vez que o efeito varia com o carregamento do sistema.

### 3.5 Modelagem das Resistências Externas

#### 3.5.1 Modelagem das Resistências "Shunts"

As resistências "Shunt" aparecem no sistema externo quando se modela a carga ativa com uma parcela de carga tipo impedância constante. Neste item mostra-se que a eliminação de um "shunt" resistivo não introduz erro no equivalente. Considere-se o sistema da Figura 3.5.1 (a). A Figura 3.5.1 (b) mostra o sistema equivalente reduzindo-se a barra 4.



(a) Sistema Completo

(b) Sistema Equivalente

Figura 3.5.1-1

A tabela seguinte mostra o resultado de uma contingência de perda da linha entre as barras 1 e 2.

VARIÁVEIS		$V_2$	$V_3$	$\theta_2$	$\theta_3$	$P_{G1}$	$Q_{G1}$
CASO	BASE	0,983	0,983	-9,5°	-7,6°	-14,6	2,8
CASO	COMPLETO	0,889	0,906	-24,4°	-16,6°	12,9	6,6
PERTUR-							
BADO	EQUIVALEN						
	TE (WRE)	0,889	0,906	-24,4°	-16,6°	12,9	6,6

Os resultados mostram que a eliminação do "shunt" resistivo não introduz erro no equivalente.

### 3.5.2 Modelagem das Resistências Série

A adição das resistências série na modelagem da rede, introduz um acoplamento entre a parte ativa e reativa do sistema. Nestas condições o equivalente WRE deixa de ser exato (mesmo no caso de um sistema externo apenas com cargas reativas lineares, com barras PV porém com as resistências série consideradas nas impedâncias série das linhas). É interessante, no entanto, observar um caso particular. Considere a Figura 3.5.2-1.



Figura 3.5.2-1

Notar que  $P_0$  é dado por:

$$P_0 = ((V_F^o)^2 - V_F V_{PV}^o) / r \quad (3.20)$$

Esta equação tem a mesma forma da equação (3.1) porém com  $r$  no lugar de  $x$  e  $P$  no lugar de  $Q$ . Desta forma, as deduções feitas no item 3.1 para a modelagem da resposta reativa da barra PV externa, podem ser estendidas para a modelagem da resposta ativa da PV externa mostrada na Figura 3.5.2-1. Assim sendo, a transformação "shunt" em PV equivalente apresentada no item 3.3.1 continua válida para o caso do "shunt" resistivo, conforme mostrado na Figura 3.5.2-2.

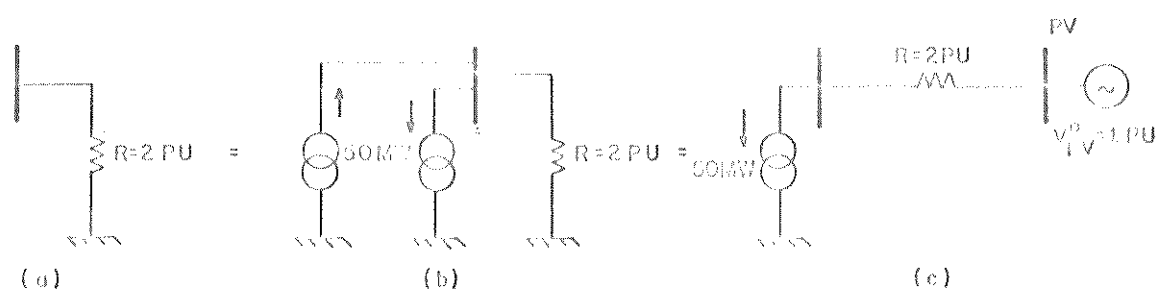


Figura 3.5.2-2

No caso geral, a tensão da barra fronteira é diferente da tensão da barra PV (em módulo e ângulo) e a ligação entre as barras é através de uma impedância com parte real e imaginária. Nestas condições não é possível obter um equivalente (baseado em elementos de circuitos) que represente de forma exata a resposta da barra PV externa.



## CAPÍTULO 4

## EQUIVALENTE WARD ESTENDIDO EM UMA ETAPA E WARD REATIVO EXATO

Considerando-se as novas propostas de modelagem das barras PV e dos elementos "shunt", pode-se formular dois novos modelos de equivalentes na linha Ward. Estes modelos são o Ward Estendido em Uma Etapa (WEUE) que introduz melhorias computacionais no processo de obtenção do equivalente e o Ward Reativo Exato (WRE) que incorpora melhorias de modelagem na representação do sistema com vistas à redução nodal, mantendo as vantagens computacionais do WEUE. Neste capítulo apresenta-se os algoritmos de formação dos modelos e se discute suas vantagens computacionais e de precisão.

#### 4.1 Equivalente Ward Estendido em Uma Etapa (WEUE)

##### 4.1.1 Algoritmo para Obtenção do WEUE

O processo básico proposto para a obtenção do WEUE em uma só redução é o seguinte:

- a) Formação da matriz admitância nodal do sistema externo incluindo as barras de fronteira. O ponto essencial é a partição, para fins de eliminação ordenada, do sistema externo em dois conjuntos: um das barras PQ externas e outro das barras PV externas. A matriz  $Y$ , com as partições consideradas, é mostrada na Fig. 4.1.1-1.

		SISTEMA EXTERNO		FRONTEIRA
		PQ	PV	
Y =		$Y_{PQ,PQ}$	$Y_{PQ,PV}$	$Y_{PQ,F}$
		$Y_{PV,PQ}$	$Y_{PV,PV}$	$Y_{PV,F}$
		$Y_{F,PQ}$	$Y_{F,PV}$	$Y_{F,F}$

Matriz Y para obtenção do modelo WEUE

Figura 4.1.1.-1

- b) Eliminação gaussiana das barras PQ externas. Após esta operação a matriz Y fica conforme mostrado na Fig. 4.1.1.2.

Y =	0		
		$Y'_{PV,PV}$	$Y'_{PV,B}$
		$Y'_{B,PV}$	$Y'_{B,B}$

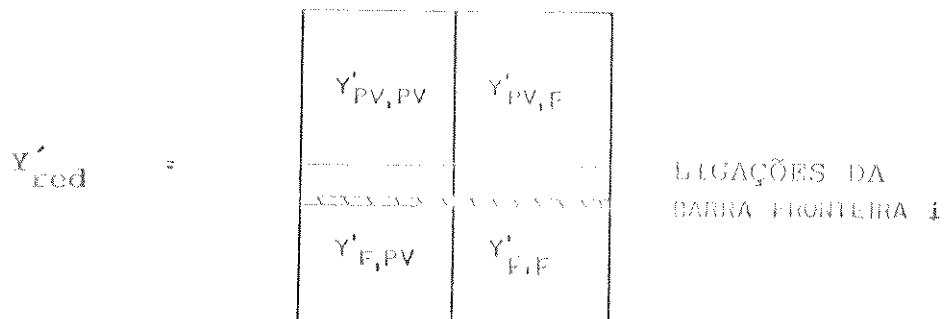
→ BARRA FRONTEIRA i

Matriz Y após redução das barras PQ externas

Figura 4.1.1.-2

Pode-se neste ponto obter os "shunts" equivalentes do modelo WEUE, observando que ele é constituído da soma de duas parcelas, a saber:

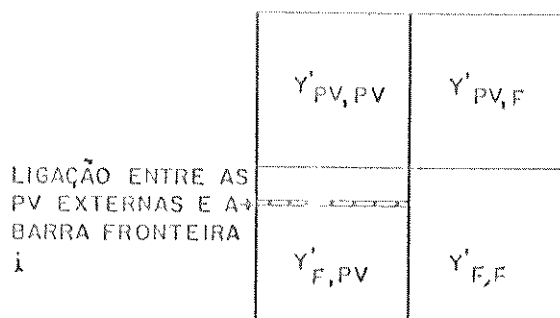
- b1) Parcela dos "shunt" equivalentes devido à reflexão de ligações para "terra" em função da redução das barras PQ. Esta componente pode ser obtida conforme mostrado na Fig. 4.1.1-3.



A soma de todos os elementos da linha  $i$  (hachurada) fornece o valor do "shunt" equivalente da barra  $i$ , após a eliminação das barras PQ externas.

Fig. 4.1.1-3.

b2) Parcela dos "shunts" equivalentes devido às barras PV externas. A Fig. 4.1.1.-4 mostra como calcular esta componente.



A soma das susceptâncias da linha hachurada dividida por 2, fornece a componente do "shunt" equivalente devido às barras PV externas

Figura 4.1.1-4

Com relação à obtenção dos "shunt" equivalentes pode-se fazer as seguintes observações:

- i) Computacionalmente as componentes (b1) e (b2) são calculadas simultaneamente;

- ii) Quando não existem "shunts", associadas às barras PQ externas, a componente (b1) é nula. Quando não existem barras PV no sistema externo, a componente (b2) é nula.
- iii) Na maioria dos sistemas a componente (b2) é maior que (b1).
- iv) Ao se eliminar as barras PQ, uma parcela das ligações "shunt" foi refletida para as barras PV externas. Uma vez que, por definição, a tensão dessas barras não muda, a presença dessas ligações "shunt" não produz nenhuma influência sobre as barras de fronteira. Para evitar que esses "shunts" sejam refletidos na fronteira durante a eliminação das barras PV externas no passo seguinte, é necessário removê-los da submatriz  $Y'_{PV, PV}$ . Isto pode ser feito substituindo-se os termos da diagonal (PV, PV) pelo negativo da soma dos demais termos da linha correspondente na matriz  $Y'_{red}$ .
- c) Eliminação gaussiana das barras PV externas. Com esta operação obtém-se a matriz mostrada na Figura 4.1.1.-5.

$$Y''_{red} = \begin{array}{|c|c|} \hline & \text{Hatched Area} \\ \hline 0 & Y''_{F,F} \\ \hline \end{array}$$

As ligações série equivalentes do modelo WEUE podem ser obtidas da matriz  $Y''_{B,B}$  na forma usual ( $y_{kl}^{eq} = Y''_{kl}$ )

Figura 4.1.1-5

- d) Finalmente, da mesma forma que o modelo WE, deve-se calcular as injeções equivalentes na fronteira, de modo a ajustar o sistema reduzido às condições do caso base disponível.

#### 4.1.2 Aspectos Computacionais - Teste Numérico

Pela formulação do WEUE a obtenção da rede equivalente necessita de apenas uma formação e decomposição triangular da matriz de admitância nodal do sistema externo. O modelo WE, como visto no capítulo 2, propõe a formação e redução duas vezes da matriz de admitância nodal do sistema externo, e portanto o custo computacional é maior.

A seguir apresenta-se o resultado de um teste no sistema IEEE118. Para este teste as barras 24, 33, 34 e 38 foram definidas como barras de fronteira e a barra 12 como a barra interna de referência. O sistema externo é formado por 42 barras PQ e 37 barras PV. O teste foi realizado no IBM 4341 da CHESF, em um horário em que o único programa na máquina era este teste, e utilizando uma rotina assembler especialmente elaborada para medição de tempo de execução de trechos de programas. Mostra-se na tabela 4.1.2-1 os resultados obtidos.

WE	OBTENÇÃO DAS LINHAS EQUIVALENTES	OBTENÇÃO DOS SHUNTS EQUIVALENTES	TEMPO TOTAL (ms)
	203,1	203,5	406,6
WEUE	REDUÇÃO DAS PQs OBTENÇÃO DOS SHUNTS EQUIVALENTES	REDUÇÃO DAS PVs OBTENÇÃO DAS LINHAS EQUIVALENTES	TEMPO TOTAL (ms)
	145,7	117,1	262,8

TABELA 4.1.2-1

O tempo total para o WEUE é de 64,6% do tempo total do WE. À primeira vista poderia-se pensar que o WEUE, por só reduzir a matriz Y uma vez (contra 2 reduções do WE) deveria ter um ganho de 50% no tempo total. No entanto, ao particionar o sistema externo em 2 subconjuntos, e usar a ordenação para cada subconjunto individual, tem-se uma perda de eficiência computacional quando comparado à ordenação ótima global. Notar que o sistema em teste é bastante desfavorável neste aspecto, pois o sistema externo é praticamente constituído de 50% de barras PQ e 50% de barras PV. Ao repetir o teste utilizando o subsistema Sul da CHESF (como sistema externo) constituído de 69 barras PQ e apenas 4 barras PV obtém-se um tempo total para o WEUE de 55% do tempo total do WE.

#### 4.1.3 Precisão do WEUE

Em sistemas que não apresentam "shunt" elevados a componente (b1) do equivalente é praticamente nula. Neste caso os parâmetros obtidos com o WEUE ou o WE são praticamente iguais. Em sistemas com "shunt" elevados, o WEUE pode apresentar resultados superiores, conforme mostrado no item 3.2.

## 4.2 Equivalente Ward Reativo Exato (WRE)

### 4.2.1 Obtenção do WRE

As melhorias propostas pelo WRE podem ser incorporadas diretamente na obtenção do WEUE, levando-se em conta as seguintes observações:

- i) Em lugar da componente (b2) (do item 4.1.1) utilizar as equações (3.16) e (3.17) para obter os "shunts" e as cargas reativas tipo  $I = cte$ , que representam o efeito das barras PV externas. Caso desejado, pode-se usar a versão com barra PV fictícia, equações (3.16) e (3.18), evitando a representação da injeção de corrente.
- ii) Considerar como linhas equivalentes PQ (para a potência ativa e reativa) as ligações obtidas na fronteira após a eliminação das barras PQ externas. (Fig. 4.1.1-2). Considerar ligações obtidas na fronteira após a redução das barras PV externas, como linhas "só P".

### 4.2.2 Precisão do Modelo WRE

Conforme mostrado no Capítulo 3 o modelo WRE representa exatamente a resposta reativa do sistema externo se forem desprezadas as cargas não lineares e as resistências série. Na referência [13] mostra-se que em termos de precisão entre todos os modelos testados (equivalentes WARD, REI, fluxos de carga não reduzido e métodos de linearização) o mais preciso é o fluxo de carga não reduzido. Observa-se que o WRE representa praticamente a resposta reativa de um modelo de fluxo de carga não reduzido com injeção nula e resistências série desprezadas. Sabe-se que a precisão é dependente do sistema particular testado, porém pode-se esperar que o WRE será mais preciso que o WE quando ocorrer pelo menos uma das seguintes condições:

- a) "shunts" elevados entre a fronteira e as PV externas;
- b) Barras PV externas com tensões diferentes das barras de fronteira mais próximas.

Exemplos numéricos para esses casos foram mostrados nos exemplos dos itens 3.1 e 3.2.

#### 4.2.3 Características Computacionais

Uma vez que a inclusão das melhorias que caracterizam o WRE não prejudica a obtenção do equivalente em um passo de redução, e também não altera a ordem de eliminação das barras PQ e PV, as boas características computacionais do WEUE são preservadas.



## CAPÍTULO 5

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo final, apresenta uma síntese dos objetivos e das principais contribuições deste trabalho. As contribuições alcançadas são listadas e comentadas em seus aspectos relevantes. Finalmente são sugeridos desenvolvimentos futuros na área de equivalentes estáticos em SEE.

5.1 Objetivos perseguidos e resultados alcançados

Ao longo deste trabalho o objetivo perseguido pode ser sintetizado nos seguintes pontos:

- i) Realizar uma investigação crítica das características do equivalente WE.
  - Desde a sua elaboração, esse modelo tem sido reconhecido como um método altamente competitivo por agregar boas características de precisão, eficiência computacional, e simplicidade de obtenção. A experiência de utilização deste modelo mostra, no entanto, que em várias situações, ocorrem erros de precisão na reação do modelo. A literatura atual não explica satisfatoriamente a relação causa e efeito destes erros. Investigar, analisar e determinar estas relações causa-efeito é uma das propostas deste trabalho.
- ii) Desenvolver modelos computacionalmente mais eficientes.
  - A eficiência computacional é uma característica fundamental de um método de equivalentes. Nas aplicações em tempo real, onde é requerida a atualização do equivalente do sistema externo para executar a função de análise de segurança, a boa eficiência computacional é essencial. Para aplicações "off-line", embora não

essencial, a eficiência computacional é bastante desejável.

iii) Desenvolver modelos com melhores características de precisão.

- A qualidade de um modelo de equivalentes estáticos é avaliada basicamente em função das características de precisão do modelo. É importante observar que o equivalente deve ser preciso mesmo em condições de contingência severas da rede elétrica.

As principais contribuições desenvolvidas ao longo do trabalho, foram:

a) Com relação a uma análise crítica das características do equivalente WE.

- A investigação da modelagem das barras PV permitiu determinar, com clareza, as relações causa-efeito dos erros encontrados no modelo WE. Os fatores responsáveis pelos erros de reação reativa e ativa do modelo WE, oriundos da modelagem das barras PV's externas, foram identificados e avaliados.
- As deficiências na modelagem dos "shunts" externos no modelo WE foram investigadas, analisadas e explicitadas. Os erros de reação ativa e reativa do modelo WE, causados pelos "shunts" externos, foram analisados e as relações causa e efeito destes erros foram determinados.

b) Com relação a modelos computacionalmente mais eficientes.

- Foi desenvolvida uma metodologia que permite obter um modelo, bastante semelhante ao WE (a menos dos "shunts" equivalentes), que necessita apenas de uma formação e redução da matriz Y do sistema externo e fronteira. Este modelo denominado Ward Estendido em Uma Etapa (WEUE) se

mostrou computacionalmente superior ao WE. Em alguns testes (item 4.1.2) o modelo WEHE se mostra praticamente duas vezes mais rápido que o WE. Esta característica, para aplicações em tempo real, é de grande importância.

c) Com relação ao desenvolvimento de modelos com melhores características de precisão.

- Foi desenvolvido um modelo que acrescenta várias melhorias na modelagem das barras PV's e dos "shunts" externos. Este modelo, denominado Ward Reativo Exato (WRE), apresenta, em geral, uma resposta reativa superior ao WE. Foi mostrado que quando o sistema externo não possui cargas não-lineares e nem resistências, o equivalente WRE representa exatamente a reação reativa do sistema externo, mesmo na presença de "shunts" e barra PV, para contingências que solicitem apenas a reação reativa do sistema externo. Embora na prática estas condições no sistema externo não existam, a exatidão da resposta do modelo WRE demonstra que sob o aspecto exclusivamente reativo o modelo é perfeito.

d) Com relação a outros desenvolvimentos.

- Foi desenvolvida uma transformação de "shunt" em barra PV equivalente. Esta transformação permite eliminar, sem erros, os elementos "shunt" do sistema e obter um sistema externo perfeitamente equivalente ao sistema original porém, sem "shunts". Esta transformação é conceitualmente importante pois permite resolver todos os problemas de modelagem de "shunts", em equivalentes tipo Ward, relatados na literatura.
- Foi desenvolvida uma transformação de barra PV em barra PQ com "shunt" e injeção equivalente. Esta transformação mostra que é possível, na prática, substituir uma barra

tipo PV por uma do tipo PQ com um par "shunt" e injeção convenientemente calculado.

## 5.2 Desenvolvimentos futuros

Este trabalho não esgota o estudo de equivalentes tipo Ward. Acredita-se que muita pesquisa e desenvolvimento pode ser realizado nesta área. Como desenvolvimento futuro decorrente de aspectos aqui explorados sugere-se:

- a) Desenvolver uma metodologia para modelar o efeito da barra PV no fluxo de ativos entre barras fronteiras (it a 3.4.1).
- b) Analisar as propriedades do modelo WRE, interpretando a metodologia deste modelo como uma redução exata de um sistema não linear de equações. Estas equações são as equações de fluxo de carga (apenas os reativos) do sistema externo na condição particular em que o WRE é exato.
- c) Desenvolver metodologia para modelar as cargas não-lineares do sistema.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] - J. B. Ward, "Equivalent Circuits for Power Flow Studies", IEEE Transaction Vol. 68, pp. 373-382, 1949.
- [02] - J. B. Ward, H. W. Hale, "Digital Computer Solution of Power-Flow Problems". IEEE Transaction. Vol. 75, pp. 398-404, 1956.
- [03] - B. Stott, O. Alsac, "Fast Decoupled Load-Flow", IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-73, pp. 859-869, Mai/Jun. 1974.
- [04] - E. K. Paulson, "Network Equivalents for On-Line Systems", IEEE PES Summer Meeting, Anaheim, Jul. 1974.
- [05] - 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.
- [06] - 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.
- [07] - S. Deckmann, A. Garcia, A. Monticelli, "Equivalente de Ward Estendido", Relatório nº 2 do Convênio CEPEL/UNICAMP, sobre Equivalentes Externos, Jul. 1977.
- [08] - 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.
- [09] - S. Deckmann, A. Monticelli, A. Pizzolante, C. Murari, "Nodelagem do Sistema Externo para a Obtenção do Equivalente Ward Estendido", Relatório nº 4 do Convênio CEPEL/UNICAMP, sobre Equivalentes Externos, Mar. 1978.

- [10] - A. Monticelli, S. Deckmann, A. Garcia and B. Stott, "Real-Time External Equivalents for Static Security Analysis", IEEE Trans. Power Syst., Vol. PAS-98, pp. 498-508, Mar/Abr. 1979.
- [11] - A. Pizzolante, A. Monticelli, S. Deckmann, "Execução de Funções Avançadas de Controle em Tempo Real em Sistemas Parcialmente Observáveis", 5ª Conferência do IEEE, Recife, Nov. 1979.
- [12] - S. Deckmann, A. Pizzolante, A. Monticeli, B. Stott and O. Alsac, "Studies on Power System Load Flow Equivalencing", IEEE Trans. Power Appar. Syst. vol 99. Nov/Dez. 80, pp 2301-2310.
- [13] - S. Deckmann, A. Pizzolante, A. Monticelli, B. Stott and O. Alsac, "Numerical Testing of Power System Equivalents", IEEE Trans. Power Appar. Syst. vol 99. Nov/Dez. 80, pp 2292-2300, New York, Jan. 1980.
- [14] - F. F. Wu and A. Monticelli, "Critical Review of External Network Modelling for On-Line Security Analysis" - Electric Power and Energy Systems. Jun 1983, pp. 222.
- [15] - A. Monticelli, F.F. Wu, "A Unified Approach to on-line Network Modeling for Security Analysis". IFAC Symposium, Rio de Janeiro 1985, July pp 215-221.
- [16] - van Amerongen, R. A. M. and van Meeteren, H. P. "A Generalized Ward Equivalent for Security Analysis". IEEE Trans. Power Appar. & Syst. Vol PAS-101 (June 1982) pp 1519-1526.
- [17] - Sigmar M. Deckmann e Carlos A. F. Murari, "Análise de Segurança em Sistemas Elétricos Reduzidos na Presença de TCAT's Externos", 4º Congresso Brasileiro de Automática da SBA - Campinas - 1982, pp 491-495.
- [18] - Paulo C. C. Tavares e S. M. Deckmann, "Improving the Extended Ward Equivalent for On-line Static Security Analysis", Proc. IFAC Electric Energy Systems Rio de Janeiro, 1985, pp. 223 - 257.

- [19] - P. C. C. Tavares and S. M. Deckmann, "Improving the Ward Equivalent for On-line Static Security Analysis", a ser apresentado no "Meeting do SC 39" em Tokyo em out/1987.
- [20] - W. F. Tinney e W. G. Powell, "The REI Approach to Power Network Equivalents", Proc. IEEE PICA CONF., Toronto, pp - 314 - 320, maio 1987.

APÊNDICE A

Na elaboração deste trabalho foram utilizados vários programas digitais. Neste apêndice é fornecida uma descrição sucinta de cada programa utilizado.

PROGRAMAS DESENVOLVIDOS

## a) PROGRAMA PCEQV

Programa em FORTRAN com 1337 linhas. Destina-se ao cálculo do equivalente Ward Estendido e está dimensionado para 300 barras e 500 linhas. Utiliza esparsidade (método da tabela LU) e tem formato de entrada/ saída de dados compatível com o fluxo de carga da PECO.

## b) PROGRAMA PCEQDE

Programa em FORTRAN com 1307 linhas. Destina-se ao cálculo dos equivalentes estáticos e possui várias opções de modelagem de "shunts" e de barras PV. Utiliza esparsidade (tabela LU) e está dimensionado para 300 barras e 500 linhas. A entrada/ saída de dados é compatível com o formato da PECO de fluxo de carga.

PROGRAMAS MODIFICADOS

## a) PROGRAMA PCFLUDE

Programa de fluxo de carga, método ZOLLENKOPF - STOTT escrito em FORTRAN pelo PROF<sup>o</sup> SIGMAR DECKMANN, com 1090 linhas. A principal modificação consiste na introdução de circuito de linha tipo "P". Tem formato de entrada de dados compatível com o fluxo de carga da PECO e capacidade para 650 barras e 600linhas.



## b) ROTINA RDTIME

Rotina em assembler adaptada para ser utilizada com os programas PCEQV e PCEQDE. Destina-se à medição do tempo de CPU entre trechos de programas em FORTRAN.

OUTROS PROGRAMAS

Além dos programas desenvolvidos e modificados foram utilizados os programas ANAREDE desenvolvido pelo CEPTEL, e o programa de fluxo de carga do PECO.