

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

## Equivalentes Externos Tipo Ward Visando Estudos de Otimização em Sistemas de Potência

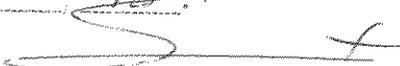
por Leonardo [Nepomuceno] 352

orientador Anésio dos [Santos Júnior]

co-orientador Geraldo R. Martins da [Costa]   
Roberto

Este exemplar corresponde à redação final da tese  
defendida por LEONARDO NEPOMUCENO

aprovada pela Comissão  
Julgadora em 21.06.93.

  
Orientador

Dissertação submetida à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Campinas, para preenchimento dos pré-requisitos parciais para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

junho 1993

Aos meus pais

Este trabalho foi suportado pela **FAPESP** através do projeto temático de equipe sobre o  
Planejamento e Operação de Energia Elétrica com Predominância de Geração  
Hidroelétrica.

# Resumo

A execução de funções avançadas em centros de controle tais como análise de contingências, despacho de reativos, etc, necessitam modelos adequados de representação das partes não observáveis (sistema externo). Os equivalentes externos clássicos foram desenvolvidos visando basicamente a análise de contingências. Destaca-se o desempenho do equivalente **WARD ESTENDIDO (W.E.)** que hoje representa o estado da arte para os modelos baseados em redução de circuitos.

Neste trabalho busca-se avaliar o desempenho do equivalente **W.E.** em resposta a alterações ocorridas em estudos de otimização. Além disso, é feita a proposta de um modelo, denominado **WARD REATIVO INTERNO (WRINT)**, resultante de uma adaptação no **W.E.** visando uma melhoria de desempenho frente a alterações ocorridas nos estudos de otimização. A idéia geral desse modelo é refletir para dentro do sistema interno a capacidade de resposta reativa do equivalente **W.E.**

São apresentados resultados comparativos de testes computacionais e detalhes de implementação das rotinas utilizadas.

# Abstract

The execution of functions such as contingency analysis, optimization, reactive dispatch, etc, at the control centers requires appropriate models representing the non-observable parts (external sistem). The classical external equivalentents have been developed considering basically the contingency analysis. This work points out the performance of the **EXTENDED WARD EQUIVALENT (W.E.)**, which currently represents the state of art concerning reduced circuit based models.

The work analyzes the **W.E.** response to changes occurred in optimization studies. Moreover, a new model, named **INTERNAL REACTIVE WARD (WRINT)**, resulting from an adaptation of the **W.E.** is proposed focussing on the improvement of the equivalent in case of changes occurred in optimization studies. The model's general idea is to reflect the equivalent's capacity of reactive response into the internal system.

Comparative computational test results are shown. The details of routines implementation are also pointed out.

# Agradecimentos

Ao Anésio, pela compreensão e orientação paciente e amiga.

À FAPESP, que propiciou todas as condições para que este trabalho pudesse ser concluído.

Ao pessoal do laboratório 23 do DSCE: Caixeta, Carla, Bonato, Eliane, Paulão, Reinaldo, Tarcísio, Omar, Salimar, Maurício, João, Eduardo, Nilton, Mohammad, Ronaldo, Santos, Ary. O apoio, as dicas e os papos durante os cafezinhos no CABS foram imprescindíveis.

À minha família, pelo apoio incondicional em todos os meus projetos.

# Conteúdo

<b>RESUMO</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>ii</b>
<b>AGRADECIMENTOS</b>	<b>iii</b>
<b>CONTEÚDO</b>	<b>iv</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>viii</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>x</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 Introdução . . . . .	1
1.2 Objetivos . . . . .	3
1.3 Definição do Problema . . . . .	6
1.3.1 Introdução . . . . .	6
1.3.2 Divisão do Sistema Interligado . . . . .	7
1.3.3 Equivalentes Externos . . . . .	8
1.4 Aplicações . . . . .	9
1.4.1 Modos de Aplicação . . . . .	9
1.4.2 Análise de Segurança Estática . . . . .	9

1.4.3	Estudos de Otimização . . . . .	10
1.5	Organização do Trabalho . . . . .	11
<b>2</b>	<b>MODELOS DE EQUIVALENTES WARD</b>	<b>12</b>
2.1	Histórico . . . . .	12
2.2	Descrição . . . . .	13
2.3	Ward Passivo . . . . .	16
2.4	Ward com Injeção de Corrente . . . . .	16
2.5	Ward com Injeção de Potência . . . . .	17
2.6	Ward Admitância . . . . .	18
2.7	Ajuste do Equivalente na Fronteira . . . . .	20
2.8	Equivalente Ward Estendido . . . . .	21
2.8.1	Introdução . . . . .	21
2.8.2	Descrição . . . . .	21
2.8.3	Ward Estendido em Uma Etapa . . . . .	29
2.8.4	Ward Estendido com Admitância Shunt . . . . .	29
2.8.5	Ward Estendido com Barras Fictícias de Tensão Controladas . . . . .	29
2.9	Retenção de Barras de Controle de Tensão no Sistema Externo . . . . .	34
2.9.1	Introdução . . . . .	34
2.9.2	Modelos Equivalentes Reduzidos com Zonas de Amortecimento . . . . .	34
2.9.3	Método de Redução Adaptativa (R.A.) . . . . .	36
<b>3</b>	<b>MODELO WARD REATIVO INTERNO</b>	<b>39</b>
3.1	Introdução . . . . .	39
3.2	Modelos Equivalentes Aplicados ao Fluxo de carga Ótimo . . . . .	40
3.2.1	Representação das Perdas Externas . . . . .	40
3.2.2	Representação das Restrições Externas . . . . .	40

3.2.3	Representação da Resposta Reativa do Equivalente . . . . .	42
3.3	Descrição do Modelo <b>WARD REATIVO INTERNO</b> . . . . .	42
3.3.1	Introdução . . . . .	42
3.3.2	Algoritmo de Obtenção do <b>WRINT</b> . . . . .	44
3.3.3	Representação do <b>WRINT</b> . . . . .	46
3.3.4	Ajuste do Modelo <b>WARD REATIVO INTERNO</b> ao Caso Básico . . . . .	49
<b>4</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> . . . . .	<b>50</b>
4.1	Introdução . . . . .	50
4.2	Metodologia Utilizada . . . . .	51
4.3	Alterações de Contingência de Linha . . . . .	53
4.3.1	Introdução . . . . .	53
4.3.2	Caso 1 - Contingência da linha 1-2 . . . . .	53
4.3.3	Caso 2 - Contingência da linha 2-4. . . . .	54
4.3.4	Valores médios dos estudos de análise de contingência . . . . .	54
4.3.5	Considerações . . . . .	57
4.4	Alterações nas Tensões Controladas . . . . .	59
4.4.1	Introdução . . . . .	59
4.4.2	Caso 3 - Diminuição de 1% nas Tensões Internas . . . . .	59
4.4.3	Caso 4 - Aumento de 5% nas Tensões Internas . . . . .	60
4.4.4	Considerações . . . . .	64
4.5	Alterações nos Taps dos Transformadores . . . . .	65
4.5.1	Introdução . . . . .	65
4.5.2	Caso 5 - Aumento de 1% nos Taps dos Transformadores Internos . . . . .	65
4.5.3	Caso 6 - Aumento de 5% nos Taps dos Transformadores Internos . . . . .	66
4.5.4	Considerações . . . . .	68
4.6	Alterações em Múltiplas Variáveis de Controle . . . . .	70

	vii
4.6.1 Introdução . . . . .	70
4.6.2 Caso 7 . . . . .	70
4.6.3 Caso 8 . . . . .	71
4.6.4 Considerações . . . . .	73
<b>5 Conclusões</b>	<b>76</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>78</b>
<b>a Sistema para Estudos de Modelos Equivalentes</b>	<b>81</b>
<b>b Implementação do Modelo Ward-Estendido</b>	<b>84</b>
<b>c Implementação do Modelo Ward Reativo Interno</b>	<b>87</b>
<b>d Sistema Teste</b>	<b>92</b>

# Lista de Figuras

1.1	Sistema interligado . . . . .	2
1.2	Contingência de linha . . . . .	4
1.3	Alterações em variáveis de controle durante estudos de otimização. . . . .	5
1.4	Divisões de um Sistema . . . . .	6
2.1	Modelos de Equivalentes <b>WARD</b> . . . . .	15
2.2	Modelo <b>Ward Passivo</b> . . . . .	16
2.3	Cargas e Gerações Externas (Modelo Injeção de Corrente Constante) . . . . .	17
2.4	Modelo <b>Ward com Injeção de Potência.</b> . . . . .	18
2.5	Cargas e Gerações Externas (Modelo Admitância Constante) . . . . .	19
2.6	Modelo <b>Ward Admitância.</b> . . . . .	19
2.7	Problemas associados à redução da rede externa: modelos <b>Ward</b> . . . . .	23
2.8	Aterramento das barras PV's externas. . . . .	25
2.9	Formação da Matriz Admitância $Y$ . . . . .	26
2.10	Redução da matriz admitância $Y$ . . . . .	27
2.11	Redução da matriz admitância $Y'$ . . . . .	28
2.12	Modelo <b>Ward Estendido em uma Etapa</b> . . . . .	30
2.13	Modelo <b>Ward Estendido com shunts fictícios</b> . . . . .	31
2.14	Modelo <b>Ward Estendido com barras de tensão controlada fictícias</b> . . . . .	32
2.15	Divisão do sistema incluindo zonas de amortecimento . . . . .	35

2.16	Eliminação das barras externas até a zona de amortecimento . . . . .	35
2.17	Matriz admitância incluindo zonas de amortecimento . . . . .	37
2.18	Métodos de redução de redes . . . . .	38
3.1	Restauração do sistema externo a partir do sistema reduzido . . . . .	41
3.2	Processo de obtenção dos shunts internos. . . . .	45
3.3	Particionamento da matriz $Y_R$ . . . . .	46
3.4	Processo de cálculo da parte reativa. . . . .	47
3.5	Modelo <b>WARD REATIVO INTERNO</b> . . . . .	48
4.1	Diagrama fasorial: cálculo dos erros percentuais. . . . .	52
4.2	Caso 1 - Resposta dos modelos. . . . .	55
4.3	Caso 2 - Resposta dos modelos. . . . .	56
4.4	Valores médios - Resposta dos modelos. . . . .	58
4.5	Caso 3 - Resposta dos modelos. . . . .	61
4.6	Caso 4 - Resposta dos modelos. . . . .	63
4.7	Caso 5 - Resposta dos modelos. . . . .	67
4.8	Caso 6 - Resposta dos modelos. . . . .	69
4.9	Caso 7 - Resposta dos modelos. . . . .	72
4.10	Caso 8 - Resposta dos modelos. . . . .	74
a.1	Estrutura do programa de equivalentes utilizado na obtenção dos resultados	83
b.1	Obtenção do modelo <b>W.E.</b> . . . . .	86
c.1	Coluna $k$ da matriz $Y_R^{eq}$ . . . . .	88
c.2	Divisão das admitâncias fictícias . . . . .	89
c.3	Adaptação do modelo <b>W.E.</b> ao cálculo do modelo <b>WRINT</b> . . . . .	91
d.1	Sistema IEEE30 . . . . .	93

## Lista de Tabelas

4.1	Erros percentuais máximos para o reativo obtidos no caso 3. . . . .	60
4.2	Erros percentuais máximos para o reativo obtidos no caso 4. . . . .	62
4.3	Erros percentuais máximos para o reativo obtidos no caso 5. . . . .	66
4.4	Erros percentuais máximos para o reativo obtidos no caso 6. . . . .	68
4.5	Erros percentuais máximos para o reativo obtidos no caso 7. . . . .	71
4.6	Erros percentuais máximos para o reativo obtidos no caso 8. . . . .	73
d.1	Dados do sistema IEEE30 . . . . .	92

# Capítulo 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 Introdução

Os chamados centros de controle e supervisão de sistemas de potência foram propostos por DyLiacco [8] em 1965 com o objetivo de aumentar a confiabilidade da operação destes sistemas . A operação e controle da rede interligada se tornavam nesta época cada vez mais difíceis, devido ao aumento das interligações dos sistemas. Acontecimentos como o black-out de Nova York, deixando a cidade sem energia durante várias horas, forçaram a comunidade científica e as empresas do setor elétrico a repensarem o controle e supervisão dos sistemas de potência.

Atualmente, os centros de supervisão e controle exercem o controle diário das áreas do sistema ditas de sua jurisdição. Isto é feito com o auxílio de uma grande estrutura de aquisição e processamento de dados (medidas analógicas, estado de fechamento das chaves e disjuntores, etc) e de estudos realizados pelas chamadas funções avançadas. Estas funções são ferramentas computacionais utilizadas na análise dos dados, e proveêm informações importantes para a operação mais adequada no que diz respeito à segurança e qualidade operacional. Com base nos resultados apresentados por estas funções, são tomadas ações de controle que visam a alterar convenientemente o ponto de operação do sistema.

Do ponto de vista operacional, as funções avançadas podem ser divididas em duas categorias [14] :

- As funções que visam a reprodução das condições atuais do sistema, tais como:
  - Configurador da rede
  - Estimador de estado

- Fluxo de carga operacional, etc.

Estas funções podem ser realizadas apenas com informações da parte monitorada pelo centro de controle, não envolvendo mudança no estado da rede.

- As funções que envolvem mudança no estado da rede, necessitando das reações da rede total interligada (ver figura 1.1) e de informações a respeito das áreas conectadas ao sistema monitorado pelo centro de controle. Entre elas temos:

- Análise de contingências
- Ações de controle
- Otimização da operação
- Despacho econômico
- Análise de curto-circuito
- Análise de estabilidade, etc.

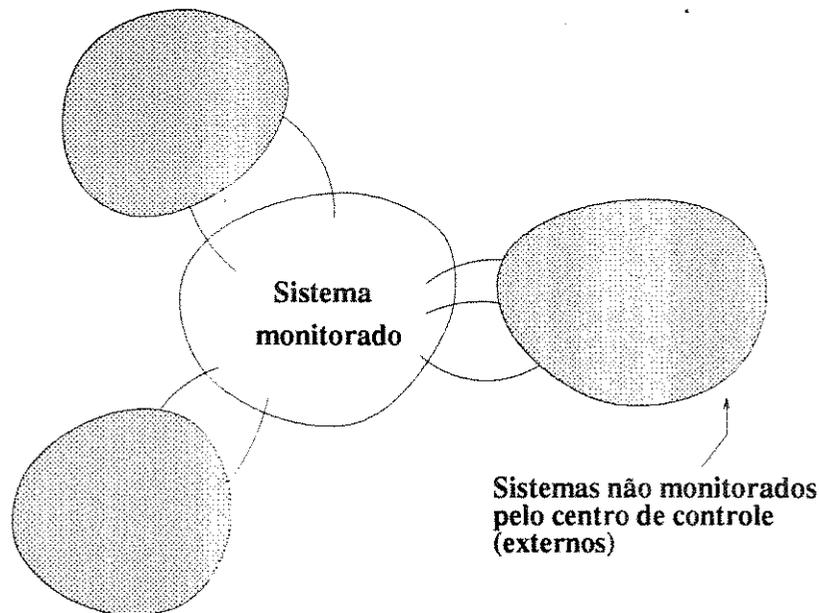


Figura 1.1: Sistema interligado

A utilidade prática das funções acima está diretamente ligada à capacidade de se representar corretamente os elementos da rede (sem os quais tais funções jamais poderiam ser realizadas), bem como suas reações às mudanças no ponto de operação.

É portanto no segundo grupo de funções avançadas que os equivalentes encontram sua principal aplicação prática: representar as reações das partes não monitoradas pelo centro às mudanças no ponto de operação, a fim de possibilitar os estudos realizados pelas funções avançadas.

## 1.2 Objetivos

Classicamente, os modelos equivalentes têm sido desenvolvidos com o objetivo de se representar as partes não observáveis ao sistema monitorado, para a realização das funções de análise de segurança estática "on-line" [20]-[27].

Nestes estudos, um "rank" de contingências de linha (ver figura 1.2) escolhido é simulado a fim de verificar níveis de segurança do sistema. O modelo equivalente deve possuir uma reação próxima àquela que o modelo externo representado em detalhe teria para cada contingência simulada. Para tais estudos o modelo equivalente **WARD ESTENDIDO** [20] representa o estado da arte para equivalentes reduzidos.

O presente trabalho tem como objetivo inicial investigar as reações do modelo **WARD ESTENDIDO** às alterações em variáveis de controle reativas (ver figura 1.3), que ocorrem durante estudos de otimização no sistema interno. As variáveis de controle utilizadas nos modelos de otimização, cujas alterações são analisadas neste trabalho são:

- Tensões controladas;
- Taps de transformadores.

É ainda objetivo do trabalho propor um modelo denominado **WARD REATIVO INTERNO**, que melhor represente as reações reativas dos sistemas conectados junto ao sistema monitorado (conforme a figura 1.1), frente às alterações nas variáveis de controle ligadas à parte reativa do problema. A idéia deste modelo, baseado no modelo **WARD ESTENDIDO**, é representar a reação reativa da parte externa agindo diretamente sobre um conjunto de barras da parte interna do sistema. Este conjunto de barramentos deve ser definido levando-se em conta especificidades do sistema em estudo.

É importante ressaltar que a representação adequada da resposta das partes não observáveis ao sistema às alterações em variáveis de controle no sistema interno é um primeiro passo no sentido de se tentar efetivamente modelar o sistema externo (com suas restrições e perdas efetivamente representadas) em estudos de otimização. Portanto, este trabalho tem como objetivo caminhar no sentido de melhor representar o sistema externo durante estudos de otimização reativa.

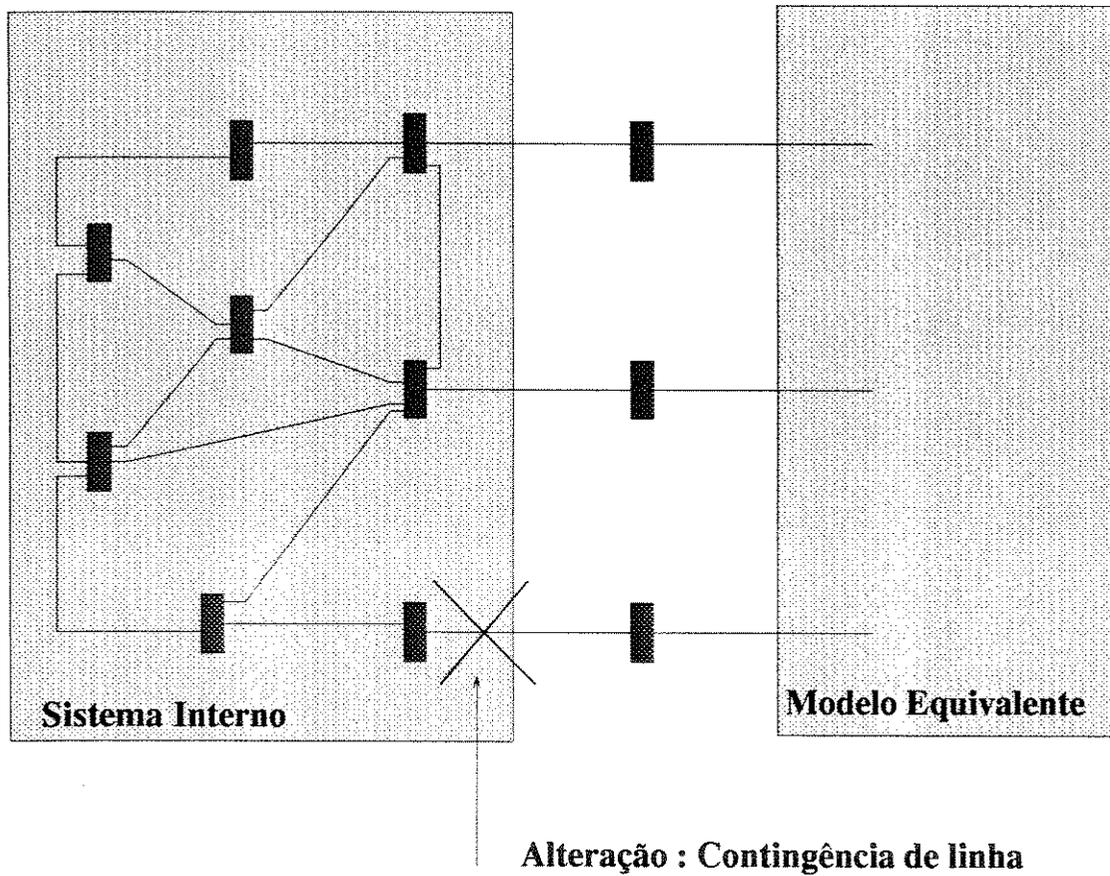


Figura 1.2: Contingência de linha

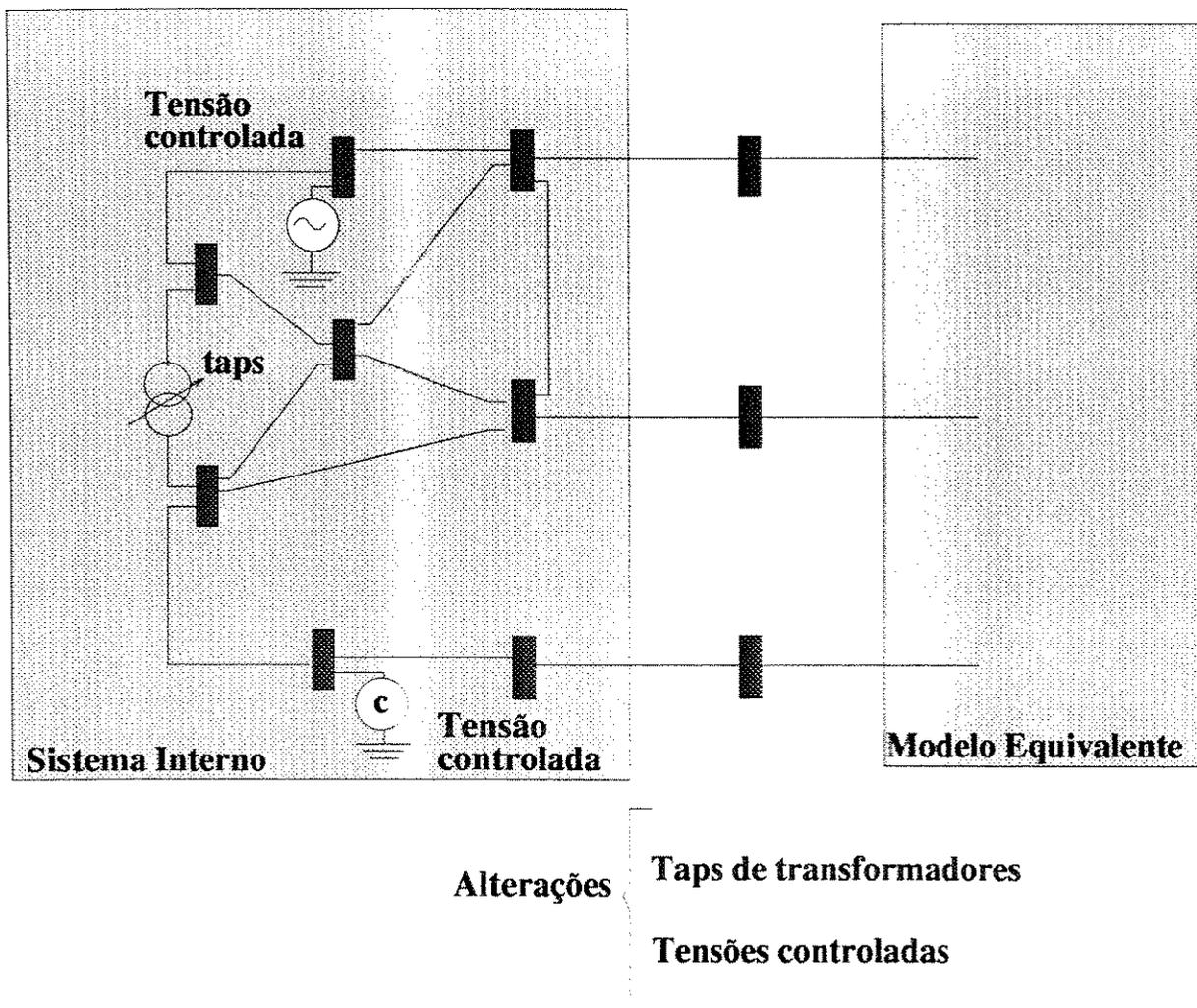


Figura 1.3: Alterações em variáveis de controle durante estudos de otimização.

Serão apresentados e discutidos resultados comparando as respostas dos modelos **WARD ESTENDIDO** e **WARD REATIVO INTERNO** às alterações citadas acima. Os resultados obtidos mostram uma melhoria nos erros de resposta do modelo **WRINT** quando comparado ao modelo **W.E.**.

## 1.3 Definição do Problema

### 1.3.1 Introdução

Uma área de um sistema de potência é parte de uma rede interconectada, como mostrado na figura 1.4.

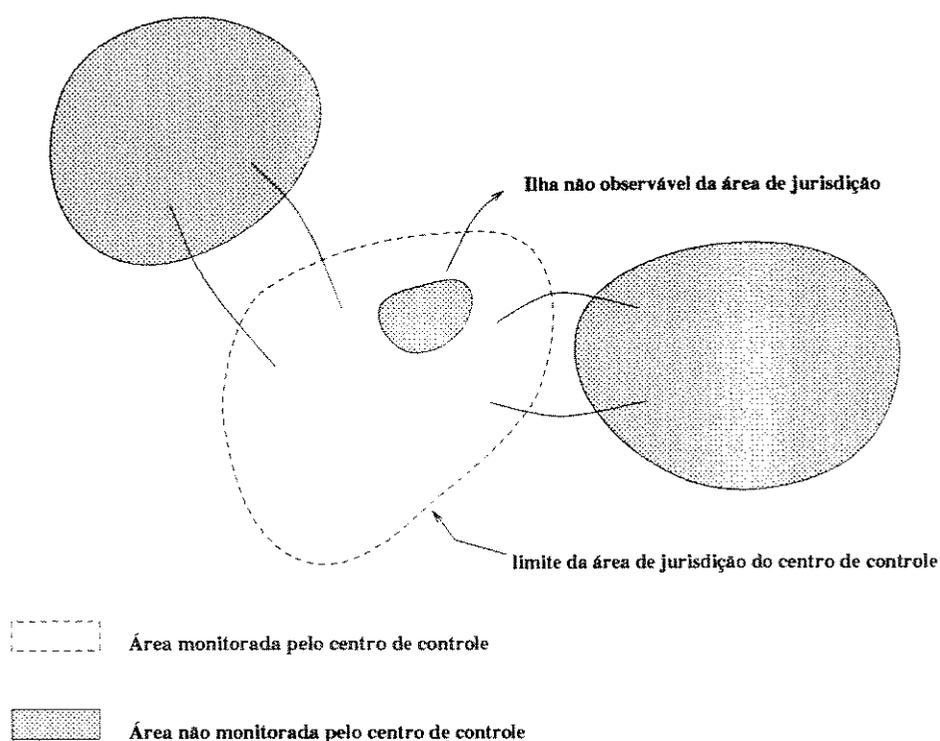


Figura 1.4: Divisões de um Sistema

Seria necessária a representação explícita de toda a rede interligada para que os estudos realizados nesta área (sejam eles de análise de contingência, despacho de reativos, otimização, etc) fossem totalmente confiáveis. Entretanto, a maioria dos estudos exigem

para este modelamento dados relativos às partes não observáveis que podem não estar disponíveis ao centro de controle.

A seguir serão apresentados alguns conceitos básicos que definem o problema de equivalenciamento de sistemas de potência, tais como a divisão dos sistemas interligados e o próprio conceito de equivalente estático.

### 1.3.2 Divisão do Sistema Interligado

Do ponto de vista de estudos de equivalenciamento, pode-se dividir o sistema interligado da seguinte forma [14] :

#### Sistema Interno

É a área do sistema de potência que é observável pelo centro de controle, ou seja, pode ser resolvida pelo processador topológico e estimador de estado com a precisão necessária para as subseqüentes funções avançadas. Existem, entretanto, partes do subsistema correspondentes à área de jurisdição do centro de controle que não são observáveis, ou que por algum motivo ficam temporariamente não observáveis. Estas partes são denominadas ilhas não observáveis.

Assume-se que estas ilhas ou são incluídas no sistema externo (neste caso a referência [9] cita inclusive o termo "equivalente interno" para designar o modelo equivalente utilizado para representar a ilha.), ou "são feitas" observáveis através de pseudomedidas (valores estimados e que na medida do possível se aproximam dos valores reais) [15].

#### Sistema Externo

Define-se como sistema externo a parte da rede que não é observável pelo centro de controle. Na realidade não é necessária a representação de toda a parte não observável. Quanto mais distantes estejam os equipamentos da fronteira, menor será o efeito que eles terão no sistema interno [9] [14], não sendo necessária as suas representações no modelo. São normalmente feitos estudos off-line usando procedimentos heurísticos baseados no conhecimento do sistema e em várias soluções de fluxo de carga a fim de identificar as partes remotas do sistema às quais o sistema interno não é sensível.

## Fronteira

As barras de fronteira são a interface entre os sistemas interno e externo. Dado um estado estimado para o sistema interno, é possível calcular o estado de uma barra de fronteira a partir dos valores dos fluxos de interligação e tensões nas barras adjacentes à fronteira.

### 1.3.3 Equivalentes Externos

De posse das noções anteriores pode-se conceituar os equivalentes externos. O equivalenciamento de sistemas de potência não consiste da obtenção de um modelo exato do sistema externo ( o que seria entretanto bastante desejável). O objetivo é produzir um modelo estático que, conectado ao subsistema interno/fronteira, represente com a máxima fidelidade possível as reações que o sistema externo teria frente a determinadas alterações em variáveis do sistema interno. Estas alterações ocorrem nos estudos realizados pelas funções avançadas tais como os estudos de análise de contingência, despacho econômico, etc.

Os modelos devem ser construídos com as informações disponíveis do sistema externo, sendo que os dados necessários e não disponíveis devem ser assumidos com base na experiência com o sistema. Os dados disponíveis para o sistema externo são geralmente :

- Soluções de fluxo de carga para determinadas condições típicas;
- Programação e previsões de geração, intercâmbio;
- Programação e previsões de carga e interrupção;
- Comunicação manual ou via dispositivos digitais de dados;
- Topologia da rede externa básica.

A maioria dos equivalentes reduzidos [20] [21] trabalha com apenas os dados relativos à topologia do sistema externo. Já os equivalentes não reduzidos [22] [23] [24], procuram utilizar todos os dados disponíveis deste sistema, tratando em alguns casos a redundância de informações [24].

## 1.4 Aplicações

### 1.4.1 Modos de Aplicação

Existem várias maneiras nas quais os equivalentes podem ser aplicados, definidas como modos de aplicação [9] [14]:

#### Modo 1

Dispõe-se de uma solução básica de fluxo de carga de toda a rede interconectada. Esta situação é típica de aplicações de planejamento de sistemas. Neste modo de aplicação o equivalente é opcionalmente utilizado com o objetivo de economia computacional, através da redução do sistema.

#### Modo 2

Dispõe-se de uma solução básica apenas para o sistema interno. Nestes casos a representação do modelo externo por um equivalente é uma imposição do próprio problema, já que não se dispõe de dados precisos à cerca do sistema externo. Esta situação é típica de aplicações on-line, onde os centros regionais possuem informações de dados correspondentes apenas a sua área de jurisdição.

#### Modo 3

Dispõe-se apenas da configuração do sistema interno, não sendo fornecido o seu estado básico. Neste caso o equivalente obtido separadamente deve ser acoplado ao sistema interno para o cálculo de um estado básico aproximado. É um caso típico de problemas de planejamento e previsão de carga.

### 1.4.2 Análise de Segurança Estática

A função de análise de segurança estática requer estudos de análise de contingência, que consiste em simular eventos prováveis de ocorrer no sistema monitorado (contingência de linhas, transformadores, geração, etc) a fim de prever possíveis danos que estes eventos possam provocar no sistema.

Na análise de contingência, o principal problema enfrentado na modelagem do sistema externo tem sido a representação da resposta reativa externa, principalmente das barras de tensão controlada e shunts externos [9]. Os modelos **WARD ESTENDIDO** e suas variações foram desenvolvidos no sentido de suprir esta deficiência na resposta de reativos.

### 1.4.3 Estudos de Otimização

Um modelo que represente o sistema externo no caso de estudos de otimização no sistema interno deve possuir, além das exigências requeridas pelo equivalente que satisfaz as restrições do fluxo de carga convencional, outras restrições, tais como:

1. Representação das respostas reativas relacionadas às alterações nas variáveis de controle que ocorrem no fluxo de carga ótimo.
2. Representação das perdas externas [19]
3. Representação das restrições externas [19]

Um modelo que represente o sistema externo para estudos de otimização, com as características citadas nos itens acima, é certamente bastante complexo. Ainda não consta na literatura de equivalentes externos nenhum tipo de implementação ou mesmo algum modelo que se proponha a tratar as restrições citadas. O que ocorre, na prática, é que modelos equivalentes tradicionais têm sido utilizados, mesmo precariamente, em estudos de otimização. Na referência [19] mostra-se claramente que esta representação é às vezes bastante grosseira no tocante à precisão atingida.

Na referência [19] Tinney apresenta algumas idéias que poderiam ser trabalhadas no sentido de tentar incluir na modelagem as restrições 2. e 3. Um modelo que efetivamente trate estas restrições, entretanto ainda não foi proposto.

Como em alguns modos de aplicação os modelos equivalentes se tornam imprescindíveis, evidencia-se a necessidade de se investigar um modelo que compatibilize estas restrições, a fim de que os estudos de otimização realizados no sistema interno não sejam invalidados pela utilização do equivalente.

Neste trabalho é proposto um modelo que apresenta bom desempenho com relação às alterações nas variáveis reativas (taps de transformadores e tensão das barras com controle). Serão apresentados resultados comparativos entre o **WARD ESTENDIDO**

e o **WARD REATIVO INTERNO** proposto, mostrando que, para alterações em variáveis de controle, as características de precisão apresentadas pelo **WARD REATIVO INTERNO** são melhores.

## 1.5 Organização do Trabalho

Os conceitos iniciais necessários à definição dos objetivos e motivações do trabalho foram apresentados neste capítulo introdutório.

No capítulo 2 aborda-se a metodologia de equivalentes reduzidos **WARD**, dando ênfase ao modelo **WARD ESTENDIDO**, estado da arte para equivalentes reduzidos, e que será objeto de testes no capítulo 4.

No capítulo 3 descreve-se o modelo equivalente **WARD REATIVO INTERNO**, proposto com o objetivo de melhor representar as respostas dos sistemas externos às alterações em variáveis de controle que ocorrem durante estudos de otimização.

No capítulo 4 são analisadas as respostas dos modelos **W.E.** e **WRINT** para várias situações de alterações em variáveis de controle. Primeiramente os modelos são testados para alterações em cada uma das variáveis reativas de controle separadamente. A seguir os modelos são testados para múltiplas alterações (alterações em todas as variáveis de controle ao mesmo tempo), situação que realmente ocorre nos estudos de otimização. Nestes exemplos também foram alterados os valores dos despachos de potência, ligados à parte ativa de resposta dos equivalentes.

As conclusões resultantes da comparação entre os modelos estão sintetizadas no capítulo 5.

Nos apêndices são abordados aspectos de implementação computacional dos modelos **W.E.** e **WRINT** e é descrito o sistema teste utilizado no capítulo 4 para a obtenção de resultados.

## Capítulo 2

# MODELOS DE EQUIVALENTES WARD

### 2.1 Histórico

Os modelos de equivalenciamento tipo **WARD**, descritos na referência [6], foram desenvolvidos em 1949 por J.B. Ward, antes mesmo do advento dos computadores digitais. Naquela época, os estudos realizados em sistemas de potência eram feitos com o auxílio dos chamados Analisadores de Redes. Nestes, o sistema em estudo era representado por um circuito analógico montado nos laboratórios em escala reduzida.

Com as partes externas ao sistema em estudo representadas pelo modelo reduzido **WARD** as dimensões do sistema interligado (sistema em estudo e demais partes externas) eram reduzidas, tornando possíveis as simulações e estudos dos sistemas reais daquela época.

Assim que surgiram, os computadores digitais começaram a substituir gradativamente os Analisadores de Redes nos estudos, devido as suas melhores características de precisão e velocidade de processamento.

Com a segurança adquirida em função da viabilização dos estudos feitos com esses computadores em grandes sistemas interligados, foi possível aumentar, de forma gradativa, a complexidade dos sistemas de potência através do aumento em suas dimensões e grau de interligação.

Para os sistemas cada vez maiores e mais interligados surgiu a necessidade de estudos mais apurados, a fim de que sua confiabilidade e segurança não fossem afetadas. Além disso, outros problemas decorrentes da utilização da tecnologia digital apareceram,

tais como:

- tornou-se necessário que os estudos fossem processados da maneira mais rápida possível, já que eram realizados com uma frequência muito maior;
- A medida que os sistemas aumentavam de tamanho, também tornou-se problema a quantidade de memória necessária ao seu armazenamento.

Com o objetivo de preencher os requisitos acima, isto é, produzir modelos de sistemas externos com a precisão necessária à posterior utilização das funções avançadas, e de dimensões reduzidas, de forma a comportar espaço de memória coerentes com a capacidade dos computadores, os estudos de equivalenciamento, e os modelos **WARD**, foram retomados e muitas variações deste modelamento foram propostas.

## 2.2 Descrição

O sistema de transmissão é representado através de um modelo linear (corrente x tensão) através da equação nodal de balanço de correntes como

$$[\dot{I}] = [Y] * [\dot{V}] \quad (2.1)$$

onde:

- $[\dot{I}]$  - vetor das injeções nodais líquidas de correntes fasoriais;
- $[Y]$  - matriz admitância nodal do sistema;
- $[\dot{V}]$  - vetor das tensões nodais fasoriais.

A equação 2.1 é reorganizada matricialmente particionando-se a matriz admitância nodal de modo a identificar as partes interna (I), fronteira (F) e externa (E) do sistema de transmissão como anteriormente conceituado

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_E \\ \dot{I}_F \\ \dot{I}_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{EE} & Y_{EF} & 0 \\ Y_{FE} & Y_{FF} & Y_{FI} \\ 0 & Y_{IF} & Y_{II} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \dot{V}_E \\ \dot{V}_F \\ \dot{V}_I \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

onde:

- $\dot{I}_{E,F,I}$  - vetor das injeções nodais líquidas de correntes fasoriais;
- $Y_{E,F,I}$  - submatrizes admitância;
- $\dot{V}_{E,F,I}$  - vetor das tensões fasoriais de barra.

Os modelos **WARD** se baseiam na eliminação gaussiana das equações do subsistema externo, de forma que o sistema resultante fique reduzido ao subsistema interno/fronteira, da seguinte forma

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_F^* \\ \dot{I}_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{FF}^* & Y_{FI} \\ Y_{IF} & Y_{II} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \dot{V}_F \\ \dot{V}_I \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

onde:

$$\dot{I}_F^* = \dot{I}_F - Y_{FE} * Y_{EE}^{-1} * \dot{I}_E \quad (2.4)$$

$$Y_{FF}^* = Y_{FF} - Y_{FE} * Y_{EE}^{-1} * Y_{EF} \quad (2.5)$$

As equações 2.4 e 2.5 fornecem o modelo equivalente **WARD** para o sistema externo. De acordo com estas equações o sistema externo pode ser representado por admitâncias fixas (equação 2.5) conectadas entre as barras de fronteira e por injeções de corrente equivalentes na fronteira, conforme mostrado na figura 2.1.

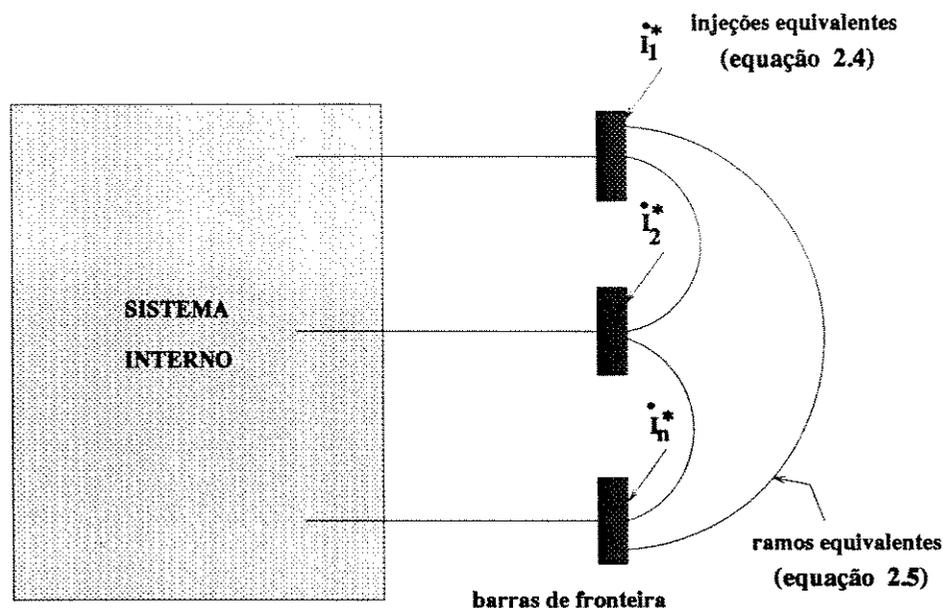


Figura 2.1: Modelos de Equivalentes WARD

Conhecendo-se o estado de interligação da rede externa pode-se facilmente montar a matriz admitância e obter, através da eliminação de Gauss a matriz  $Y_{FF}^*$  dada na equação 2.5. Já as injeções de correntes equivalentes não podem ser calculadas diretamente, a menos que se disponha de informações atualizadas a respeito das injeções do sistema externo.

As injeções equivalentes calculadas em 2.4 são "projeções" das injeções externas  $\dot{I}_E$  através da rede  $Y_{FE} + Y_{EE}^{-1}$  vistas entre as barras externas e a fronteira, ou seja são injeções "enxergadas" pela fronteira, decorrentes do estado atual do sistema externo. Sendo assim, sempre que houver variações em injeções externas (carga ou geração) as injeções equivalentes dadas na equação 2.4 devem ser atualizadas. Entretanto, isto nem sempre é possível. Em aplicações em tempo real por exemplo, seria necessário se dispor de informações "on-line" a respeito do sistema externo, o que ainda não é possível na maioria dos centros de controle do Brasil e do exterior [23].

Os modelos WARD existentes apresentam soluções diferentes para este problema. A seguir, uma breve descrição dos principais, dentre estes modelos, será feita. Não haverá um aprofundamento em comentários e comparações, o que pode ser encontrado nas referências [9][10][14]. Apenas o modelo WARD ESTENDIDO, por ser o equivalente reduzido que, na maioria das aplicações, melhores resultados tem apresentado, será enfocado

em mais detalhe.

## 2.3 Ward Passivo

Neste modelo as injeções equivalentes são simplesmente desconsideradas. O equivalente resultante é uma representação apenas passiva da rede externa, não levando em conta as cargas e gerações externas. Logicamente, este modelo não apresenta bons resultados apesar de ser ainda comumente utilizado[23]. O modelo é mostrado na figura 2.2.

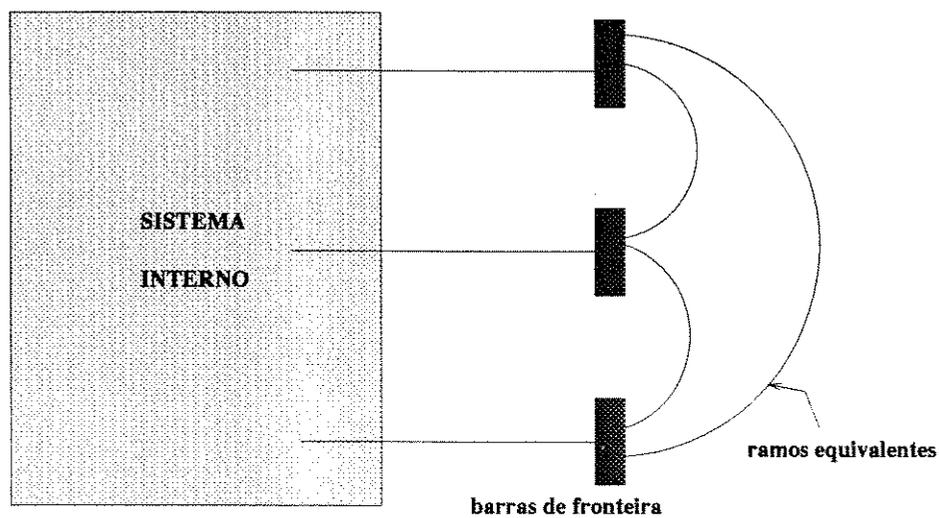


Figura 2.2: Modelo Ward Passivo

## 2.4 Ward com Injeção de Corrente

Neste modelo as cargas e gerações externas são modeladas como corrente constante (ver figura 2.3). A equação 2.4 é calculada através dos dados operacionais do sistema externo para o caso básico, da seguinte forma

$$\dot{I}_E = \frac{\bar{S}_E}{\bar{V}_E} \quad (2.6)$$

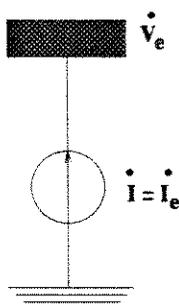


Figura 2.3: Cargas e Gerações Externas (Modelo Injeção de Corrente Constante)

onde:

- $\bar{S}_E$  - conjugado das injeções de potência complexa externas para o caso básico;
- $\bar{V}_E$  - conjugado das tensões das barras externas para o caso básico.

Este modelo é geralmente utilizado em estudos de curto circuito, não sendo utilizado nos casos em que se utiliza o fluxo de carga para a obtenção do estado do sistema interno/fronteira/equivalente.

## 2.5 Ward com Injeção de Potência

Se as correntes  $\dot{I}_E$ , calculadas no modelo anterior, são convertidas em potências constantes  $S'$  e inseridas no modelo (conforme figura 2.4), tem-se o modelo de potência constante para as cargas.

O modelamento das injeções equivalentes como potência constante é eficiente para barras de potência constante (PQ), entretanto para barras PV's que possuem uma resposta reativa que varia a partir do caso básico, aparecem problemas de precisão [9]. Uma solução seria reter as barras PV's externas, não eliminando-as, o que entretanto poderia causar degeneração no grau de esparsidade do sistema resultante dificultando os estudos posteriores a serem realizados neste sistema.

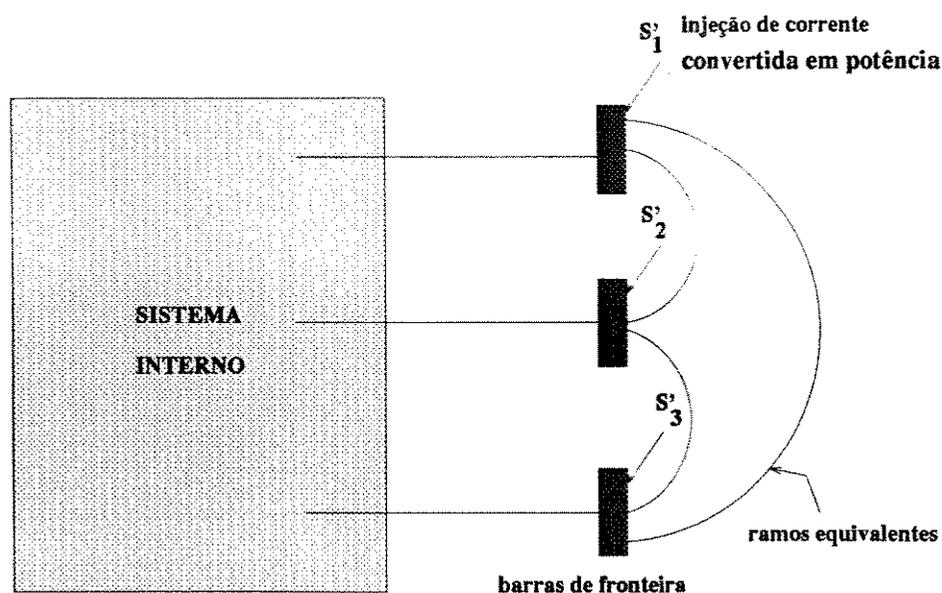


Figura 2.4: Modelo Ward com Injeção de Potência.

## 2.6 Ward Admitância

Neste modelo as cargas e gerações externas são representadas por admitâncias shunt constantes (conforme figura 2.5) calculadas a partir do caso básico da seguinte forma

$$Y_E = \frac{\bar{S}_E}{V_E^2} \quad (2.7)$$

onde:

- $\bar{S}_E$  - conjugado das injeções de potência complexa externa para o caso básico;
- $V_E$  - módulo das tensões das barras externas para o caso básico;
- $Y_E$  - admitância shunt.

As admitâncias shunt são incluídas na matriz admitância, que só então é reduzida. Para isto, anulam-se todas as injeções externas e temos  $\dot{I}_E = 0$  e a equação 2.4 é ignorada. Após a redução as cargas aparecem refletidas na fronteira como shunts equivalentes, conforme a figura 2.6.

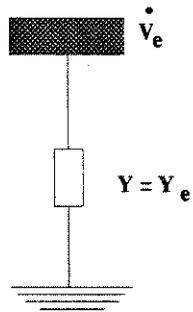


Figura 2.5: Cargas e Gerações Externas (Modelo Admitância Constante)

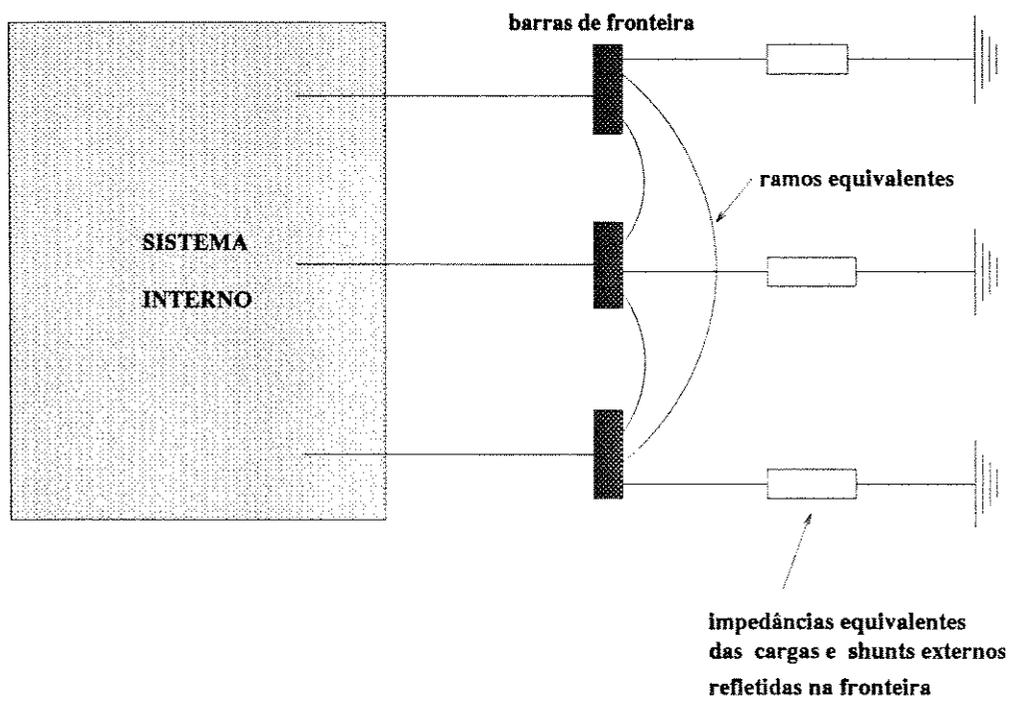


Figura 2.6: Modelo Ward Admitância.

## 2.7 Ajuste do Equivalente na Fronteira

No conjunto de equações lineares dado em 2.1 as cargas externas estão representadas como correntes especificadas. Se as cargas reais fossem bem representadas por esse modelo, o equivalente reduzido dado pelas equações 2.4 e 2.5 seria exato. Entretanto, na prática como se sabe, as cargas externas são não lineares constituindo um misto entre:

- Potência constante ( $S = cte$ )
- Corrente constante ( $I = cte$ )
- Admitância constante ( $Y = cte$ )

Além disso, no cálculo de fluxo de carga do subsistema interno /fronteira /equivalente as cargas são representadas como potência constante. Este tipo de representação fornece equações não lineares (equações básicas do fluxo de carga). Em contrapartida, a redução de circuitos pressupõe equações de rede lineares em corrente e tensão.

A utilização do fluxo de carga, com modelo de carga em  $S = cte$ , para a resolução da rede implica portanto na necessidade de se ajustar o modelo equivalente de forma que as cargas e gerações externas possam ser devidamente representadas. Este ajuste, denominado ajuste de fronteira ("Boundary Matching"), é feito calculando-se as injeções equivalentes de potência na fronteira que representam as cargas e gerações externas para um determinado caso básico.

Estas injeções equivalentes são calculadas de forma que os fluxos nas barras de fronteira vindos do equivalente igualem exatamente os fluxos nas linhas de interligação (tie-lines), sem que o estado básico seja alterado. Este processo é feito utilizando-se o seguinte algoritmo:

- Resolver para o estado atual o modelo equivalente mantendo-se as tensões complexas das barras de fronteira fixadas em seus valores básicos já conhecidos.
- Calcular os "mismatches" de potência em cada barra de fronteira somando-se os fluxos do sistema interno, do equivalente e de cada geração/carga conhecida.
- Acrescentar esses "mismatches" às barras de fronteira como injeções fictícias.

Este ajuste foi proposto em 1949 por J. B. Ward [6] e é utilizado na maioria dos modelos equivalentes.

Para aplicações em tempo real este ajuste na fronteira possui algumas vantagens:

- O equivalente fica automaticamente casado ao estado básico atual.
- As injeções fictícias tendem a compensar para o caso básico os erros na modelagem da rede externa [9].
- A cada estado estimado para o sistema interno pode-se proceder facilmente a atualização destas injeções fictícias.

## 2.8 Equivalente Ward Estendido

### 2.8.1 Introdução

Ao representarmos as reações de determinadas partes de um sistema elétrico por um modelo equivalente estamos fatalmente incorrendo em certos erros de resposta. É conveniente que tais erros sejam mantidos em níveis aceitáveis, a fim de que os estudos realizados neste sistema sejam confiáveis.

No equivalenciamento de sistemas de potência ocorre que tradicionalmente os erros de resposta relacionados à parte reativa do modelo são sempre maiores. O modelo **WARD ESTENDIDO** trata de forma mais eficiente as respostas de reativo/tensão, buscando melhorá-las através da inserção de shunts fictícios ligados às barras de fronteira, ou conectando-se ramos radiais entre a fronteira e barras PV's fictícias. A seguir será descrito processo de obtenção do modelo **W.E.**

### 2.8.2 Descrição

O modelo **W.E.** surgiu de melhorias associadas a alguns problemas que aparecem nos modelos **Ward** citados anteriormente, e que estão relacionados na literatura de equivalentes externos. O modelo **W.E.** atua diretamente nestes problemas que, nos modelos **Ward**, limitam a precisão e estabilidade numérica. Estas deficiências básicas serão comentadas a seguir, bem como os artifícios utilizados pelo **W.E.** com o objetivo de tratá-las.

1. Ao eliminarmos as barras externas da rede (processo realizado computacionalmente por eliminação de Gauss), pela metodologia **WARD** de resolução teremos a rede formada pelos subsistemas interno/fronteira conforme figura 2.7. Os ramos equivalentes são determinados ao reinterpretarmos os elementos da matriz reduzida  $Y_{eq}$  como elementos de rede. Estes ramos equivalentes calculados geralmente apresentam problemas do tipo:

- impedâncias negativas nas ligações equivalentes.
- relação  $X/R$  baixa nas ligações equivalentes.
- elementos shunts anormalmente altos.

Estas impedâncias "não usuais" tendem a prejudicar tanto a precisão quanto a estabilidade numérica dos modelos. Na referência [20] é mostrado que estas impedâncias não usuais estão diretamente relacionadas à inclusão de vários elementos shunts (bancos de capacitores, reatores de barra, etc) na formação da matriz admitância. Ao serem eliminados, os elementos shunts são indevidamente refletidos nas ligações da fronteira.

2. Nos modelos **Ward** não são levadas em conta as reações reativas externas dos shunts e das barras de tensão controlada. Isto compromete bastante a precisão dos modelos, particularmente nos casos em que a alteração no sistema interno provoca por parte do sistema externo reações reativas mais significativas.

Percebe-se pela análise do problema 1. citado acima que a parte reativa de resposta do sistema externo (relacionada aos shunts) influi de forma negativa, prejudicando tanto a precisão quanto o condicionamento numérico do modelo. Entretanto, esses elementos têm papel importante na resposta reativa do equivalente. Por outro lado os fluxos de potência ativa no sistema interno não são substancialmente afetados pela presença de elementos reativos externos tais como shunts ou por barras de controle de tensão. As impedâncias vistas pela fronteira para os fluxos de ativo e reativo são, portanto, diferenciadas neste modelo. Assim as reações externas para a parte ativa e reativa são consideradas de forma independente (desacopladas). É desta forma que o **W.E.** modela o sistema externo, subdividindo-o em duas partes: ativa e reativa.

Desta forma, utilizando-se a propriedade de desacoplamento ativo/reactivo que caracteriza os sistemas de potência, duas redes distintas são definidas na representação do sistema externo:

- a) Rede vista pela fronteira por onde circulam os fluxos de ativos, representada pela matriz admitância  $Y$ .
- b) Rede vista pela fronteira através da qual ocorre a reação reativa, representada pela matriz admitância  $Y'$

As matrizes admitâncias  $Y$  e  $Y'$  são utilizadas respectivamente nas partes ativa e reativa do modelo com vistas a suprir as deficiências 1. e 2. citadas anteriormente.

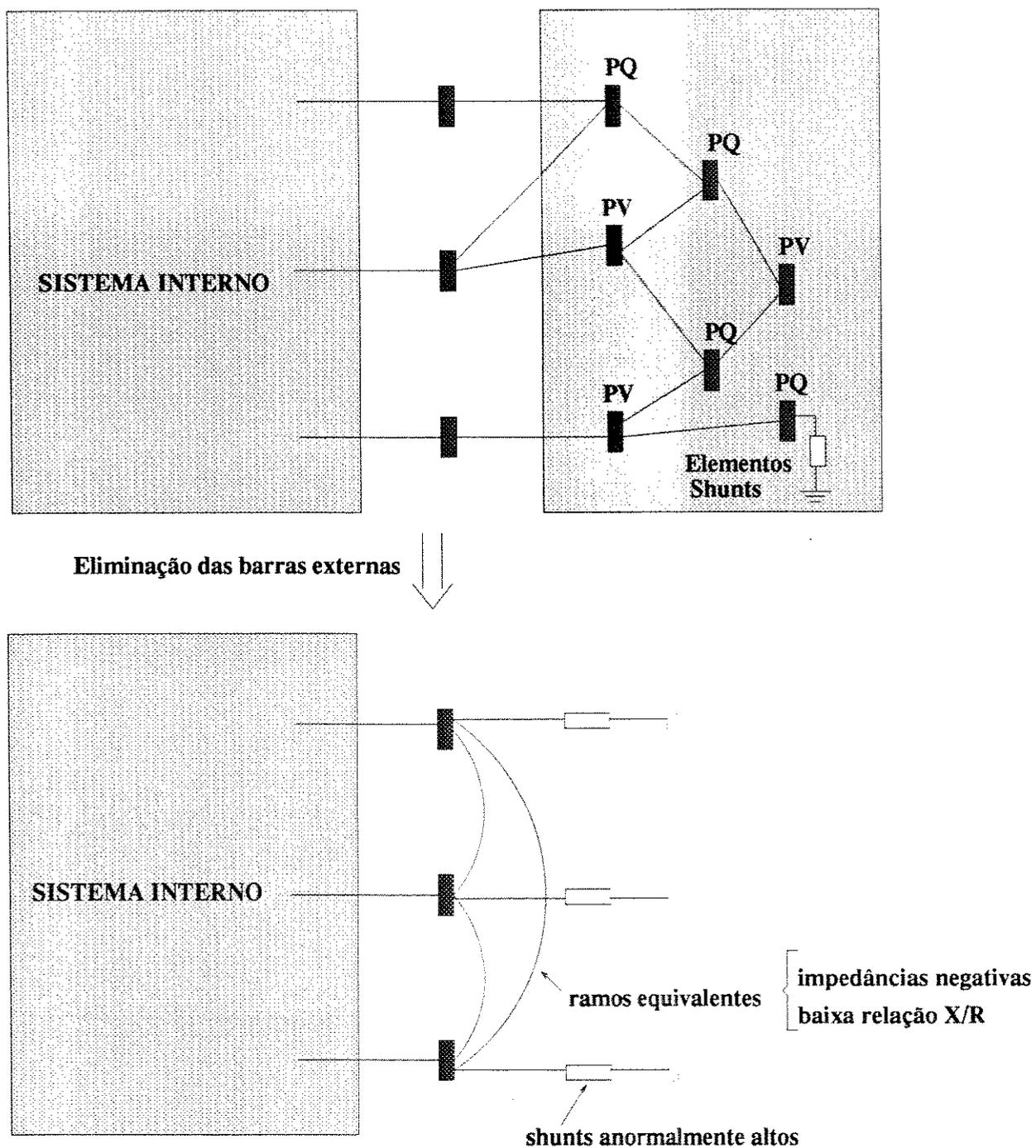


Figura 2.7: Problemas associados à redução da rede externa: modelos Ward

No cálculo da parte ativa do modelo, a matriz admitância  $Y$  é montada sem que se considere em sua formação quaisquer elementos shunts externos, já que está se considerando a rede a) (parte ativa). Assim, a eliminação de Gauss é processada sobre os elementos correspondentes às barras externas da matriz  $Y$ , o que fornece os ramos equivalentes na fronteira. Deste modo não aparecem nestes ramos as impedâncias "não usuais" citadas anteriormente, bem como ocorre um aumento na precisão da resposta do modelo. Ou seja, com a separação dos efeitos ativo e reativo o modelo **W.E** removeu as dificuldades apontadas em 1.

A matriz admitância  $Y'$  é utilizada no modelo **W.E.** para representar a reação da parte reativa do circuito externo (deficiência 2. citada anteriormente). O principal efeito ainda não representado pelos modelos **Ward** anteriormente mencionados é a reação das fontes de reativo externas. No modelo **W.E.** são calculadas admitâncias shunt fictícias ligadas as barras de fronteira para a modelagem deste efeito.

O cálculo destas admitâncias fictícias é feito considerando-se a "distância elétrica" entre as barras de fronteira e todas as barras de tensão controlada externas. Para isso, na montagem da matriz admitância  $Y'$  todas as barras externas de tensão controlada são aterradas (ver figura 2.8). Ao serem eliminadas, os valores das admitâncias shunt que aparecem nas barras de fronteira dão esta noção de "distância elétrica" entre as barras externas com tensão controlada (que foram aterradas) e as barras de fronteira. Estas admitâncias, ditas fictícias, são utilizadas no modelo **W.E.** a fim de representar o efeito reativo incremental a partir do caso básico, sem contudo alterar significativamente a parte ativa do modelo.

O algoritmo para o cálculo do modelo equivalente **W.E.** será discutido a seguir, bem como a inserção no modelo das admitâncias fictícias.

## Parte Ativa

A rede citada em a) é considerada. Assim sendo, nenhum dos elementos shunts é levado em conta na montagem de  $Y$  (fig.2.9).

Eliminam-se as barras externas da matriz  $Y$ , obtendo-se conforme mostrado na figura 2.10 a matriz  $Y_{EQ}$ .

Analisando-se as posições correspondentes às ligações entre fronteiras da submatriz  $Y_{EQ}$  determinam-se os ramos vistos pela fronteira para a parte ativa que serão usados como ramos equivalentes no modelo **WARD ESTENDIDO**, conforme mostrado na figura 2.10.

Na submatriz  $Y_{EQ}$ , calculada conforme acima, não aparecem nos ramos equiva-

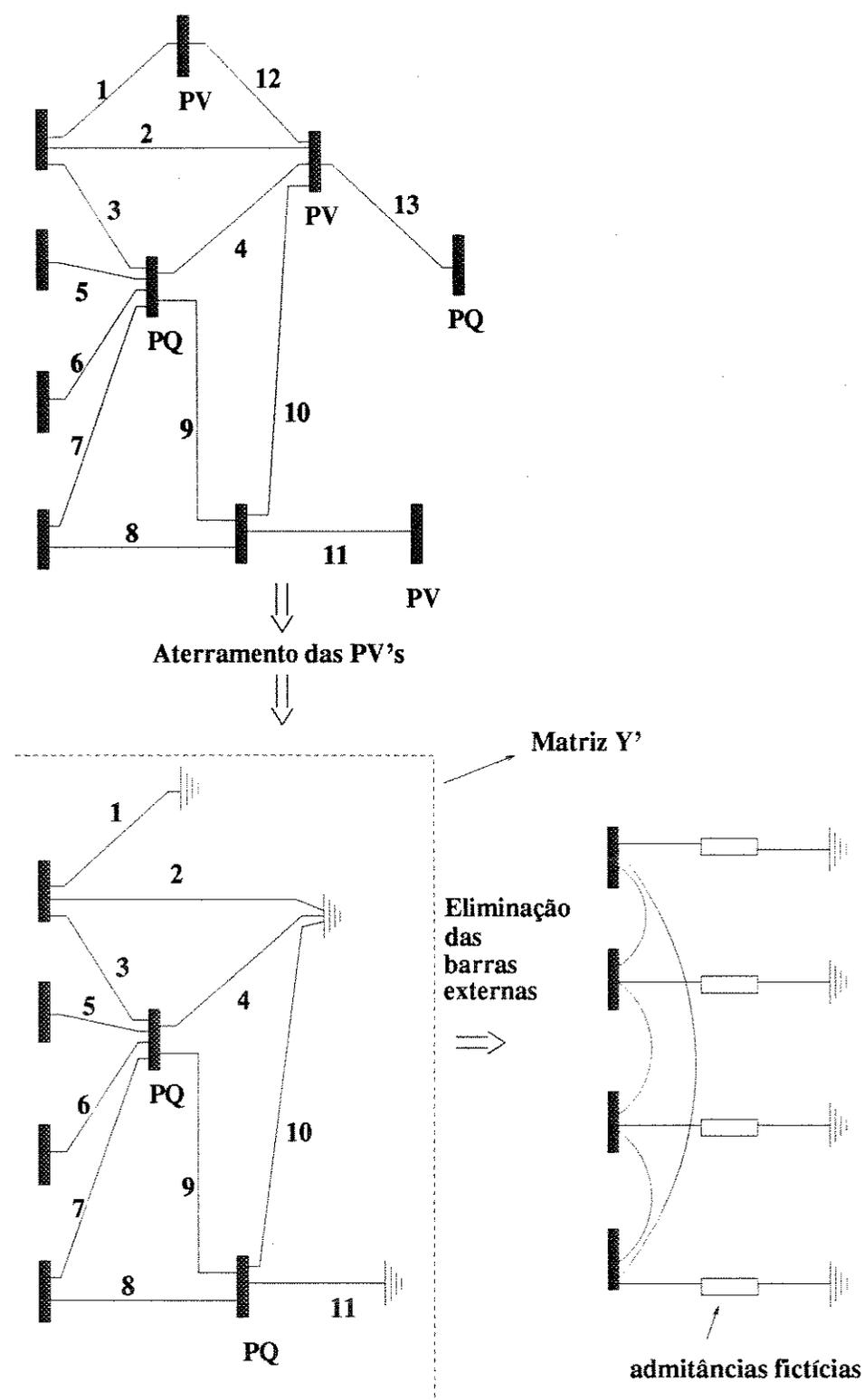


Figura 2.8: Aterramento das barras PV's externas.

$$Y = \begin{array}{|c|c|c|} \hline Y_{EE} & Y_{EF} & 0 \\ \hline Y_{FE} & Y_{FF} & Y_{FI} \\ \hline 0 & Y_{IF} & Y_{II} \\ \hline \end{array}$$

Figura 2.9: Formação da Matriz Admitância  $Y$

lentes as chamadas impedâncias "não usuais" citadas anteriormente ( impedâncias negativas, baixa relação  $X/R$  , etc ).

### Parte Reativa

A rede citada em b) é considerada. Monta-se a matriz admitância para a parte reativa  $Y'$  , levando-se agora em conta todos os elementos shunts do sistema externo e aterrando-se as barras de controle de tensão do sistema externo, o que pode ser feito colocando-se valores muito elevados nas diagonais da matriz  $Y'$  correspondentes.

Analogamente à parte ativa , a eliminação das barras externas na matriz  $Y'$  fornece uma submatriz  $Y'_{EQ}$  . Analisando-se as posições correspondentes às barras de fronteira na matriz  $Y'_{EQ}$  são determinadas as admitâncias shunt ligadas a estas barras. Todas as demais informações contidas na submatriz  $Y'_{EQ}$  são desprezadas (ver figura 2.11).

As admitâncias shunt assim calculadas equivalem à soma das admitâncias equivalentes entre a barra de fronteira e cada barra externa com controle de tensão. Pode-se dizer portanto, que tais admitâncias shunt dão uma noção de "distância elétrica" entre as barras de fronteira e cada barra externa de tensão controlada . Desta forma , as admitâncias shunt podem ser usadas para representar o efeito reativo que as barras externas de controle de tensão exercem na fronteira.

O equivalente **WARD ESTENDIDO** possui duas formas básicas de inserção das admitâncias shunt calculadas e que serão discutidas a seguir.

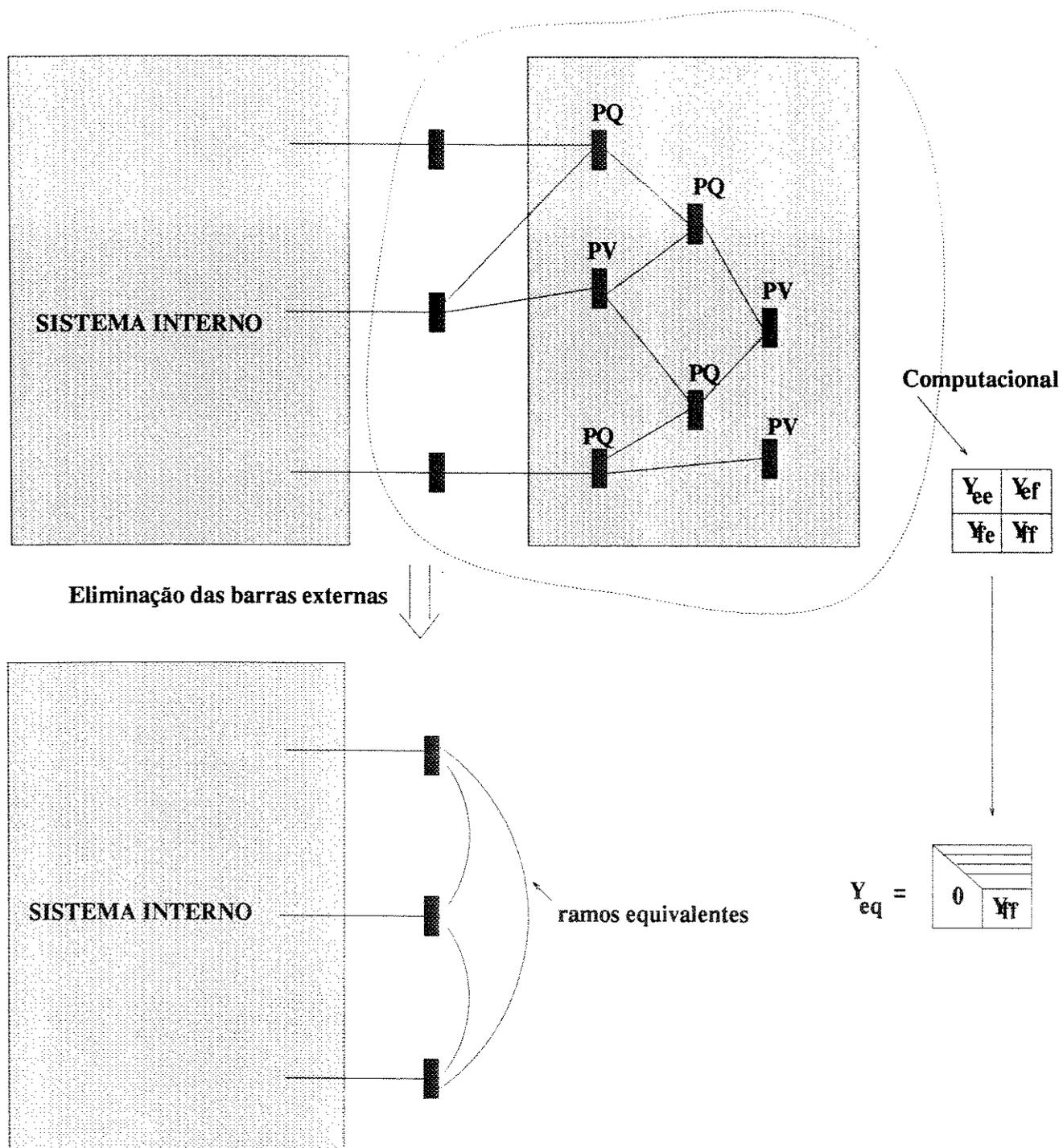


Figura 2.10: Redução da matriz admitância  $Y$

MODELO WARD ESTENDIDO: PARTE REATIVA

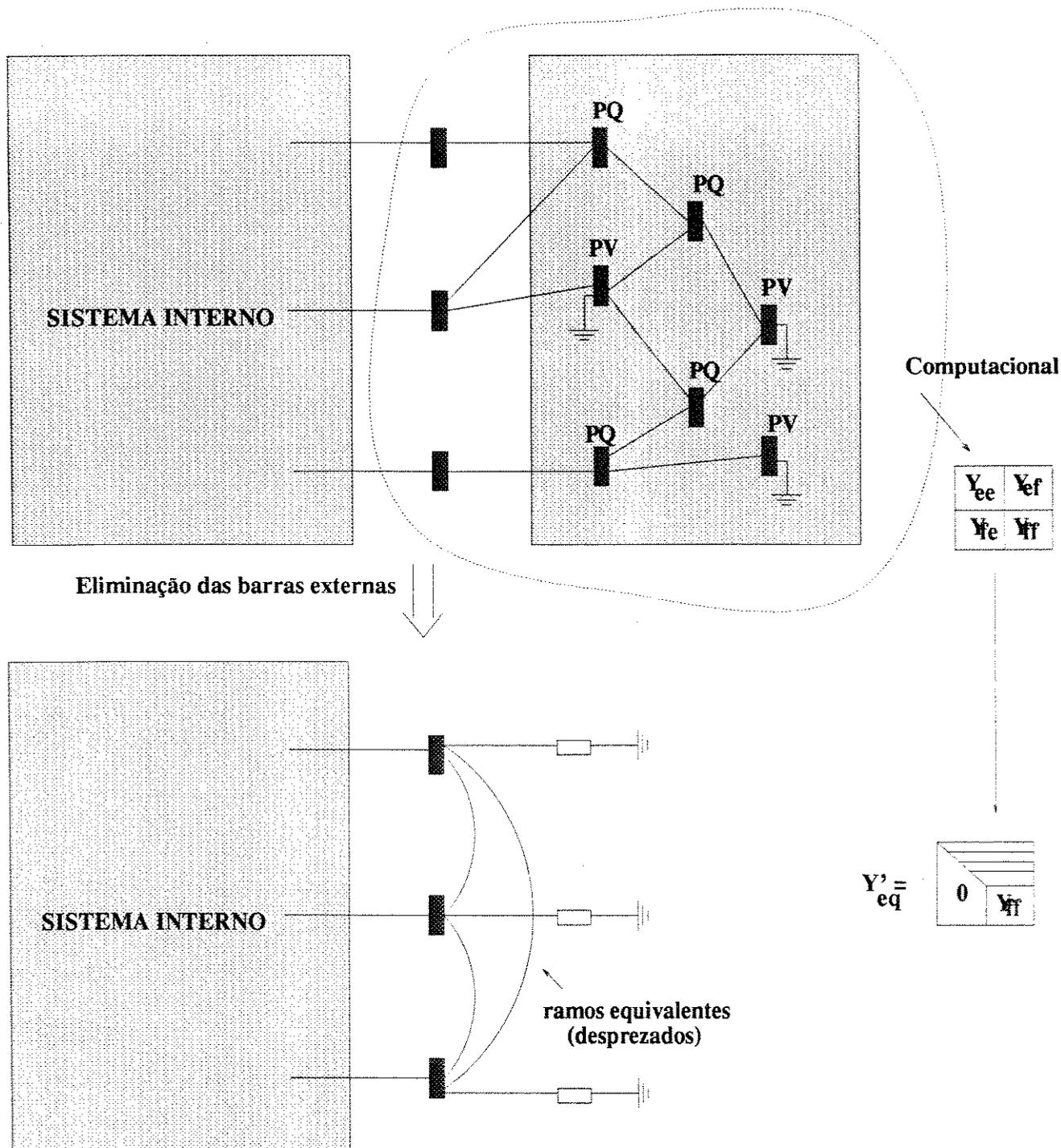


Figura 2.11: Redução da matriz admitância  $Y'$

### 2.8.3 Ward Estendido em Uma Etapa

Nas referências [12] [13] é dado um modelo mais compacto denominado **Ward Estendido em Uma Etapa**, onde as partes ativa e reativa do equivalente **W.E.** são calculadas em apenas um processo de eliminação. Neste modelo todas as barras de carga externas são eliminadas primeiramente, sendo que a rede fica conforme mostrado na figura 2.12. A soma das admitâncias que aparecem entre as barras de fronteira e as barras de tensão controlada corresponde às admitâncias fictícias do modelo **W.E.** Estes valores de admitâncias são armazenados. A seguir, as barras externas de tensão controladas são eliminadas até a fronteira, e então são calculados os ramos série equivalentes para a parte ativa em processo de redução único.

Um esquema ainda mais eficiente para o cálculo das admitâncias shunt do modelo é fornecido em [17]. Neste esquema as reduções do modelo **W.E.** são calculadas por método de redução computacionalmente mais eficiente, denominado redução adaptativa e os shunts são calculados por uma única solução "fast forward", economizando-se uma redução (parte reativa).

### 2.8.4 Ward Estendido com Admitância Shunt

Neste modelo, os ramos equivalentes calculados na parte ativa são inseridos na fronteira, conforme figura 2.13. As admitâncias shunt são inseridas nas barras de fronteira como shunts adicionais.

Ocorre que a parte ativa da resposta do modelo fica convenientemente modelada pelos ramos equivalentes na fronteira. Já a parte reativa da resposta é modelada pelas admitâncias shunt da seguinte forma: a partir do casamento de fronteira (feito conforme algoritmo dado no item 2.6) para o caso básico, as admitâncias shunt fictícias respondem reativamente simulando o efeito das barras externas de tensão controlada, já que nestes valores de admitância fictícia está embutido o conceito de "distância elétrica" entre cada barra de tensão controlada, cujo efeito se quer simular, e as barras de fronteira. É interessante lembrar que a inclusão das admitâncias fictícias não altera a parte ativa de resolução, já que estas admitâncias são susceptâncias puras.

### 2.8.5 Ward Estendido com Barras Fictícias de Tensão Controladas

As admitâncias shunt são conectadas entre a fronteira e uma barra de tensão controlada fictícia conforme mostrado na fig. 2.14.

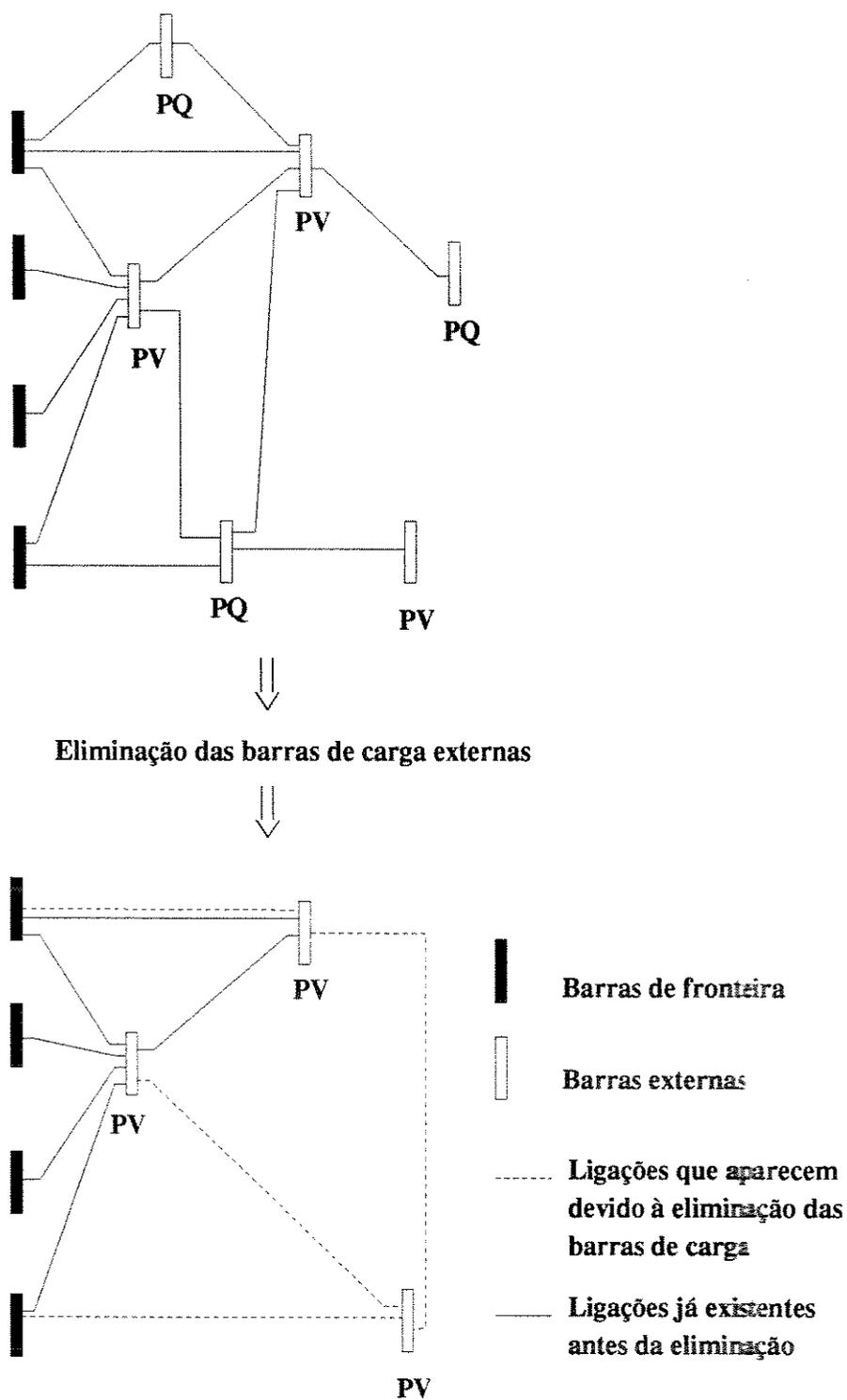


Figura 2.12: Modelo Ward Estendido em uma Etapa

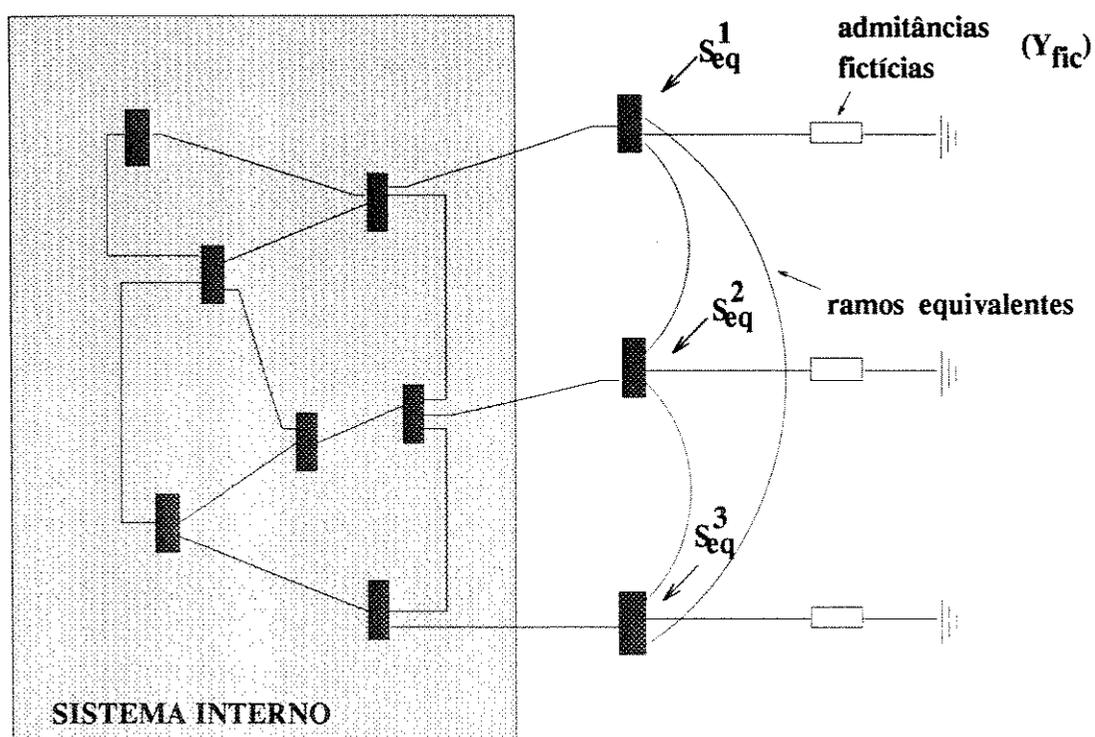
**MODELO WARD ESTENDIDO COM SHUNTS FICTÍCIOS**

Figura 2.13: Modelo Ward Estendido com shunts fictícios

Na referência [14] mostra-se que a representação das ligações shunt na matriz de sensibilidade do fluxo de carga ( $B''$ ), dada na referência [28], deve ser corrigida por um fator 2. Na referência [28] este fator foi omitido. Em sistemas onde as ligações shunts não são significativas este fator praticamente não altera a convergência. Entretanto, para elementos shunt maiores, podem ocorrer problemas de convergência devido ao erro no valor aproximado da matriz de sensibilidade. O fator 2 aparece na figura 2.14.

### MODELO WARD ESTENDIDO COM PV's FICTÍCIAS

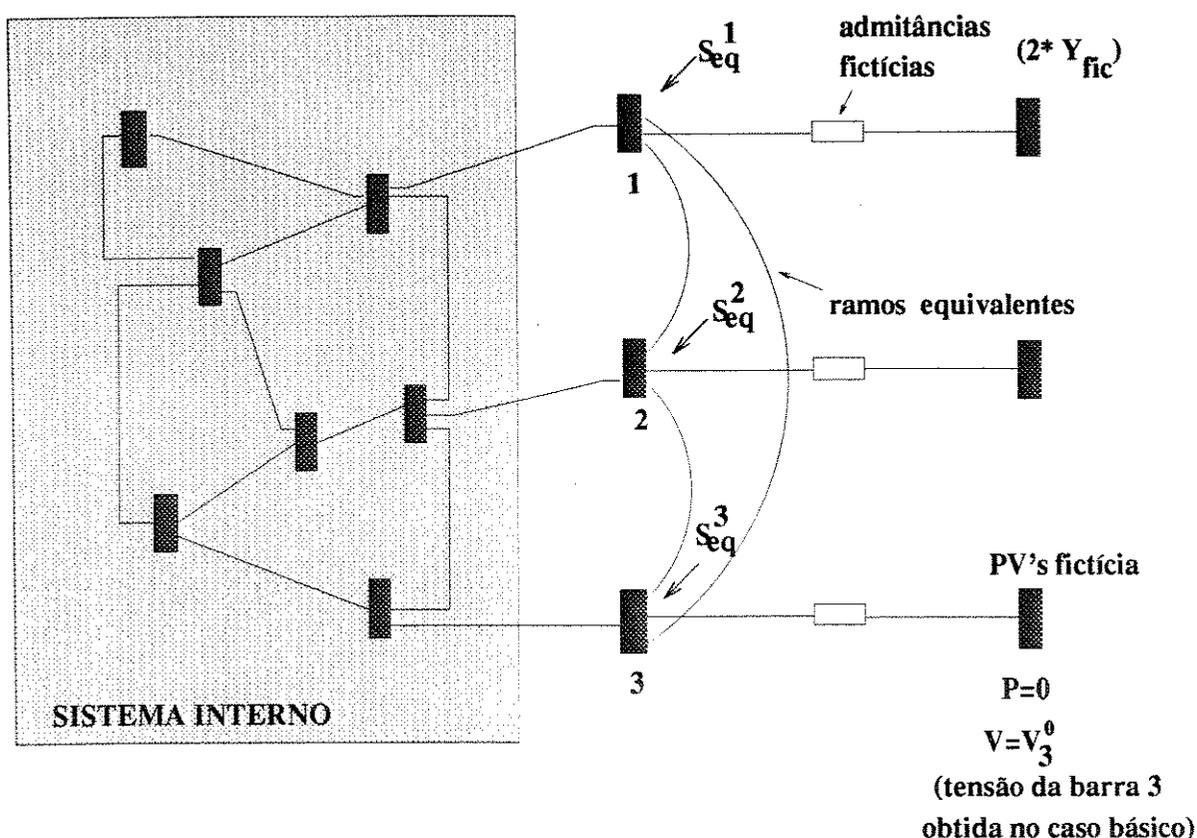


Figura 2.14: Modelo Ward Estendido com barras de tensão controlada fictícias

A barra fictícia com controle de tensão é especificada da seguinte forma:

- Impõe-se que a injeção de potência ativa de cada PV fictícia seja nula ( $P = 0$ ) para

que o ramo fictício não contribua com nenhum ativo para o sistema interno/fronteira não interferindo portanto na parte ativa do modelo.

- A tensão de cada PV fictícia é feita igual à tensão do caso básico ( $V_k^0$ ) de cada barra fronteira  $K$  respectiva conforme figura.

Desta forma, assim como no modelo anterior (com admitâncias shunt) o efeito reativo das barras de tensão controlada externas é representado pelas barras fictícias de controle de tensão de uma forma incremental, isto é, para o caso básico (tensão das barras de fronteira =  $V_k^0$ ) o ramo fictício não contribui com nenhum reativo, entretanto assim que as condições do sistema em estudo mudam, alterando as tensões das barras de fronteira, os ramos fictícios respondem com absorção ou suprimento de reativo.

É ainda importante observar que as barras fictícias não necessitam ser explicitamente representadas no modelo, o que causaria diminuição no grau de esparsidade da rede. Pode-se substituir as barras fictícias pelas injeções de potências reativas adicionais que cada barra PV fictícia fornece à respectiva barra de fronteira. Estas injeções são dadas pela expressão

$$\Delta Q = V_K * (V_K - V_K^0) * Y_K = V_K \Delta V_K Y_K \quad (2.8)$$

onde:

- $\Delta Q$  - injeção adicional calculada para cada barra de fronteira;
- $V_K$  - tensão das barras de fronteira da iteração atual;
- $V_K^0$  - tensão das barras de fronteira do caso básico;
- $Y_K$  - admitância shunt do ramo fictício considerado.

Inserindo-se estas injeções adicionais a cada iteração do fluxo de carga o efeito reativo das barras externas de controle de tensão será representado da mesma forma que no modelo com barras fictícias de controle de tensão. Logicamente o programa de fluxo de carga deve ser convenientemente alterado para incluir estas injeções adicionais.

## 2.9 Retenção de Barras de Controle de Tensão no Sistema Externo

### 2.9.1 Introdução

Na representação da resposta reativa do sistema externo, um dos principais problemas enfrentados pelos modelos equivalentes reduzidos é o da representação do efeito reativo das barras externas de controle de tensão. O modelo **W.E.**, conforme mencionado anteriormente, trata este problema utilizando-se do conceito de elementos shunt fictícios, que conforme variações no sistema interno respondem com absorção ou suprimento de reativo, simulando o efeito das barras de controle de tensão externas.

Uma outra forma de abordar a questão da representação das barras externas de tensão controlada é fazer com que algumas destas barras (aquelas com maior representatividade do ponto de vista reativo) sejam retidas no modelo equivalente. Como estas barras estão incorporadas ao equivalente a precisão alcançada é bastante melhorada [14], [15]. [10], já que o efeito reativo das barras de controle de tensão está explícito no modelo.

Estas barras de tensão controlada retidas, juntamente com as barras de fronteira, constituem a chamada zona de amortecimento ("buffer zone") como mostrado na figura 2.15.

### 2.9.2 Modelos Equivalentes Reduzidos com Zonas de Amortecimento

A idéia desse tipo de modelagem é eliminar as barras externas até a zona de amortecimento, conforme mostrado na figura 2.16, sem eliminar as barras PV's externas importantes do ponto de vista reativo.

Qualquer modelo equivalente reduzido pode se valer do conceito de zonas de amortecimento com a finalidade de melhorar sua precisão. Entretanto, quanto maior o número de barras de controle de tensão escolhidas para compor a zona de amortecimento maior será a dimensão do modelo equivalente, o que dependendo dos recursos computacionais disponíveis, pode inviabilizar as vantagens de utilização de modelos reduzidos. Além disso, quanto mais barras de controle de tensão forem retidas maior será a tendência de aumento no número de ramos equivalentes, prejudicando a esparsidade dos modelos.

A referência [11] fornece um algoritmo de seleção da zona de amortecimento. Este algoritmo é estabelecido com base em índices de impacto de elementos externos na fronteira, calculados levando-se em conta estudos de sensibilidade.

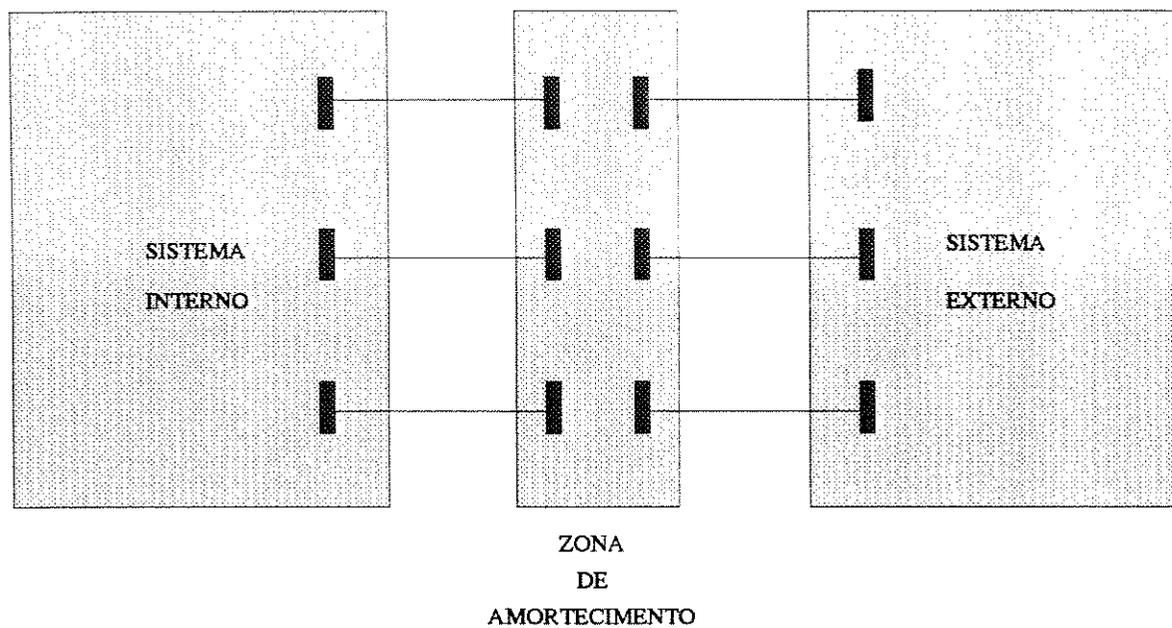


Figura 2.15: Divisão do sistema incluindo zonas de amortecimento

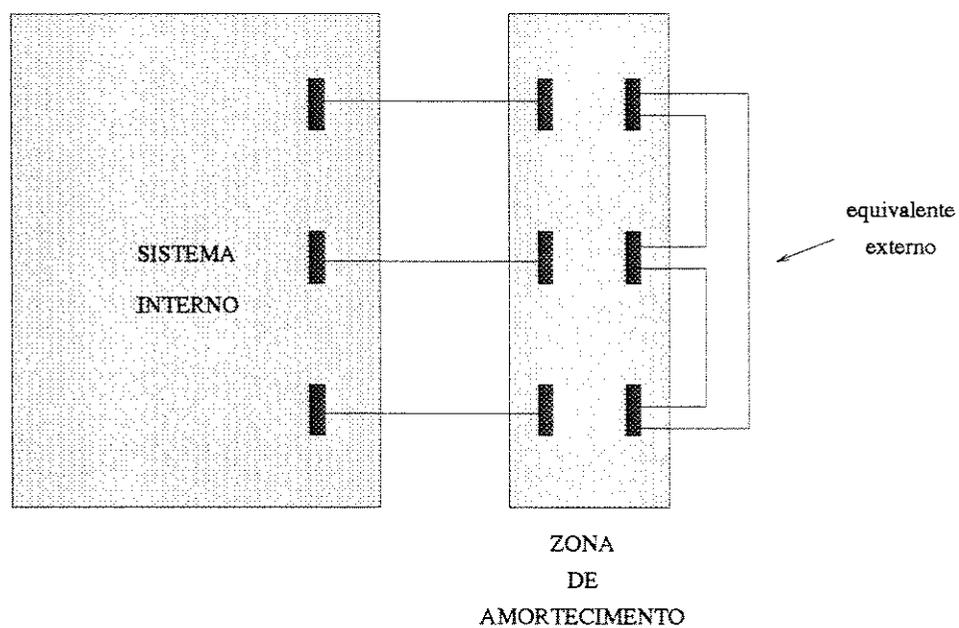


Figura 2.16: Eliminação das barras externas até a zona de amortecimento

Como a zona de amortecimento é escolhida de forma que o modelo possa atingir uma determinada precisão para diferentes alterações no sistema interno, geralmente o modelo equivalente é superdimensionado, ou seja: o número de barras PV's escolhidas para compor a zona de amortecimento é maior do que o necessário em função de situações críticas que exijam um maior nível de resposta do sistema externo. Para pequenas alterações no sistema interno, que constituem a maioria dos casos, a zona de amortecimento fica desnecessariamente grande.

Seria interessante que para cada alteração houvesse uma determinada zona de amortecimento, adaptada às especificidades de cada problema. Os métodos de redução tradicionais [4], [5] não são computacionalmente eficientes para que isto possa ser feito.

Na referência [17] é proposto um método de redução denominado redução adaptativa, que é rápido o bastante para calcular equivalentes reduzidos adaptados às necessidades reativas de cada problema. A cada zona de amortecimento escolhida o modelo equivalente pode ser rapidamente atualizado. Este método, discutido a seguir, é aplicável a qualquer modelo equivalente reduzido.

### 2.9.3 Método de Redução Adaptativa (R.A.)

Levando-se em consideração a nova partição do sistema conforme mostrado na figura 2.15 pode-se construir a matriz admitância conforme figura 2.17 onde se definem:

- conjunto  $E$  — barras eliminadas (sistema externo);
- conjunto  $I$  — barras retidas sem ligação com as barras eliminadas;
- conjunto  $B$  — barras retidas com ligações com as barras eliminadas;
- conjunto  $R$  — barras retidas (conjuntos  $I$  e  $B$ ).

O método de redução adaptativa utiliza uma propriedade da fatorização de matrizes esparsas: "a maioria das operações de redução de uma matriz esparsa são executadas quando esta matriz é completamente fatorizada, e o seu resultado está nos fatores" [17].

Portanto, a redução de quaisquer elementos de uma rede pode ser obtida a partir da matriz da rede total fatorizada. O método de redução adaptativa adota então o seguinte princípio: ao invés de utilizar um novo processo de redução para cada caso, toda a matriz da rede (figura 2.17) é fatorizada, sendo que cada novo caso de redução é obtido a partir desta matriz inicialmente fatorizada com algumas operações adicionais.

$Y =$	$Y_{EE}$	$Y_{EB}$	$0$	Conjunto E	Conjunto R
	$Y_{BE}$	$Y_{BB}$	$Y_{BI}$	Conjunto B	
	$0$	$Y_{IB}$	$Y_{II}$	Conjunto I	

Figura 2.17: Matriz admitância incluindo zonas de amortecimento

Nos métodos de redução tradicionais são eliminados da matriz  $Y$  apenas os elementos correspondentes às barras externas como mostrado na figura 2.18. Os elementos da matriz  $Y_{BB}^*$  que aparecem após esta eliminação são os elementos equivalentes, dados pela seguinte expressão:

$$Y_{BB}^* = Y_{BB} - Y_{BE} * Y_{EE}^{-1} * Y_{EB} \quad (2.9)$$

A matriz  $Y$  decomposta em seus fatores  $L D U$  na mesma ordem de partição da figura 2.17 pode ser recuperada a partir destes fatores fazendo-se:

$$Y = L * D * U \quad (2.10)$$

No método **R.A.** não se procura recuperar toda a rede  $Y$ , mas uma parte desta rede (elementos equivalentes na fronteira), quando as barras externas tenham sido eliminadas (matriz equivalente dada por 2.9).

As operações de fatorização já executadas para todas as barras (na matriz  $L D U$ ) correspondem exatamente às operações de redução destas barras. Ou seja, ao fatorar as matrizes  $Y_{EE}$ ,  $Y_{BE}$ ,  $Y_{EB}$  todas as operações de redução destas matrizes já foram executadas e estão prontas na matriz de fatores  $L D U$ . Com algumas operações adicionais na submatriz  $Y_{BB}$  da matriz  $L D U$  os elementos relativos à matriz equivalente procurados podem ser calculados conforme figura 2.18. Estas operações adicionais são feitas levando-se em conta o método de vetores esparsos proposto por Tinney em [16], e são portanto bastante eficientes do ponto de vista computacional.

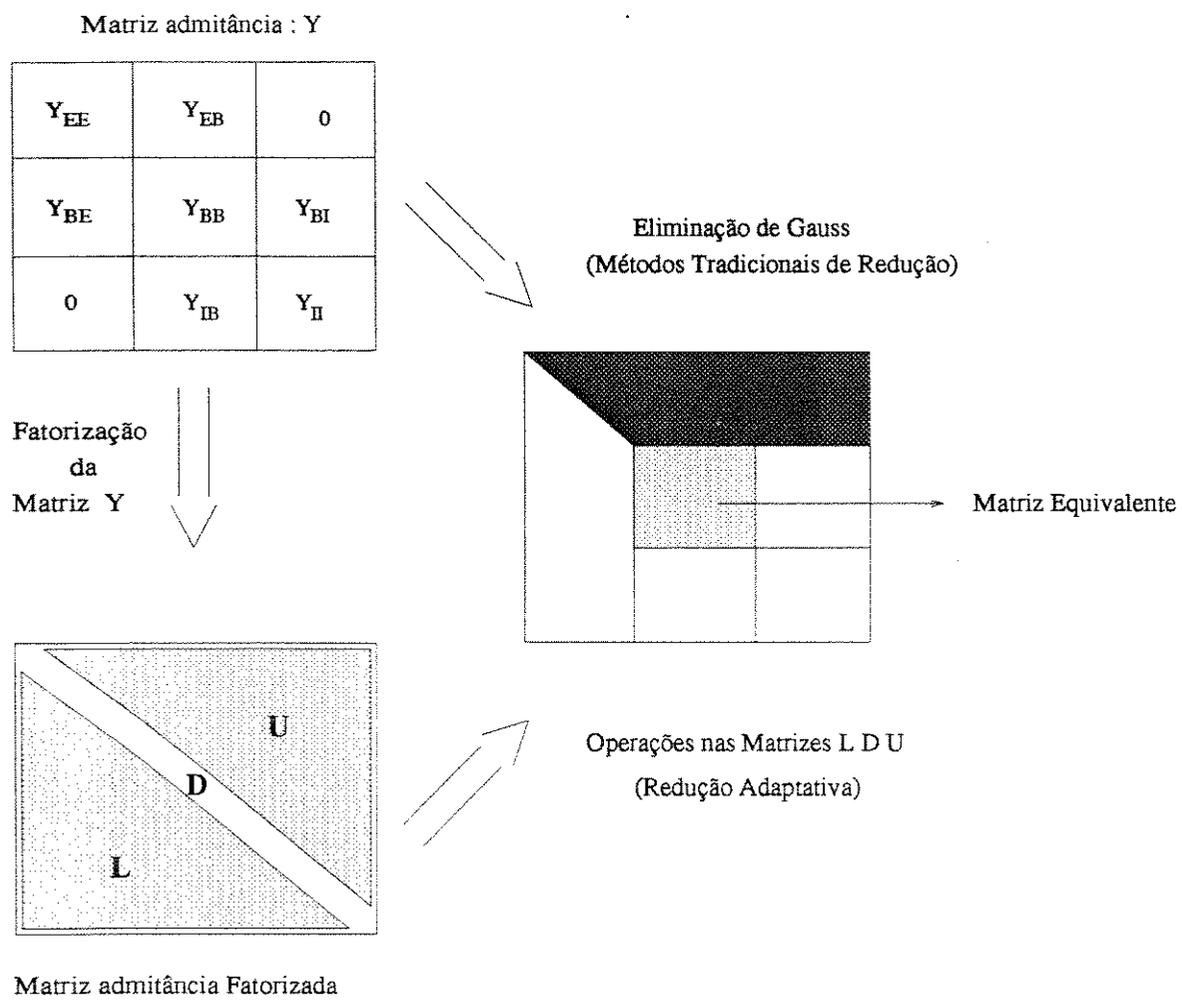


Figura 2.18: Métodos de redução de redes

## Capítulo 3

# MODELO WARD REATIVO INTERNO

### 3.1 Introdução

O Fluxo de Carga Ótimo (F.C.O.) é uma ferramenta que fornece o ponto de operação ótimo em regime permanente para atendimento de uma carga específica sob determinadas restrições de factibilidade operativa e de segurança. Apesar de ser uma ferramenta importante para os estudos de planejamento e operação dos sistemas de potência, o estado da arte para o F.C.O. ainda demanda o desenvolvimento de técnicas auxiliares para sua aplicação. Na referência [19] são discutidas algumas de suas deficiências que limitam seu escopo de aplicação. Entre estas deficiências cita-se o problema de equivalenciamento das partes do sistema não representadas durante o processo de otimização.

Os modelos de equivalentes tradicionais, utilizados na análise de segurança estática "on-line" (Equivalentes F.C.), têm sido utilizados também para representar o modelo externo no caso do cálculo do fluxo de carga ótimo no sistema interno (Equivalente F.C.O.). Entretanto, conforme será analisado a seguir, os equivalentes F.C. não modelam convenientemente a rede externa no caso de estudos de otimização. Como em alguns modos de aplicação o equivalente é indispensável, os equivalentes F.C. têm sido utilizados nestes casos, ainda que precariamente, pois não há outros modelos disponíveis de equivalentes F.C.O [19].

A seguir serão apresentadas e discutidas as deficiências básicas dos modelos equivalentes F.C.O.. Será apresentado o modelo **WARD REATIVO INTERNO (WRINT)**, que busca tratar uma destas deficiências: a resposta reativa no caso de alterações nas variáveis de controle que ocorrem durante estudos de otimização.

## 3.2 Modelos Equivalentes Aplicados ao Fluxo de carga Ótimo

Quando aplicados ao F.C.O. os modelos de equivalentes F.C. tradicionais apresentam uma série de deficiências que serão apontadas e discutidas abaixo.

### 3.2.1 Representação das Perdas Externas

Assumindo-se que as perdas externas estejam incluídas na função objetivo e sabendo-se que os modelos equivalentes modelam de forma imprecisa tanto as perdas ativas quanto reativas, conclui-se que os equivalentes podem causar erro na minimização das perdas totais da rede.

Alguns modelos equivalentes, por exemplo, omitem resistências, ou ainda possuem resistência negativa. Estas formas de representação das perdas externas podem causar, a nível de minimização das perdas totais, erros bastante consideráveis. Seja por exemplo um equivalente que modela por baixo as perdas externas. Logicamente o fluxo entrando no equivalente seria necessariamente maior que aquele para as perdas corretas, causando erros de resposta.

### 3.2.2 Representação das Restrições Externas

Na falta de troca de informação de dados entre o sistema monitorado e os sistemas externos, as restrições de desigualdade externas não podem ser diretamente monitoradas. Não existe modo de se traduzir as restrições de desigualdade externas em restrições para o equivalente. Em situações em que a solução do F.C.O. calculado para o sistema total tende a apresentar fluxos internos nos limites estipulados, a utilização de um equivalente irrestrito (sem representação das restrições de factibilidade externas), pode comprometer a solução obtida.

Na referência [19] Tinney propõe um esquema que pode diminuir os riscos de violação das restrições externas. De acordo com Tinney, é o fluxo circulante incremental no equivalente que consiste na maior ameaça de violação de restrições externas, e não o fluxo que entra ou sai do equivalente. É sugerida a utilização do método de redução adaptativa [17]. Neste método de redução pode-se, em determinados instantes, restaurar o sistema externo total a partir do sistema reduzido, conforme figura 3.1.

Restaurado o sistema e verificadas as violações, cada restrição violada seria retida como igualdade explícita nas reduções adaptativas subsequentes.

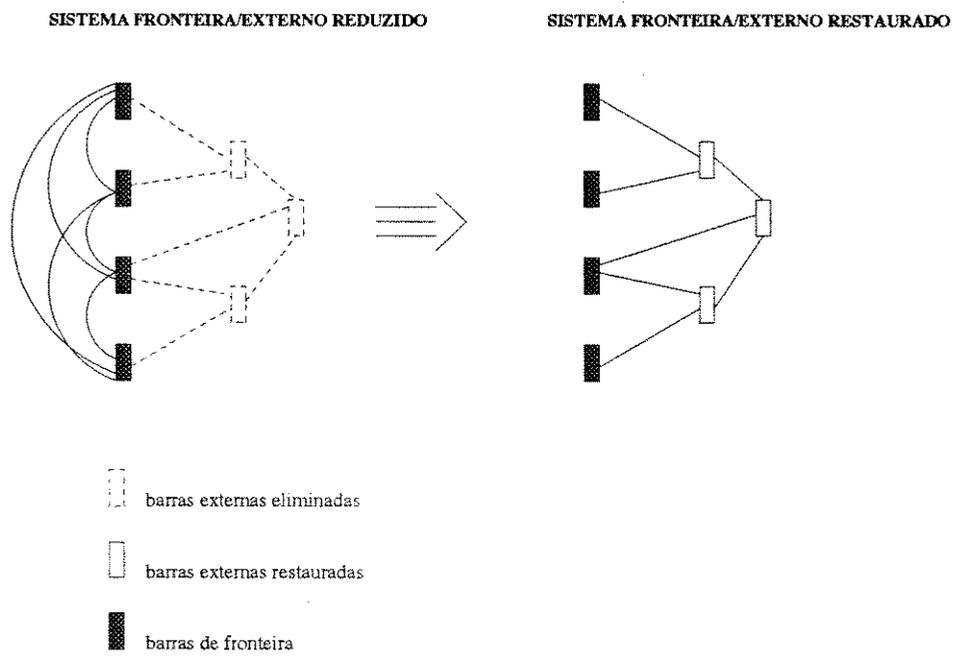


Figura 3.1: Restauração do sistema externo a partir do sistema reduzido

Além disso, o esquema de redução adaptativa tende a quebrar o sistema reduzido em subredes radialmente conectadas. Os fluxos incrementais através das subredes são muito menores que aqueles que circulam por um equivalente "fully connected", reduzindo as possibilidades de violação de restrições.

### 3.2.3 Representação da Resposta Reativa do Equivalente

Nos estudos de otimização, a cada iteração ocorrem alterações em um conjunto de variáveis escolhidas a priori como variáveis de controle, tais como:

- Tensões controladas;
- Taps de transformadores de tensão;

A resposta do equivalente **W.E.** no caso de estudos de análise de contingência é considerada satisfatória. Entretanto, para aplicações em estudos de otimização, onde ocorrem alterações nas variáveis de controle como as citadas acima, estas respostas podem ser melhoradas (conforme será mostrado nos testes do capítulo 4) no que diz respeito às respostas de reativo/tensão.

As alterações nas variáveis de controle utilizadas em um fluxo de carga ótimo ocorrem simultaneamente e de forma dispersa no sistema interno, e requer do equivalente reações de natureza diferente daquelas devido a contingência de linha e transformadores.

Nos testes com alterações em variáveis de controle que serão analisados no capítulo 4 fica claro que estas alterações exigem um nível de resposta bem mais significativo dos modelos equivalentes.

## 3.3 Descrição do Modelo WARD REATIVO INTERNO

### 3.3.1 Introdução

Como as variáveis de controle estão relacionadas ao reativo/tensão, e sendo as alterações nestas variáveis dispersas pelo sistema interno, é necessário que o modelo equivalente F.C.O. represente um suporte de reativo mais adaptado a estas condições.

Do ponto de vista da reação reativa do equivalente, basicamente as alterações do tipo contingência de linha diferem das alterações em variáveis de controle nos seguintes aspectos:

- As contingências de linhas são alterações localizadas enquanto que as alterações em variáveis de controle estão espalhadas pelo sistema.
- As alterações em variáveis de controle são múltiplas, enquanto que para as contingências de linha o modelo equivalente deve responder a uma única alteração de contingência de linha para cada caso analisado.
- No caso de alterações em variáveis de controle, sabe-se a priori, pela escolha do conjunto destas variáveis, o local exato onde estas alterações ocorrerão. Já nas alterações de contingência os modelos equivalentes devem responder convenientemente para todas as possíveis contingências.

O problema do erro de resposta do sistema equivalenciado com relação às alterações em variáveis de controle está também relacionado ao local efetivo onde as respostas ocorrem (barras de fronteira). Caso a reação reativa do modelo equivalente pudesse também se espalhar pelo sistema interno, o desempenho do equivalente poderia ser melhorado. O modelo **WARD REATIVO INTERNO (WRINT)** explora esta idéia, e ainda o fato de se saber a priori onde tais alterações ocorrerão.

Sendo assim, o modelo **WRINT** expande a reação reativa do equivalente também por algumas barras do sistema interno, denominadas barras de resposta. Tais barras são definidas por estudos prévios tendo-se em conta o local previamente conhecido das variáveis de controle escolhidas onde ocorrerão as alterações. Desta forma aumentam-se os locais efetivos de respostas do equivalente além de se aproximar tais respostas às variações ocorridas.

Para que as reações possam ser distribuídas também pelo sistema interno o modelo **WRINT** utiliza-se do conceito de admitâncias fictícias. No modelo **W.E** o efeito reativo das barras de tensão controlada externas é representado, a partir do ajuste na fronteira, pelas reações reativas de tais admitâncias. Essas admitâncias dão uma noção da distância elétrica entre as barras de fronteira e as barras de tensão controlada externas.

No modelo **WRINT** este conceito é estendido também às barras internas. Ou seja, uma parcela das "distâncias elétricas" representadas na fronteira são refletidas para as barras de resposta especificadas no sistema interno. O artifício utilizado para o cálculo destas admitâncias, denominadas admitâncias fictícias internas, é uma adaptação da técnica descrita anteriormente para o cálculo das admitâncias fictícias do modelo **W.E**.

Como na parte reativa do **W.E**, primeiramente as barras de controle de tensão externas são aterradas, e refletidas como admitâncias fictícias na fronteira. No estágio da redução em que todas as barras externas foram eliminadas despreza-se a parcela  $(1 - \alpha) * Y_{fic}$  das admitâncias shunts das barras de fronteira. Em seguida, um conjunto de barras internas especificadas e a fronteira são eliminadas considerando-se apenas as parcelas  $\alpha * Y_{fic}$

dos shunts de fronteira. As ligações "fill in" que aparecem no sistema interno devido à eliminação das barras especificadas do sistema interno/fronteira são também desprezadas. Este procedimento está representado na figura 3.2.

O modelo **WRINT**, assim como o **W.E.**, fica também dividido nas partes ativa e reativa. Entretanto, no modelo **WRINT** a parte reativa de resposta "entra" pelo sistema interno, distribuindo por ele sua reação de forma adaptada a cada conjunto de variáveis de controle escolhido.

A seguir é abordado o algoritmo básico de obtenção do modelo **WRINT** envolvendo suas partes ativa e reativa de resolução.

### 3.3.2 Algoritmo de Obtenção do **WRINT**

#### Parte Ativa

A parte ativa de resolução é idêntica ao modelo **W.E.**. Ou seja, os ramos equivalentes na fronteira são calculados a partir de eliminações das barras externas na matriz admitância  $Y$  formada conforme citado anteriormente no capítulo 2. Como no **W.E.**, os ramos equivalentes modelam a parte passiva da rede externa refletida na fronteira

#### Parte Reativa

O algoritmo de cálculo das admitâncias fictícias internas é descrito a seguir:

- Monta-se a matriz admitância  $Y_R$ , formada levando-se em conta o particionamento conforme figura 3.3, aterrando-se as barras de tensão controlada externas e incluindo-se todos os elementos shunts externos. Os elementos shunts do sistema interno/fronteira não devem ser considerados, pois o efeito que se deseja representar é o das barras de tensão controladas e shunts externos. As barras internas de controle de tensão e os shunts internos já estarão explicitamente representados no modelo do sistema interno, e portanto não precisam ter seus valores refletidos como admitâncias fictícias para o sistema interno retido.

onde:

- Conjunto  $I_E$  - Barras internas que serão eliminadas;

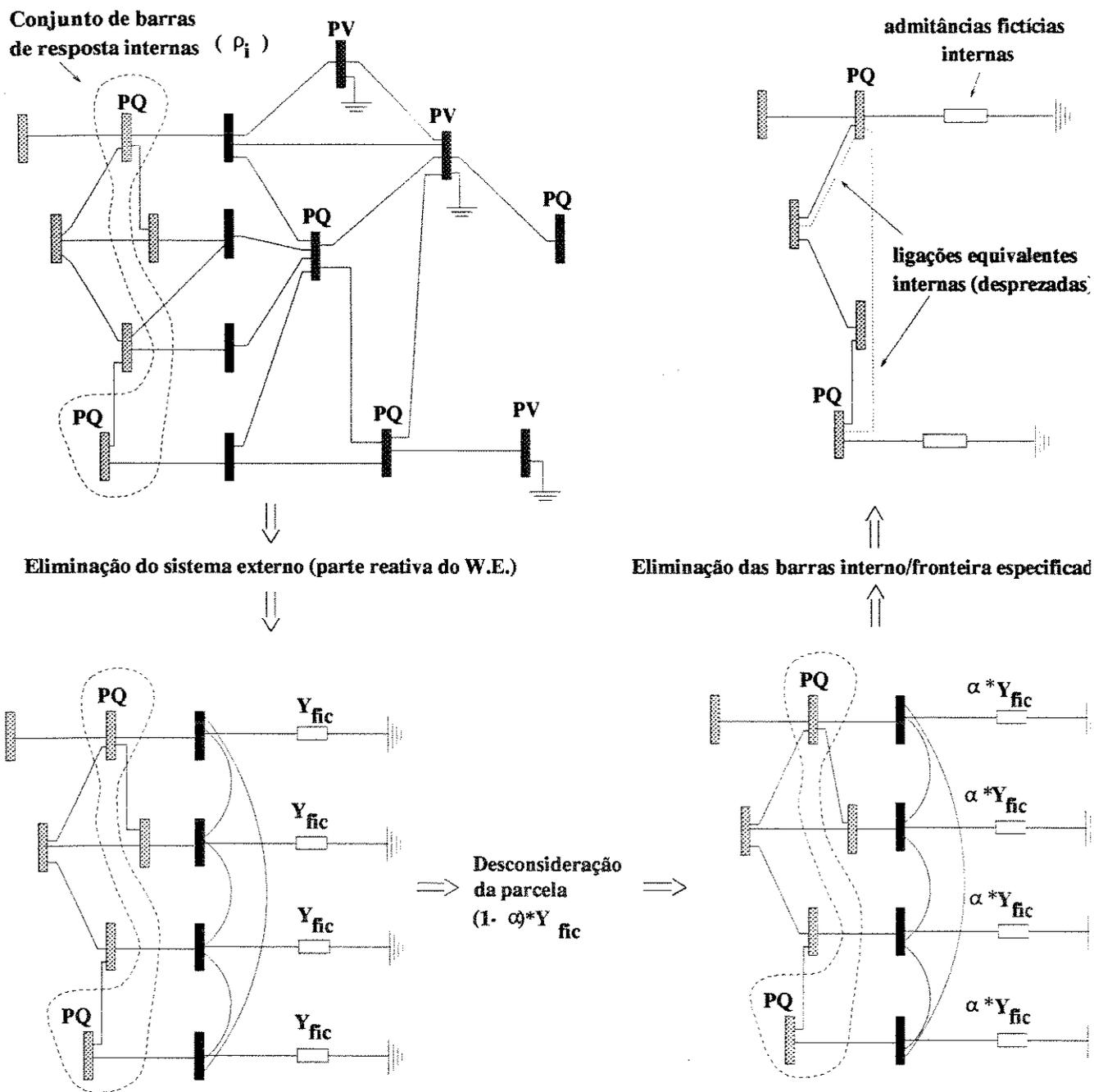


Figura 3.2: Processo de obtenção dos shunts internos.

$$Y_R = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline Y_{EE} & Y_{EF} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \hline Y_{FE} & Y_{FF} & Y_{FI_E} & Y_{FI_R} \\ \hline \mathbf{0} & Y_{I_E F} & Y_{I_E I_E} & Y_{I_E I_R} \\ \hline \mathbf{0} & Y_{I_R F} & Y_{I_R I_E} & Y_{I_R I_R} \\ \hline \end{array} \begin{array}{l} \text{conjunto E} \\ \text{conjunto F} \\ \text{conjunto } I_E \\ \text{conjunto } I_R \end{array}$$

Figura 3.3: Particionamento da matriz  $Y_R$ .

- Conjunto  $I_R$  - Barras internas retidas (barras de resposta e demais barras internas);
  - Conjunto  $E$  - Barras externas;
  - Conjunto  $F$  - Barras de fronteira.
- São eliminados da matriz  $Y_R$  os elementos correspondentes às barras externas, obtendo-se como no capítulo 2 a matriz  $Y_R^{eq}$  (ver figura 3.4).
- São calculados e armazenados os valores das admitâncias fictícias para as barras de fronteira (mesmas do modelo **W.E.**). Até aqui tem-se o esquema intermediário mostrado na figura 3.4.
- Para levar o efeito das barras de tensão controlada externas para as barras internas é necessário que sejam eliminadas algumas barras do subsistema interno/fronteira. Esta eliminação é efetuada considerando-se apenas uma parcela  $\alpha * Y_{fic}$  da admitância fictícia utilizada na fronteira. Sendo assim é refletida apenas uma parcela  $\alpha$  das admitâncias fictícias de fronteira para o sistema interno.

### 3.3.3 Representação do WRINT

O modelo **WRINT** proposto é então formado pelo equivalente **W.E.** adicionando-se as admitâncias fictícias internas, calculadas como descrito em 3.3.2, às barras internas de resposta. A figura 3.5 mostra o equivalente **WRINT**.

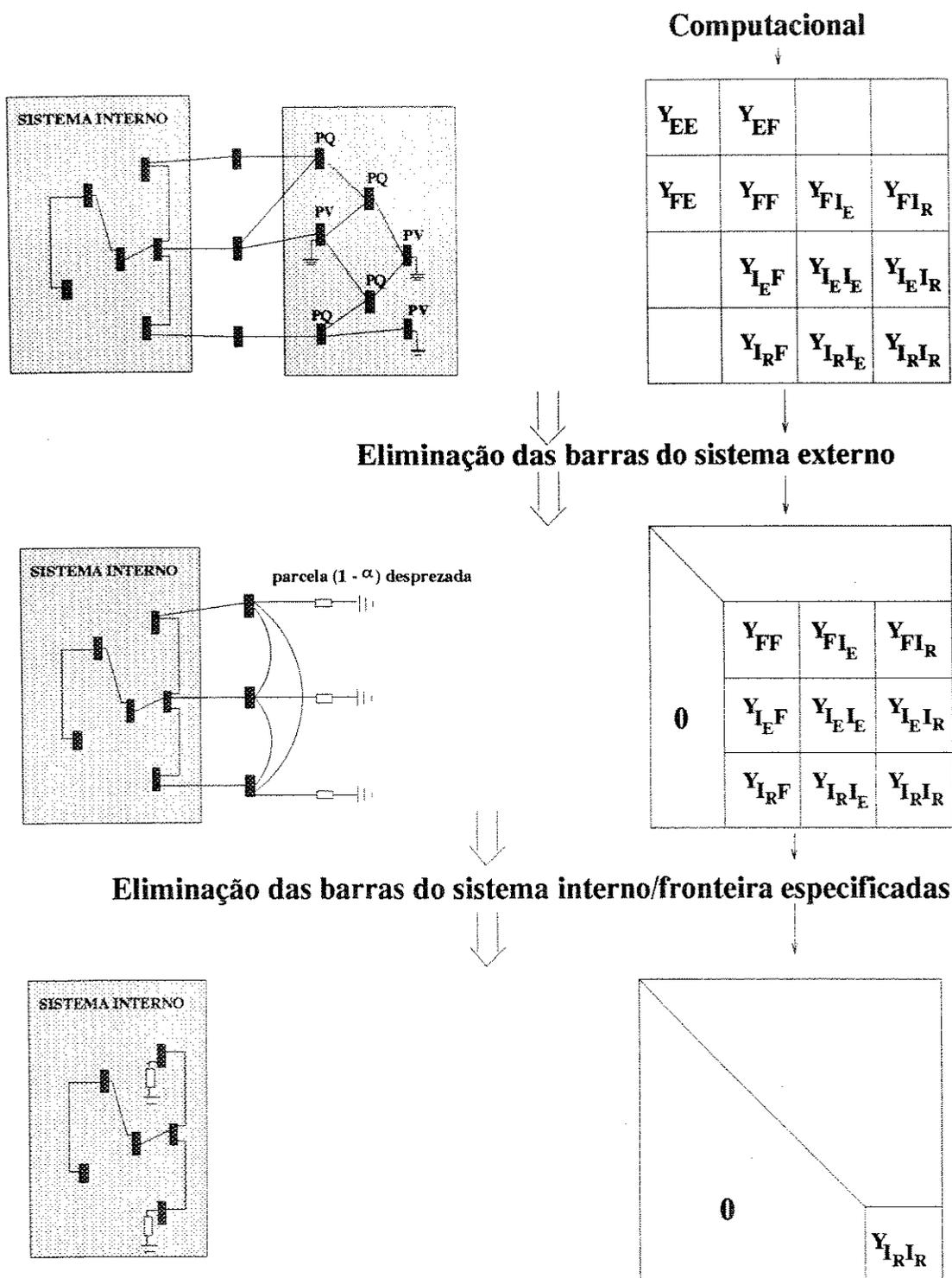


Figura 3.4: Processo de cálculo da parte reativa.

### MODELO WARD REATIVO INTERNO

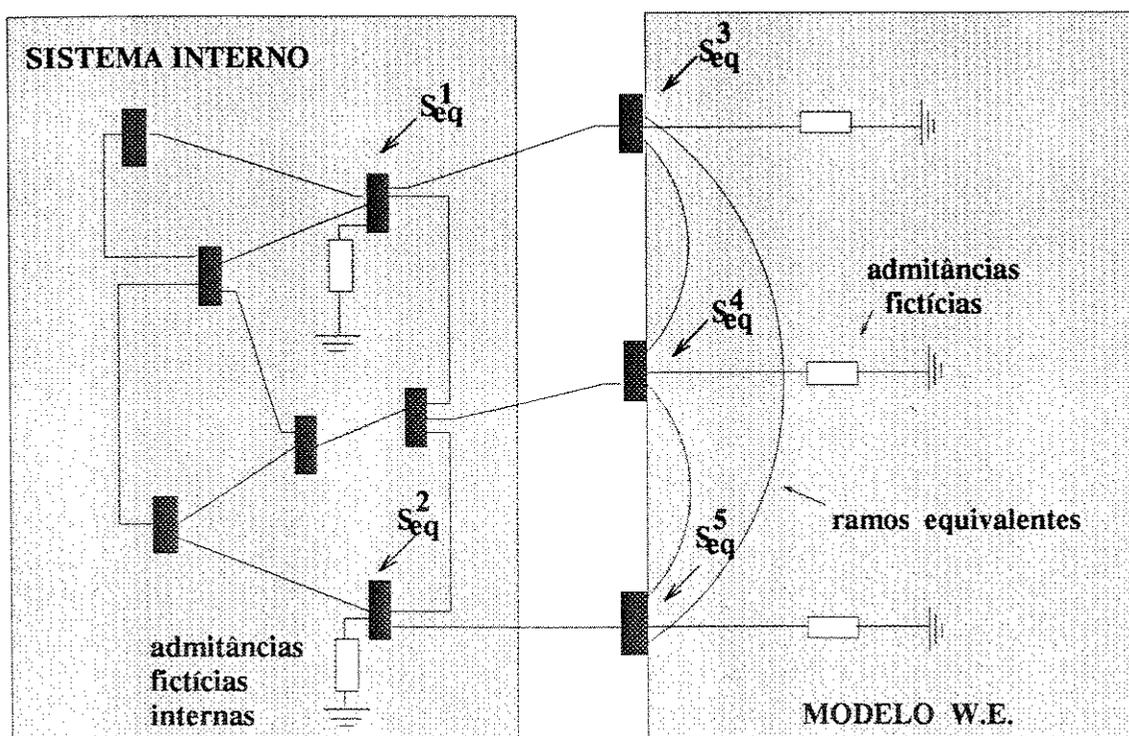


Figura 3.5: Modelo WARD REATIVO INTERNO

No modelo **WRINT**, assim como no **W.E**, os shunts fictícios de fronteira e internos calculados na parte reativa, podem ser inseridos como elementos shunts, ou como ligações entre as barras internas de resposta e fronteira com as barras de tensão controlada. Dois modelos análogos aqueles dados nos itens 2.7.4 e 2.7.5 são possíveis de serem implementados. É ainda possível de se implementar o **WRINT** na versão onde as barras de controle de tensão fictícias são substituídas pelas injeções dadas na equação 2.8 dada no capítulo 2.

No apêndice c. são descritas mais detalhadamente as técnicas de implementação computacional utilizadas no cálculo do modelo **WRINT**. Também é discutido um esquema de adaptação do modelo **W.E.** para o cálculo do modelo **WRINT**.

### 3.3.4 Ajuste do Modelo **WARD REATIVO INTERNO** ao Caso Básico

Assim como o modelo **W.E**, o **WRINT** é um modelo que utiliza técnicas de redução de circuitos lineares (tensão x corrente). A utilização de uma ferramenta não linear como o fluxo de carga para a resolução da rede implica, de forma análoga ao ajuste na fronteira do modelo **W.E.**, na necessidade de um ajuste do equivalente **WRINT** ao caso básico.

O efeito reativo das barras de tensão controladas externas é representado no modelo **W.E.** pelo par admitância fictícia e injeção equivalente de barra. Sendo que as injeções equivalentes inseridas nas barras de fronteira (onde ocorre a resposta) fornecem o ponto operacional básico inicial. A partir deste ponto as variações de reativos externos refletidas na fronteira são simuladas pelas reações das admitâncias fictícias.

Como no modelo **WRINT** está se buscando a introdução de elementos de resposta reativa no sistema interno, é necessário que além das injeções equivalentes de fronteira, sejam calculadas ainda as injeções equivalentes para as barras de resposta do sistema interno. Sendo assim, o ajuste fica também distribuído pelas barras de resposta conforme mostra a figura 3.5 onde estão destacadas as injeções equivalentes internas  $S_{eq}$ .

Sendo assim o modelo **WRINT** é também um modelo incremental, com reações reativas incrementais a partir do caso básico, simulando a resposta das barras de tensão controladas externas, na fronteira e internamente nas barras de resposta.

O cálculo destas injeções equivalentes adicionais para as barras de resposta, pode ser feito seguindo-se o mesmo algoritmo dado na seção 2.6 adaptado para estas barras.

## Capítulo 4

# ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 Introdução

O modelo **W.E** já foi extensamente testado [10] para vários sistemas e tem sido utilizado em centros de controle do Brasil e exterior, com resultados bastante satisfatórios no tocante a alterações do tipo contingência de linhas.

Além disso, este modelo tem sido utilizado para representar o sistema externo quando são feitos estudos de otimização no sistema interno. Durante tais estudos, outras alterações ocorrem no sistema interno que não as contingências de linhas, transformadores e geradores já testadas. Estas alterações no sistema são consequência de ajustes iterativos nas variáveis de controle utilizadas pelos modelos de otimização na obtenção do ponto ótimo.

O desempenho do modelo **W.E.** com relação a alterações neste conjunto de variáveis de controle não foi ainda apresentado na literatura. A seguir os modelos **W.E** e **WRINT** proposto serão analisados do ponto de vista de respostas de ativo e reativo para alterações neste conjunto de variáveis. Para tal, foram realizados testes com vários níveis de alterações. Os testes foram realizados utilizando-se o sistema IEEE30, cuja subdivisão interno/fronteira/externo é mostrada no apêndice d, juntamente com suas características principais.

Para que se possa identificar separadamente o efeito que a alteração em cada variável provoca na resposta do sistema externo, foram feitos testes com alterações em cada uma das variáveis da parte reativa individualmente nos itens 4.4 e 4.5 a seguir.

No item 4.6 alguns casos envolvendo alterações em múltiplas variáveis de controle foram testados, a fim de que se possa mensurar como os modelos **W.E.** e **WRINT** reagem durante estudos de otimização no sistema interno, onde efetivamente todas as variáveis de

controle sofrem alteração ao mesmo tempo.

## 4.2 Metodologia Utilizada

A metodologia utilizada para a verificação do desempenho de modelos equivalentes é clássica e está sintetizada no algoritmo a seguir.

1. Escolhe-se um caso a ser estudado: uma contingência de linha ou variação em uma ou mais variáveis no sistema interno.
2. Executa-se o fluxo de carga (ou outra ferramenta que permita obter o estado do sistema) levando-se em conta o caso em estudo escolhido no ítem anterior para o sistema completo: sistema formado pelos sistemas interno (alterado)/ fronteira / externo (representado explicitamente, sem equivalenciamento). O estado obtido neste ítem representa a resposta real que o sistema externo teria frente à alteração escolhida, haja visto que o sistema utilizado está explícito (sem equivalenciamento).
3. Obtém-se o estado do sistema representando agora a parte externa pelo modelo equivalente cujo desempenho se quer testar.
4. Comparam-se os resultados apresentados em 3. e 2. calculando-se os erros percentuais para determinadas variáveis internas relevantes. Nos resultados ao longo deste capítulo os erros percentuais foram calculados para as seguintes variáveis internas:
  - tensões internas
  - fluxos de potência reativa nos ramos internos
  - fluxos de potência ativa nos ramos internos
  - ângulo das tensões

Os erros percentuais para os fluxos de ativo e reativo internos foram calculados (conforme referência [10]) da seguinte forma: sejam os valores de fluxos de potência internos calculados para casos do sistema com e sem equivalenciamento:

- $Q_C$ : fluxo de potência reativa calculado nos ramos internos para o sistema onde a parte externa é representada explicitamente.
- $P_C$ : fluxo de potência ativa calculado nos ramos internos para o sistema onde a parte externa é representada explicitamente.

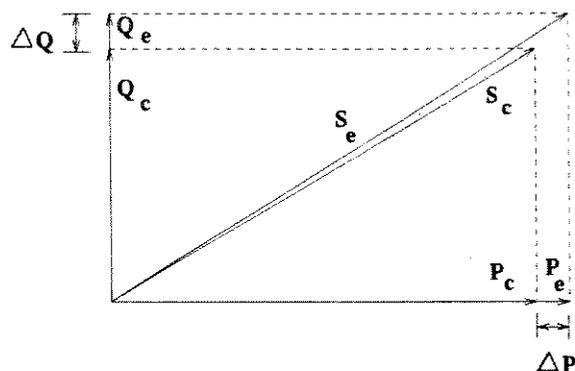


Figura 4.1: Diagrama fasorial: cálculo dos erros percentuais.

- $Q_E$ : fluxo de potência reativa calculado nos ramos internos para o sistema onde a parte externa é representada por um modelo equivalente.
- $P_E$ : fluxo de potência ativa calculado nos ramos internos para o sistema onde a parte externa é representada por um modelo equivalente

Os erros percentuais para os fluxos de ativo e reativo são calculados com relação à potência aparente de acordo com as equações dadas em 4.1 e 4.2 (ver figura 4.1). Desta forma, erro percentual é calculado levando-se em conta o carregamento das linhas.

$$Erro_{pot.ativa} = \frac{\Delta P}{S_C} \quad (4.1)$$

$$Erro_{pot.reativa} = \frac{\Delta Q}{S_C} \quad (4.2)$$

Em cada caso foram também calculados os erros percentuais médios apresentados para cada uma das variáveis internas citadas acima.

O modelo **WRINT** pressupõe um conjunto de barras do sistema interno/fronteira a serem eliminadas na parte reativa de resolução, para que as admitâncias fictícias internas sejam calculadas. Nos exemplos testados utilizaram-se dois modelos:

- **WRINT1**: foram eliminadas na parte reativa as barras: externas, e de fronteira.
- **WRINT2**: foram eliminadas na parte reativa as barras externas, e algumas barras de fronteira e internas especificadas em cada exemplo.

Os erros percentuais para cada um dos modelos acima foram calculados para  $0 < \alpha \leq 1$ , incrementando os valores de  $\alpha$  com um passo de 0.1.

## 4.3 Alterações de Contingência de Linha

### 4.3.1 Introdução

Neste ítem pretende-se analisar as respostas dos modelos **WRINT** e **W.E.** comparando o desempenho dos modelos principalmente no que diz respeito as suas respostas reativas.

Para testar os modelos, foram analisadas contingências para todas as linhas e transformadores internos do sistema IEEE30. Alguns casos mais significativos foram destacados e serão analisados a seguir. Para que se possa visualizar de forma mais clara o desempenho dos métodos, os erros percentuais médios para as tensões e os fluxos de ativo e reativo envolvendo todas as contingências de linha no sistema interno foram calculados e serão também analisados a seguir.

Os erros percentuais máximos também foram destacados em alguns exemplos a seguir, a fim de se mensurar o grau de dispersão dos erros dos modelos.

### 4.3.2 Caso 1 - Contingência da linha 1-2

Neste caso foram analisados os erros percentuais médios de resposta dos modelos equivalentes com relação à retirada da linha 1-2 do sistema IEEE30.

A figura 4.2 sintetiza a resposta dos modelos para tal contingência. Na figura estão plotados os erros percentuais para as variáveis analisadas do sistema interno citadas anteriormente, para diferentes valores de  $\alpha$  do modelo **WRINT**.

Pela análise dos erros percentuais médios calculados para as tensões das barras internas neste caso, pode-se observar primeiramente que o erro percentual do modelo **W.E.** está em níveis aceitáveis : 0.135%. Percebe-se ainda uma melhoria de resposta para todos os valores de  $\alpha$  utilizados no modelo **WRINT**, sendo o melhor desempenho obtido para  $\alpha \approx 0.5$ .

A diminuição dos erros de resposta dos fluxos de reativos internos tende a acompanhar os erros das tensões, devido logicamente ao acoplamento reativo/tensão que ocorre nos sistemas de potência.

Nota-se para a parte reativa de resposta de uma forma geral um melhor desempenho para o modelo **WRINT**, diminuindo consideravelmente os erros de resposta. Percebe-se portanto que as admitâncias fictícias internas introduzidas neste modelo reagiram localmente às contingências da linha 1-2, diminuindo os erros de resposta nestes casos.

A parte ativa, representada pelos gráficos de erros médios dos ângulos e potência ativa, teve erros percentuais pequenos para todos os modelos, confirmando o fato de que, para estudos de contingência, o grande problema dos modelos equivalentes está associado à parte reativa de resposta. O modelo **WRINT** obteve erros percentuais melhores na parte ativa, em comparação com o **W.E.**, para valores de  $\alpha$  até 0.6., sendo piores para os demais valores de  $\alpha$ .

### 4.3.3 Caso 2 - Contingência da linha 2-4.

Neste caso foram analisados os erros percentuais médios de resposta dos modelos equivalentes com relação à retirada da linha 2-4 do sistema IEEE30. Os resultados desta simulação estão mostrados na figura 4.3.

Na parte reativa de resposta o modelo **WRINT** teve também neste caso uma melhoria significativa no nível de resposta, em comparação com o modelo **W.E.**, para todos os valores de  $\alpha$  utilizados. Para a parte reativa de resposta, este fato se repetiu na maioria das simulações de contingência internas.

Os erros do modelo **W.E.** apesar de maiores são satisfatórios. O erro máximo para o reativo obtido para o modelo **W.E.** foi de  $\approx 10\%$  para o ramo 8-28.

Os erros percentuais para a parte ativa de resposta se mantiveram pequenos para todos os modelos. Observa-se uma ligeira diminuição dos erros médios de resposta tanto dos ângulos quanto da potência ativa para todos os valores de  $\alpha$  do **WRINT**.

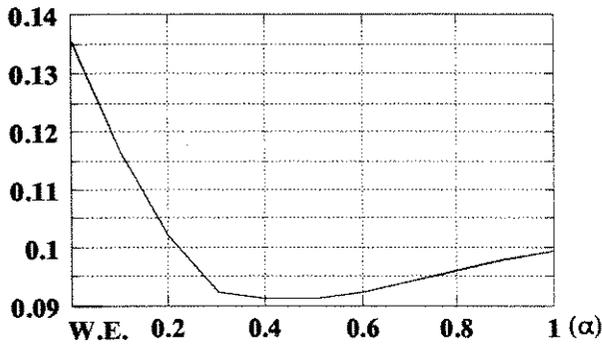
### 4.3.4 Valores médios dos estudos de análise de contingência

O desempenho dos métodos pode ser mais claramente analisados quando se leva em consideração todas as contingências possíveis de ocorrer no sistema interno. Procedendo-se de forma análoga aos casos anteriores, foram calculados os erros percentuais médios para as variáveis internas envolvendo todas as contingências. Os resultados estão mostrados na figura 4.4.

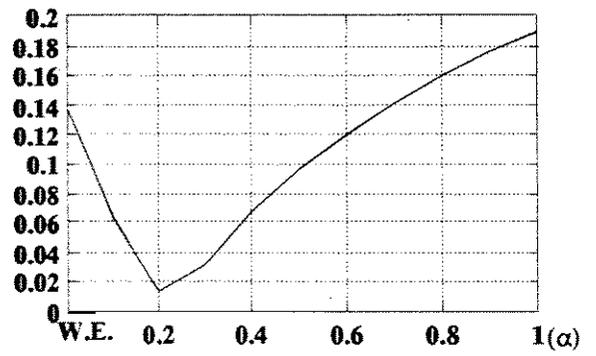
A figura sintetiza o desempenho dos modelos **W.E** e **WRINT** para estudos de análise de contingência no sistema IEEE30. Nota-se um melhor desempenho do modelo

**Caso 1 - Contingência da linha 1-2**

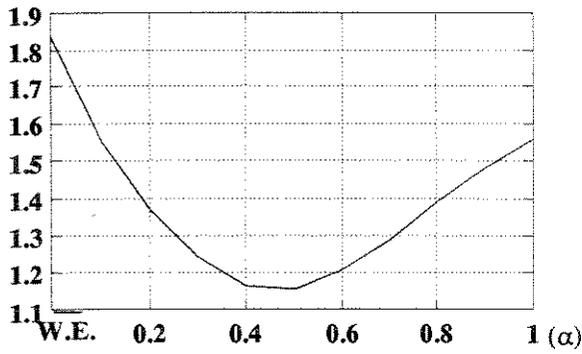
**Erro perc. médio tensões**



**Erro perc. médio ângulo**



**Erro perc. médio potência reativa**



**Erro perc. médio potência ativa**

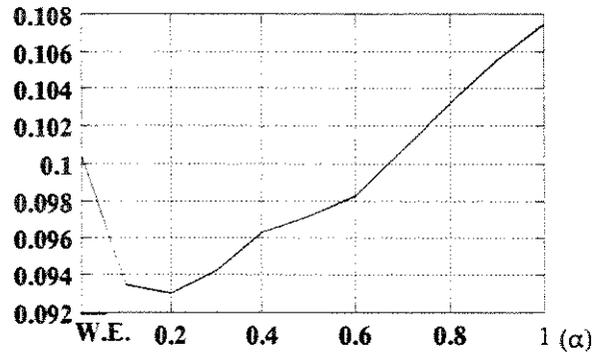


Figura 4.2: Caso 1 - Resposta dos modelos.

## Caso 2 - Contingência da linha 2-4

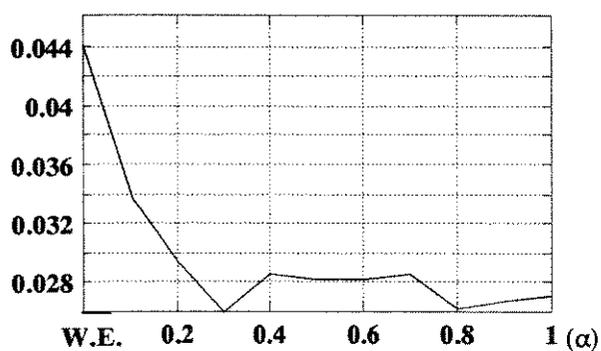
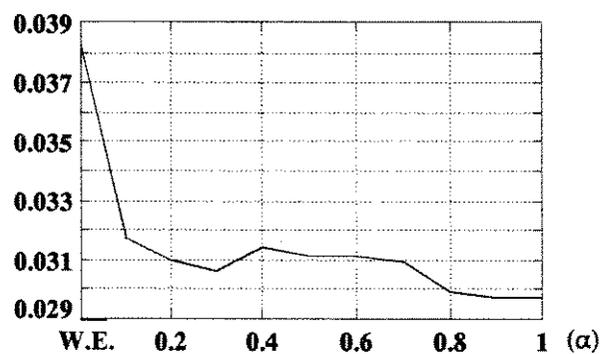
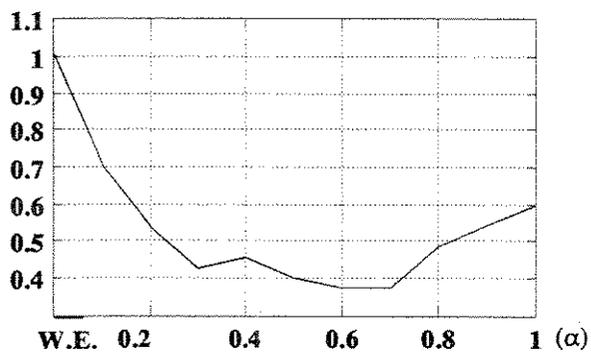
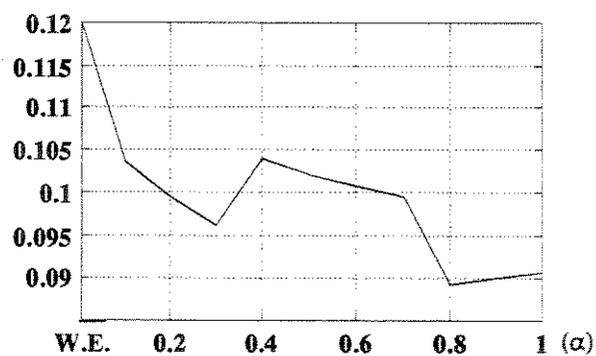
Erro perc. médio  
tensõesErro perc. médio  
ângulosErro perc. médio  
potência reativaErro perc. médio  
potência ativa

Figura 4.3: Caso 2 - Resposta dos modelos.

**WRINT** para todos os valores de  $\alpha$  tanto para a parte ativa quanto reativa de resposta, sendo o melhor desempenho obtido com o modelo **WRINT** utilizando-se  $\alpha = 0.6$  com o valor médio de erro percentual de reativo de aproximadamente 0.4%

#### 4.3.5 Considerações

Dos resultados mostrados na figura 4.4 é possível constatar que o modelo **W.E.** representa com uma precisão aceitável as reações do sistema externo frente às de contingência de linha. Para este modelo tivemos:

- Erro percentual médio para as tensões: 0.0357%
- Erro percentual médio para os ângulos das tensões: 0.0693%
- Erro percentual médio para os fluxos de potência ativa: 0.1308%
- Erro percentual médio para os fluxos de potência reativa: 0.6730%

Estes resultados reafirmam os resultados já obtidos na literatura com este modelo [10],[14].

Pode-se concluir ainda da figura 4.4 que os elementos fictícios internos do modelo **WRINT** tiveram uma reação principalmente na parte reativa do problema bastante positiva, sendo que os erros médios apresentados são inferiores ao **W.E.** para todos os valores de  $\alpha$  analisados. Como consequência da interdependência entre tensão/reativo, os erros nos fluxos de reativos também foram melhorados.

Pelos resultados médios obtidos conclui-se que modelo **WRINT**, também pode ser utilizado em estudos de análise de segurança estática com um ganho nos erros de resposta em relação ao modelo **W.E** para o sistema IEEE30 analisado.

Na parte ativa de resposta dos modelos é conveniente lembrar que os valores de erros percentuais médios se mantiveram pequenos, tanto para o **W.E** (confirmando os resultados já obtidos), quanto para o **WRINT**, onde os erros foram ligeiramente menores. A inserção das admitâncias fictícias internas não prejudicou a parte ativa de resolução, pelo contrário os erros percentuais médios da parte ativa também foram diminuídos.

## Análise de Contingência - Valores Médios

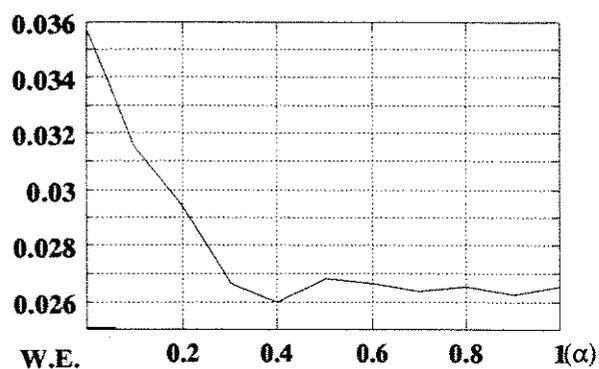
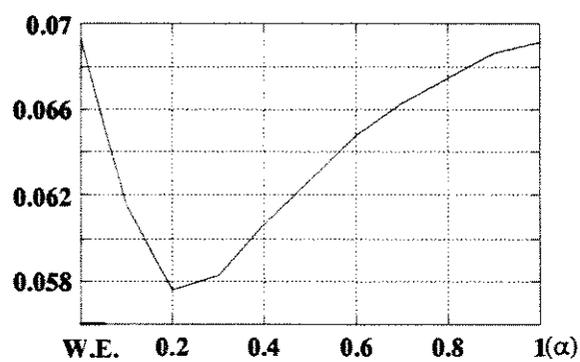
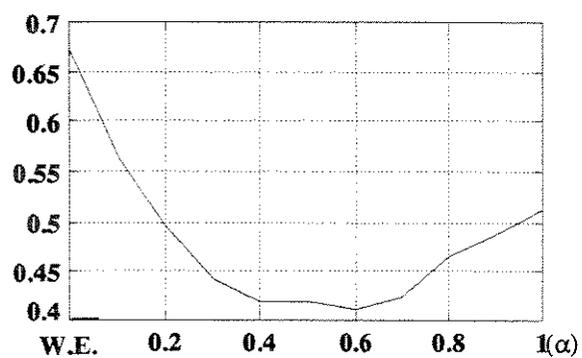
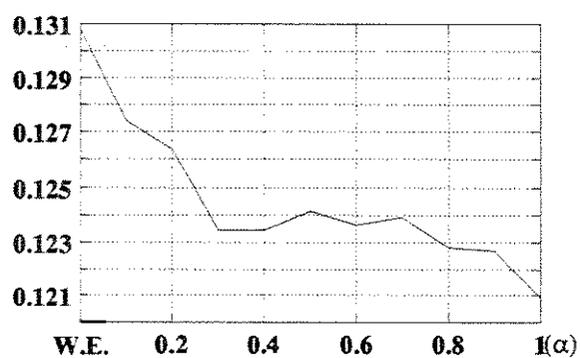
Erro perc. médio  
tensõesErro perc. médio  
ângulosErro perc. médio  
potência reativaErro perc. médio  
potência ativa

Figura 4.4: Valores médios - Resposta dos modelos.

## 4.4 Alterações nas Tensões Controladas

### 4.4.1 Introdução

Neste ítem pretende-se analisar as respostas dos modelos **W.E.** e **WRINT** no caso de alterações nas tensões do sistema interno. O grau de variação considerado nos testes foi de até 5%, nível médio de variação que geralmente ocorre durante estudos de otimização.

### 4.4.2 Caso 3 - Diminuição de 1% nas Tensões Internas

Neste caso foram diminuídas em 1% todas as tensões das barras de tensão controlada do sistema interno do IEEE30.

Os gráficos da figura 4.5 mostram os erros percentuais médios calculados para as variáveis internas para os modelos **W.E.**, **WRINT1**, e **WRINT2**.

No modelo **WRINT2** foram eliminadas do sistema interno/fronteira, para obtenção das admitâncias fictícias internas, as barras internas 4 e 6 e todas as barras de fronteira.

Foram escolhidos dois modelos **WRINT**, com dois conjuntos diferentes de barras do sistema interno/fronteira eliminadas, a fim de se analisar como tais conjuntos de barras escolhidos previamente podem influenciar a resposta do **WRINT**.

Pode-se perceber que os erros percentuais médios das tensões apresentados pelos modelos **WRINT** são menores que aqueles apresentados pelo **W.E.** para qualquer valor de  $\alpha \neq 0$ , sendo que para  $\alpha = 0.5$  no modelo **WRINT1** foi obtido o menor erro percentual médio.

Os erros médios de reativo foram significativamente melhorados com a inserção das admitâncias fictícias internas do modelo **WRINT**. Novamente o efeito local destas admitâncias contribuiu para a diminuição dos erros de resposta.

Percebe-se ainda que a parte reativa de reação é bem mais solicitada nas alterações de tensões, quando comparadas com as contingências de linha. Basta notar que para o modelo **W.E.** por exemplo, o maior erro percentual para o reativo, no caso de análise de contingência foi de  $\approx 1.85\%$  (no caso 1. já analisado); e com uma variação de apenas 1% nas tensões o erro percentual médio foi de 1.6%, quase igualando o valor anterior. Para variações de tensão maiores os erros percentuais excedem bastante estes valores conforme será visto no próximo caso analisado.

Ramo	W.E.	$\alpha=0.1$	$\alpha=0.2$	$\alpha=0.3$	$\alpha=0.4$	$\alpha=0.5$	$\alpha=0.6$	$\alpha=0.7$	$\alpha=0.8$	$\alpha=0.9$	$\alpha=1.0$
8-28	26.4	21.7	15.1	11.2	7.77	4.82	2.20	0.05	2.06	3.87	5.46
8-6	2.41	1.78	1.06	0.62	0.24	0.06	0.33	0.56	0.77	0.97	1.12

Tabela 4.1: Erros percentuais máximos para o reativo obtidos no caso 3.

O desempenho dos modelos **WRINT** depende de simulações prévias a fim de escolher as barras do sistema interno/fronteira que serão eliminadas, conforme se pode avaliar pela análise das curvas para os modelos **WRINT1** e **WRINT2** (com desempenhos bastante diferentes), para que o melhor desempenho possa ser alcançado.

É conveniente ressaltar que no cálculo dos erros percentuais médios houve um desvio padrão considerável. Na maioria dos ramos internos os erros estão abaixo do valor percentual médio mostrado na figura 4.5, ocorrendo variações elevadas em determinados ramos. Desta forma estes ramos é que praticamente definem o erro percentual médio. Neste caso analisado percebe-se que os erros percentuais foram críticos nos ramos dados na tabela 4.1. Percebe-se pela tabela que as admitâncias fictícias internas têm um efeito bastante significativo, agindo diretamente nestes ramos onde os erros percentuais foram maiores.

Na parte ativa de resposta nota-se que os erros percentuais médios para os ângulos das tensões foram melhorados pelos modelos **WRINT**.

Os erros percentuais médios para os fluxos de ativo na rede interna foram desprezíveis para todos os modelos conforme mostrado na figura 4.5. Este resultado era esperado, visto que a alteração nas tensões está diretamente vinculada à parte reativa de resolução do problema influenciando pouco os fluxos de potência ativa na rede.

#### 4.4.3 Caso 4 - Aumento de 5% nas Tensões Internas

Neste caso estudado foram aumentadas em 5% todas as tensões das barras de tensão controlada internas do sistema IEEE30

No modelo **WRINT2** as barras do sistema interno/fronteira eliminadas foram as barras internas 4 e 6 e todas as barras de fronteira. Os erros obtidos com os modelos são mostrados na figura 4.6.

Também neste caso os erros médios das tensões apresentados pelos modelos **WRINT** são menores para qualquer valor de  $\alpha$ , também se repetindo o valor  $\alpha \approx 0.5$  como

## Caso 3 - Aumento de 1% nas tensões internas

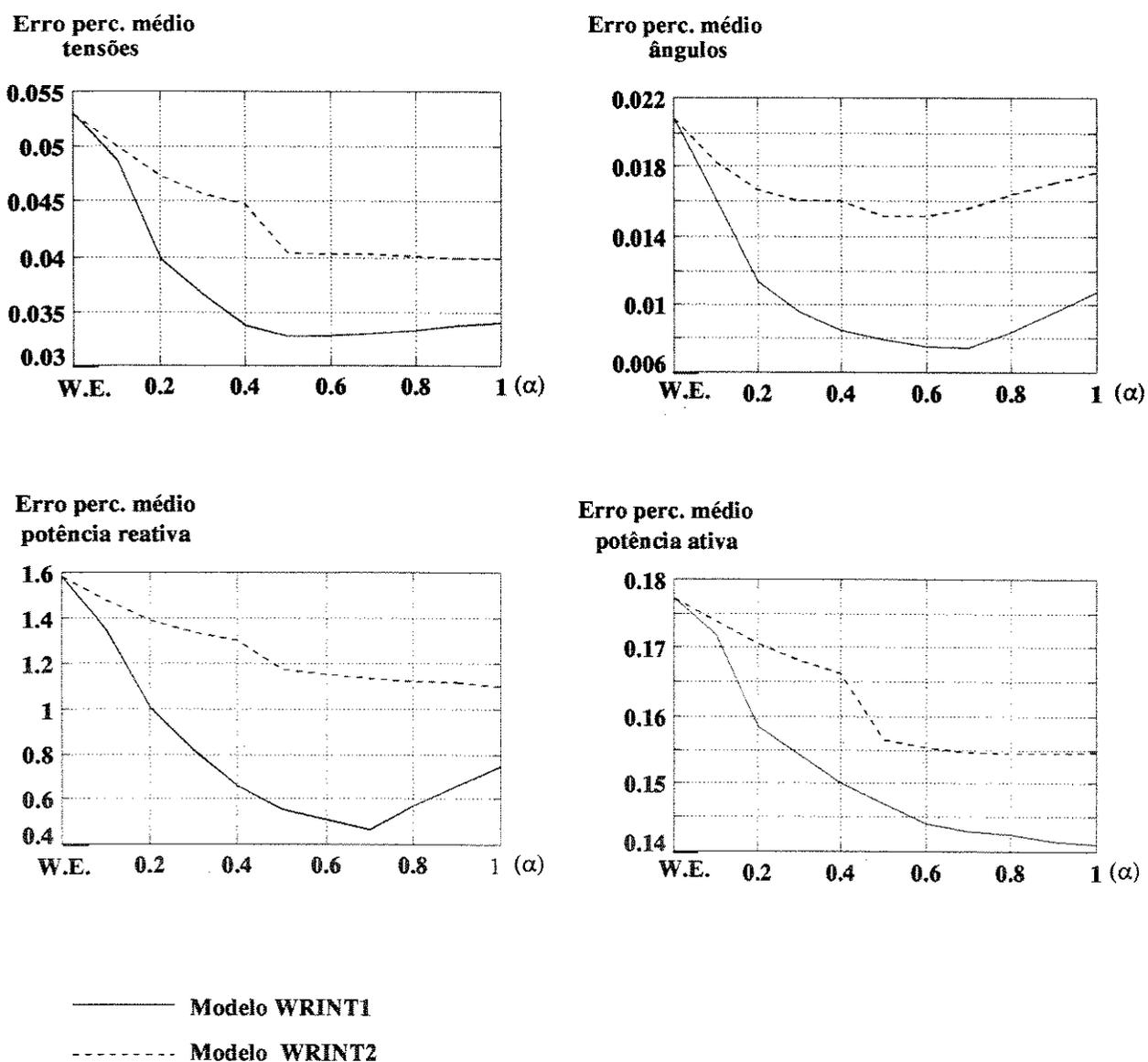


Figura 4.5: Caso 3 - Resposta dos modelos.

Ramo	W.E.	$\alpha=0.1$	$\alpha=0.2$	$\alpha=0.3$	$\alpha=0.4$	$\alpha=0.5$	$\alpha=0.6$	$\alpha=0.7$	$\alpha=0.8$	$\alpha=0.9$	$\alpha=1.0$
8-28	44.0	32.0	22.0	16.0	11.0	7.60	4.35	1.66	0.58	2.50	4.15
6-8	10.2	7.38	4.94	2.90	1.56	0.23	0.89	1.86	2.71	3.45	4.11

Tabela 4.2: Erros percentuais máximos para o reativo obtidos no caso 4.

sendo o menor erro médio para do **WRINT1**.

Na parte reativa da resposta dos modelos para este caso, mostrada na figura 4.6, onde aparecem os erros percentuais médios para os fluxos de reativo interno, mostra-se que também neste caso os modelos **WRINT** se mostram significativamente mais precisos em relação ao **W.E.** sendo que o erros percentuais médios caíram pela metade para valores de  $\alpha$  em torno de 0.5.

Os erros percentuais médios do modelo **W.E.** não chegam a ser satisfatórios do ponto de vista reativo. Com os modelos **WRINT** estes erros de resposta caem para valores aceitáveis.

Os ramos onde os erros percentuais máximos para a potência reativa estão mostrados na tabela a seguir. Da tabela 4.2 percebe-se que erro máximo está bastante acima do valor tolerado para modelos equivalentes. Nota-se também que o efeito das admitâncias internas é bastante significativo restringindo o erro máximo do ramo 8-28.

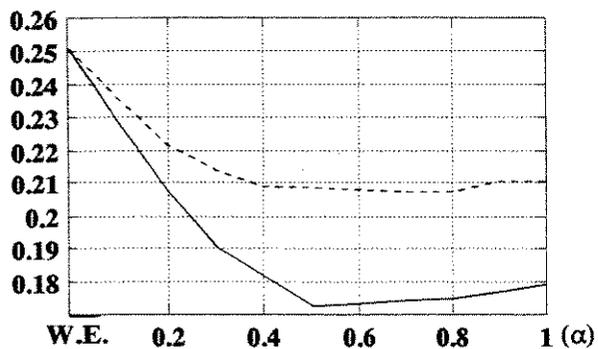
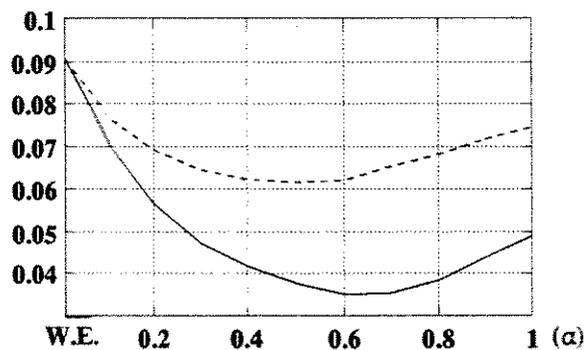
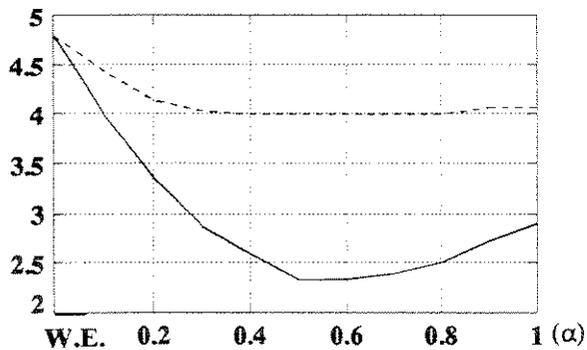
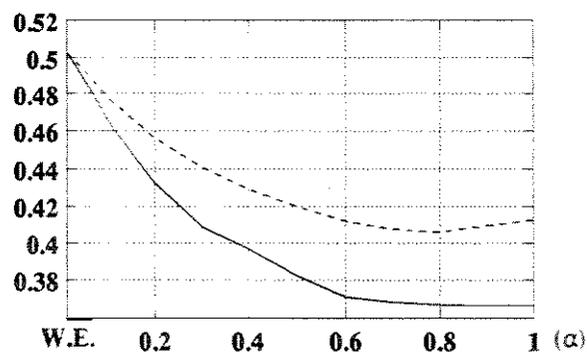
Neste exemplo se percebe mais claramente a importância da escolha correta das barras do sistema interno/fronteira a serem eliminadas, já que o desempenho do modelo **WRINT1** é significativamente melhor que o **WRINT2**, apesar de este último ter tido um desempenho melhor que o modelo **W.E.**

A eliminação apenas das barras de fronteira no processo de redução da parte reativa parece ser uma boa política no cálculo das admitâncias fictícias internas para este sistema.

Os erros percentuais médios para os ângulos das tensões foram ligeiramente melhorados nos modelos **WRINT**.

Na parte ativa os erros percentuais médios calculados para os fluxos de ativo nos ramos internos foram também desprezíveis pelas mesmas razões citadas no caso anterior. A inserção dos shunts fictícios internos não prejudicou o desempenho da parte ativa, melhorando ligeiramente sua resposta.

## Caso 4 - Aumento de 5% nas tensões internas

Erro perc. médio  
tensõesErro perc. médio  
ângulosErro perc. médio  
potência reativaErro perc. médio  
potência ativa

———— Modelo WRINT1  
 - - - - - Modelo WRINT2

Figura 4.6: Caso 4 - Resposta dos modelos.

#### 4.4.4 Considerações

Além dos casos citados nos ítems anteriores vários casos envolvendo outros níveis de alterações nas tensões de barras de tensão controlada foram simulados para o sistema IEEE30. Em todos esses casos os resultados apresentados confirmam a tendência de melhoria nos erros de resposta da tensão como acontece nos gráficos das figuras 4.5, 4.6.

Verificou-se que para o sistema em estudo, o nível de resposta exigido do modelo equivalente pelas alterações nas tensões internas é bem maior quando comparado com os estudos de contingência. Este fato parece coerente, já que as alterações dos estudos de contingência, sejam elas contingência de linha ou transformadores, são locais, em contrapartida às alterações nas tensões internas, que estão espalhadas pelo sistema.

Constatou-se que os modelos equivalentes **W.E.** não respondem com erros de potência reativa aceitáveis em alguns casos de alterações nas tensões internas possíveis de ocorrer em estudos de otimização, tais como no caso 1 estudado onde as tensões foram variadas em apenas 1% e ocorreram erros de até 26% (erro reativo do ramo 8-28). Portanto, ainda que não se estivesse considerando os erros relacionados à modelagem das restrições de factibilidade e perdas externas, o modelo **W.E.** não estaria representando de forma aceitável nestes casos as reações do sistema externo para estudos de otimização.

Verificou-se também nos casos estudados que os modelos **WRINT** têm a tendência de diminuir os erros percentuais médios dos fluxos de reativos internos na rede em relação ao modelo **W.E.** principalmente quando os ramos eletricamente "mais internos" em relação à fronteira são mais solicitados. Nestes casos o efeito local das admitâncias fictícias internas teve uma influência bastante positiva no modelo, diminuindo consideravelmente os erros percentuais médios em relação ao **W.E.**

Com relação ao modelo **WRINT** verificou-se a necessidade de estudos prévios a fim de escolher qual o grau de "internalização" das admitâncias fictícias, isto é: deve se definir previamente através de simulações com o sistema em estudo até que ponto, na parte reativa de solução, deve-se eliminar as barras do sistema interno a fim de calcular as admitâncias fictícias cada vez mais para "dentro" do sistema interno. Apesar da necessidade destes estudos prévios, constatou-se que mesmo não tendo o mesmo desempenho ambos os modelos **WRINT** responderam de forma mais precisa que o modelo **W.E.**

No caso de alterações em tensões controladas o principal problema a ser modelado é, logicamente, a resposta reativa externa, sendo que os erros percentuais calculados para os fluxos de ativo dos casos estudados foi pequeno, conforme esperado. Para o modelo **WRINT** estes erros praticamente não foram alterados em relação ao **W.E.** sendo considerados assim como no **W.E.** bastante satisfatórios.

## 4.5 Alterações nos Taps dos Transformadores

### 4.5.1 Introdução

Neste ítem pretende-se avaliar as respostas dos modelos **W.E.** e **WRINT** com relação às variações que ocorrem nos taps de transformadores utilizados como variáveis de controle nos modelos de otimização.

Nas simulações feitas com os modelos, o nível de alteração máximo considerado nas alterações nos taps foi de 5%. Nos casos testados a faixa de variação dos taps ficou sempre entre  $0.9 \leq tap \leq 1.1$ .

### 4.5.2 Caso 5 - Aumento de 1% nos Taps dos Transformadores Internos

Neste caso, foram alterados em 1% o valor dos taps dos transformadores internos do sistema IEEE30. Todos os transformadores internos deste sistema estão localizados em ligações interno/fronteira, geralmente mais solicitadas:

- ramo 4 - 12
- ramo 6 - 9
- ramo 6 - 10

No modelo **WRINT2** foram eliminadas do sistema interno/fronteira apenas as barras 12, 9, 4 e 6 na redução da parte reativa, sendo retidas as barras de fronteira 10, 8, e 28.

Os resultados dos erros percentuais médios para as variáveis internas dos modelos está mostrado na figura 4.7.

Pela análise da figura, percebe-se primeiramente que o problema de resposta associado às alterações em taps de transformadores também está mais diretamente relacionado à parte reativa de solução. Como se pode observar, os erros percentuais de todos os modelos para a parte ativa de resposta é desprezível em comparação com os erros da parte reativa. Ou seja, o problema de resposta para estas alterações é também, como nas alterações anteriores, um problema reativo.

Comparando-se com os erros ocorridos nas alterações de estudos de contingência, percebe-se que o nível de resposta exigido dos modelos equivalentes para alterações em taps de transformadores para este sistema é superior; com uma pequena alteração de

Ramo	W.E.	$\alpha=0.1$	$\alpha=0.2$	$\alpha=0.3$	$\alpha=0.4$	$\alpha=0.5$	$\alpha=0.6$	$\alpha=0.7$	$\alpha=0.8$	$\alpha=0.9$	$\alpha=1.0$
8-28	16.2	11.8	8.90	9.19	6.59	7.54	4.87	6.09	5.52	2.94	4.61
8-6	2.34	1.62	1.23	1.27	0.94	1.06	0.73	0.87	0.80	0.49	0.69

Tabela 4.3: Erros percentuais máximos para o reativo obtidos no caso 5.

1% os erros percentuais médios ocorridos foram praticamente da mesma magnitude que os erros obtidos na pior contingência analisada.

Neste exemplo percebe-se mais claramente a influência da escolha das barras do sistema interno/fronteira a serem eliminadas. Para o modelo **WRINT1**, onde são eliminadas todas as barras de fronteira, o desempenho na parte reativa foi pior que do modelo **W.E** para a maioria dos valores de  $\alpha$ . No modelo **WRINT2**, onde apenas as barras 12, 9, 4, e 6 foram eliminadas, o desempenho foi consideravelmente melhorado para todos os  $\alpha$  analisados.

Na tabela 4.3 são mostrados os ramos onde ocorreram os maiores erros reativos para o caso. O modelo **W.E** não representa de forma aceitável a reação reativa do ramo 8-28, que é significativamente corrigida pela inserção dos shunts fictícios internos

Os erros percentuais para a parte ativa de resposta não foram substancialmente alterados nos modelos **WRINT** pela inserção das admitâncias fictícias internas.

#### 4.5.3 Caso 6 - Aumento de 5% nos Taps dos Transformadores Internos

Neste caso todos os taps de transformadores foram aumentados em 5%. Os erros de resposta dos modelos estão mostrados na figura 4.8

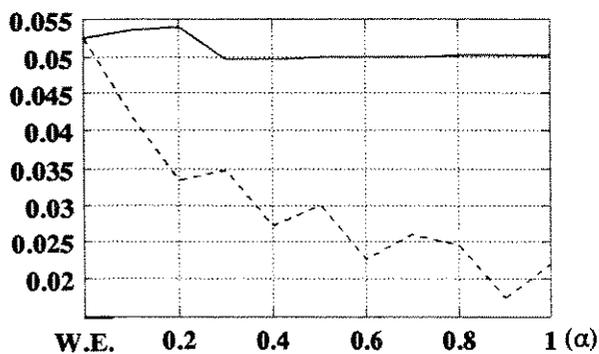
O modelo **WRINT2** utilizado foi o mesmo do caso anterior, ou seja foram eliminadas as barras 12, 9, 4 e 6 na redução da parte reativa do modelo.

Confirma-se a afirmação anterior de que a principal reação externa a se representar no caso de alterações nos taps de transformadores é a reação reativa. Mesmo para uma alteração de 5%, considerável já que as alterações máximas são de 10% (faixa de variação de 0.9 a 1.1), os erros percentuais da parte ativa se mantiveram pequenos.

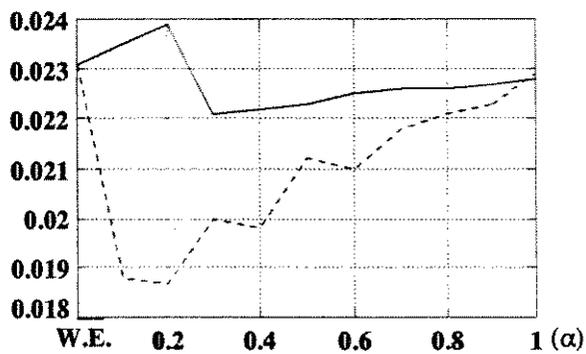
A eliminação de todos os elementos de fronteira não se mostra como uma boa opção para o sistema estudado, nestes casos de alteração de taps. Pode-se perceber este

**Caso 5 - Aumento de 1% nos taps dos transformadores**

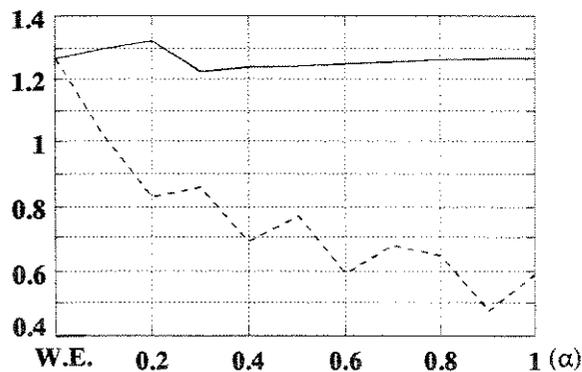
**Erro perc. médio tensões**



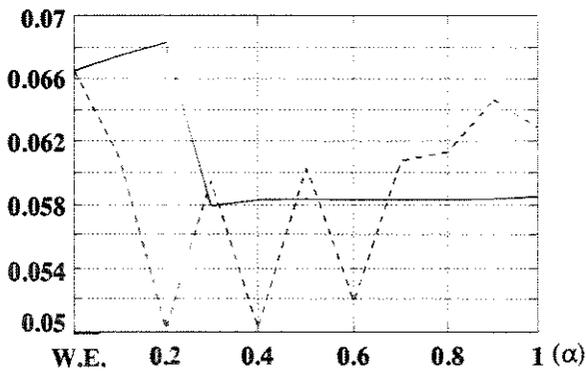
**Erro perc. médio ângulos**



**Erro perc. médio potência reativa**



**Erro perc. médio potência ativa**



----- Modelo WRINT2

————— Modelo WRINT1

Figura 4.7: Caso 5 - Resposta dos modelos.

Ramo	W.E.	$\alpha=0.1$	$\alpha=0.2$	$\alpha=0.3$	$\alpha=0.4$	$\alpha=0.5$	$\alpha=0.6$	$\alpha=0.7$	$\alpha=0.8$	$\alpha=0.9$	$\alpha=1.0$
8-28	73.0	52.0	44.3	39.7	32.3	27.7	23.8	22.4	19.5	14.97	12.7
6-9	10.5	9.56	8.76	8.31	7.55	7.0	6.6	6.51	6.19	5.67	5.41

Tabela 4.4: Erros percentuais máximos para o reativo obtidos no caso 6.

fato da resposta do modelo **WRINT1**, onde tanto na parte ativa quanto reativa, o modelo responde com erros percentuais mais elevados que os do modelo **W.E**

Na parte reativa de resposta os erros percentuais médios calculados para o modelo **W.E.** não chegam a ser satisfatórios, sendo que o erro máximo obtido neste modelo chegou a 73% no ramo 8-28 como se pode ver na tabela 4.4.

Na resposta reativa nota-se um desempenho bastante superior do modelo **WRINT2**. As admitâncias fictícias internas calculadas para este modelo reagiram, também para alterações em taps de transformadores, diminuindo erros percentuais médios para valores aceitáveis e restringindo significativamente estes erros.

#### 4.5.4 Considerações

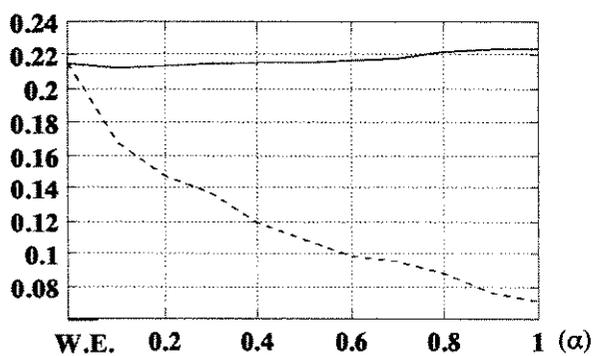
O nível de exigência de resposta reativa dos equivalentes para as alterações em taps de transformadores é maior, se comparado aquele exigido pelas alterações de contingência de linha. Isto é coerente se levarmos em conta as alterações localizadas das contingências de linha em contrapartida às várias alterações em taps de transformadores espalhadas pelo sistema interno.

Sendo maiores as exigências reativas, o modelo **W.E.** não se mostrou suficientemente preciso para alguns casos de alterações em taps de transformadores possíveis de ocorrer em estudos de otimização. Portanto, para estes estudos as reações deste modelo associadas à modelagem das variações nos taps de controle podem levar a estados de otimização que na realidade não são ótimos.

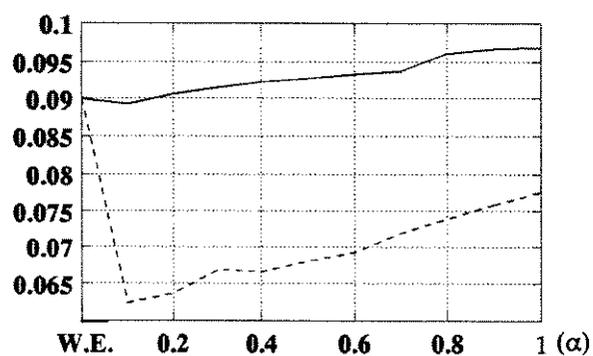
Verificou-se que para o sistema em estudo que é possível melhorar consideravelmente a resposta reativa do equivalente com a inserção no modelo das admitâncias fictícias internas, desde que as barras escolhidas sejam previamente analisadas de forma a obtermos um melhor ganho de resposta. Portanto, os modelos **WRINT** representam melhor as reações reativas externas, diminuindo consideravelmente os erros no sistema.

Caso 6 - Aumento de 5% nos taps dos transformadores

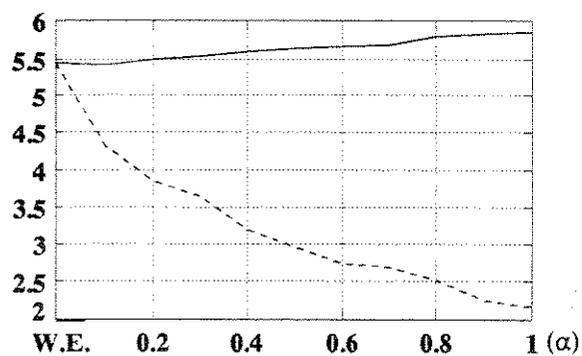
Erro perc. médio  
tensões



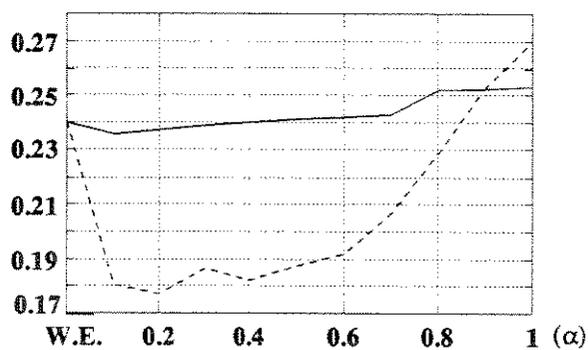
Erro perc. médio  
ângulos



Erro perc. médio  
potência reativa



Erro perc. médio  
potência ativa



----- Modelo WRINT2

————— Modelo WRINT1

Figura 4.8: Caso 6 - Resposta dos modelos.

A representação do sistema externo quando de alterações nos taps de controle é um problema reativo, conforme se pode observar das figuras 4.7 e 4.8, onde os erros percentuais calculados na parte ativa de resposta são praticamente desprezíveis, se comparados aos erros da parte reativa.

## 4.6 Alterações em Múltiplas Variáveis de Controle

### 4.6.1 Introdução

Neste ítem pretende-se estudar as reações dos modelos equivalentes **W.E.** e **WRINT** quando ocorrem alterações em múltiplas variáveis de controle.

Dos casos até aqui estudados, esta situação é a que mais se aproxima às alterações que realmente ocorrem durante o processo iterativo de modelos utilizados em estudos de otimização, onde a cada iteração todas as variáveis de controle são alteradas na busca do ponto ótimo.

É conveniente reiterar que os testes realizados não incluem a simulação de modelos de otimização. Estas simulações tratam apenas das respostas dos equivalentes às alterações em variáveis de controle do sistema interno, e consistem portanto num primeiro passo no sentido de modelar o sistema externo, com suas perdas e restrições de factibilidade efetivamente representadas.

As alterações nos despachos de potência ativa consideradas foram feitas de forma a não alterar o ponto de operação básico do sistema, exatamente como ocorre no processo iterativo de resolução de modelos de otimização, onde a cada passo na direção do ponto ótimo (ou sub-ótimo) a geração das barras de controle é redespachada em níveis incrementais, porém sem alterar o ponto de operação. Desta forma as alterações nos despachos de potência foram feitas em níveis de 5% da carga total do sistema.

### 4.6.2 Caso 7

Neste ítem foram alteradas as seguintes variáveis de controle:

- As tensões das barras de tensões controladas foram aumentadas em 5%
- Os taps dos transformadores internos foram aumentados em 1%
- As barras 2 e 7 foram redespachadas da seguinte forma:

Ramo	W.E.	$\alpha=0.1$	$\alpha=0.2$	$\alpha=0.3$	$\alpha=0.4$	$\alpha=0.5$	$\alpha=0.6$	$\alpha=0.7$	$\alpha=0.8$	$\alpha=0.9$	$\alpha=1.0$
8-28	49.3	37.6	28.7	22.7	17.7	13.7	10.5	7.82	5.56	3.64	1.98
6-8	11.7	9.0	6.7	5.1	3.6	2.31	1.25	0.33	0.46	1.17	1.8
6-9	14.0	14.2	14.3	14.6	14.7	14.8	14.9	15.0	15.1	15.1	15.2

Tabela 4.5: Erros percentuais máximos para o reativo obtidos no caso 7.

- barra 2 - teve sua geração diminuída em 20MW
- barra 7 - teve sua geração aumentada em 20MW

Alterações no despacho de potência ativa geralmente causam erros de resposta na parte ativa dos modelos equivalentes. Entretanto, o desempenho da parte ativa dos modelos mostrado na figura 4.9 não foi substancialmente alterado pelas alterações efetuadas. Percebe-se que a inserção dos shunts fictícios internos não prejudicaram, também neste caso, o desempenho da parte ativa para o modelo **WRINT**. Pelo contrário, os erros percentuais deste modelo foram melhorados em relação ao **W.E.**

Na parte reativa de resolução, percebe-se uma superioridade dos modelos **WRINT**, sendo que o melhor valor foi obtido para  $\alpha \approx 0.6$ . Na parte reativa de resolução o modelo **W.E.** não representa de forma adequada a resposta do sistema externo, apresentando erros médios superiores a 5%. Com os modelos **WRINT** estes erros foram significativamente reduzidos, caindo para valores mais aceitáveis.

A redistribuição das reações reativas pelas barras de resposta através da inserção dos shunts fictícios tende a diminuir os erros de resposta do modelo **WRINT** exatamente nas barras onde estes erros são mais acentuados conforme é mostrado na tabela 4.5. Da tabela percebe-se que os erros reativos máximos foram significativamente melhorados.

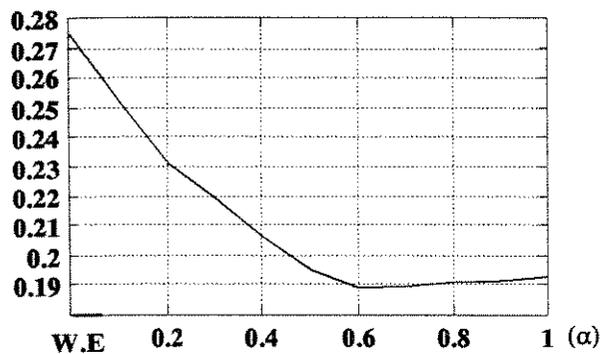
#### 4.6.3 Caso 8

Neste caso foram alteradas as seguintes variáveis de controle do sistema interno:

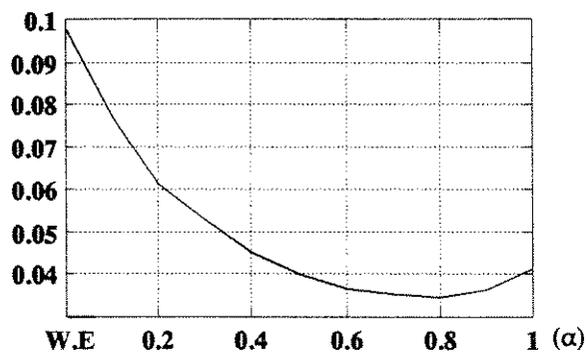
- As tensões das barras de tensões controladas foram aumentadas em 3%
- Os taps dos transformadores internos foram aumentados em 2%
- As barras 2 e 7 foram redespachadas da seguinte forma:

**Caso 7 - Múltiplas alterações nas variáveis**

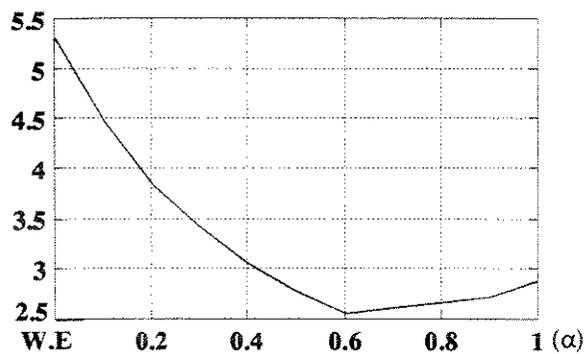
**Erro perc. médio  
tensões**



**Erro perc. médio  
ângulos**



**Erro perc. médio  
potência reativa**



**Erro perc. médio  
potência ativa**

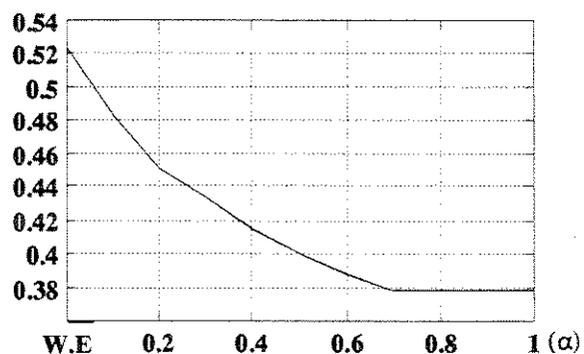


Figura 4.9: Caso 7 - Resposta dos modelos.

Ramo	W.E.	$\alpha=0.1$	$\alpha=0.2$	$\alpha=0.3$	$\alpha=0.4$	$\alpha=0.5$	$\alpha=0.6$	$\alpha=0.7$	$\alpha=0.8$	$\alpha=0.9$	$\alpha=1.0$
8-28	96.0	78.0	63.0	53.0	44.7	39.8	34.6	30.0	26.7	23.6	21.0
6-8	11.0	9.0	7.7	6.5	5.5	4.8	4.1	3.4	2.8	2.4	1.96
6-10	7.0	7.0	7.1	7.1	7.2	7.3	7.3	7.4	7.4	7.4	7.4

Tabela 4.6: Erros percentuais máximos para o reativo obtidos no caso 8.

- barra 2 - teve sua geração diminuída em 20MW
- barra 7 - teve sua geração aumentada em 20MW

A resposta ativa não foi significativamente alterada com erros percentuais médios em torno de 0.5%. Os modelos **WRINT** tiveram um desempenho ligeiramente melhor que o **W.E.**

Na resposta reativa percebe-se também neste caso um desempenho superior do modelo **WRINT** comparando-se com o **W.E.** Os erros percentuais médios dos fluxos de reativos diminuíram de 6.5% para valores de  $\approx 3\%$ . Os erros percentuais máximos estão apresentados na tabela 4.6. Fica clara a diminuição nos erros máximos quanto maior o valor de  $\alpha$ , isto é: quanto maior o nível de reflexão das admitâncias fictícias de fronteira nas barras de resposta internas.

#### 4.6.4 Considerações

Pode-se concluir dos testes feitos nesta seção que o modelo **W.E.** não representa, com uma precisão aceitável para estudos de otimização, as reações do sistema externo frente as múltiplas alterações nas variáveis de controle que ocorrem nestes estudos para o sistema IEEE30.

Mesmo que os problemas associados ao erro de minimização das perdas externas e de violação das restrições de factibilidade externas não sejam considerados, os erros de resposta do modelo **W.E.**, superiores a 5% em ambos os casos analisados, poderiam inviabilizar estudos de otimização realizados utilizando-se o **W.E.** para representar o sistema externo.

Com a utilização dos modelos **WRINT** estas reações foram significativamente melhoradas conforme se pode observar das figuras 4.9 e 4.10.

## Caso 8 - Múltiplas alterações nas variáveis

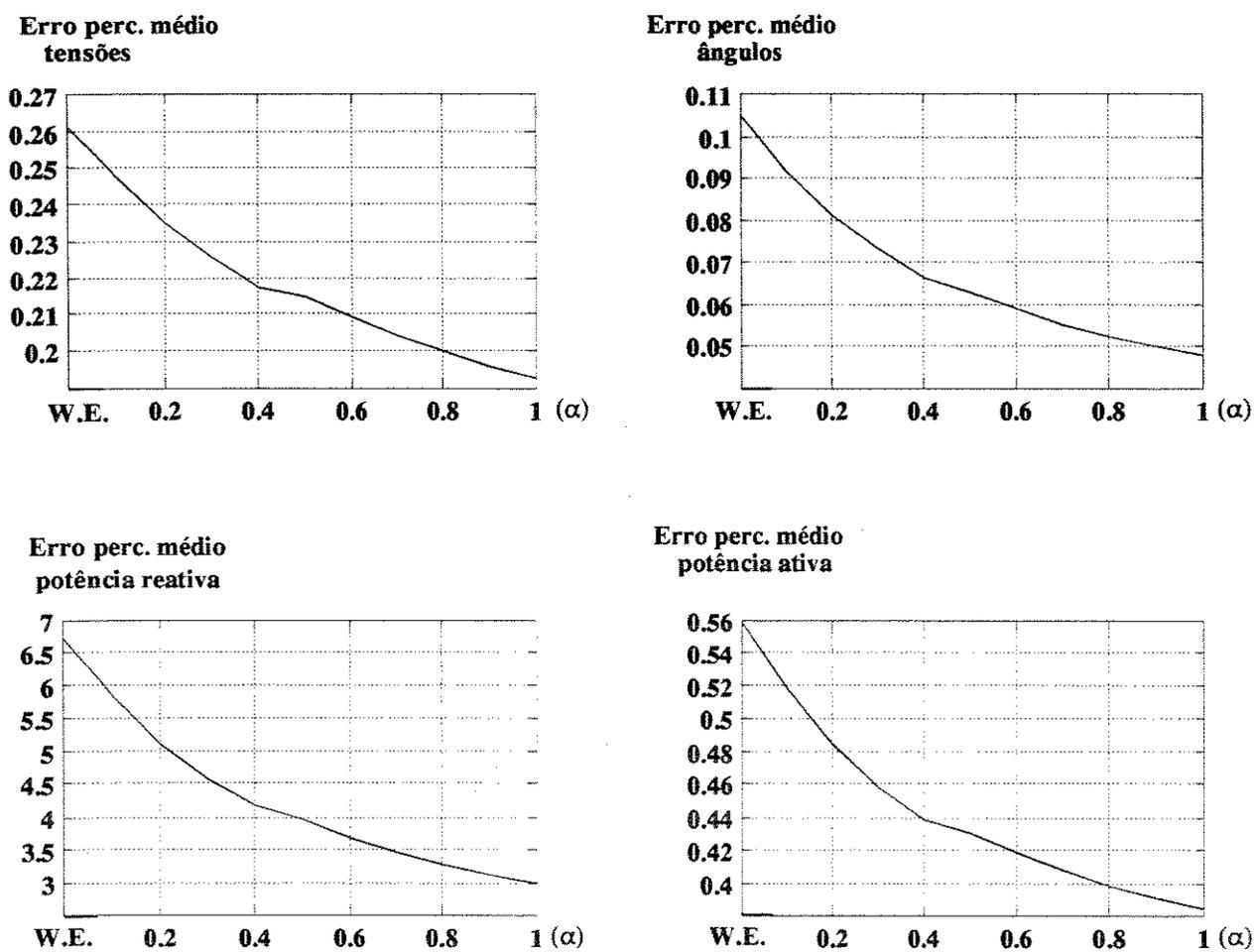


Figura 4.10: Caso 8 - Resposta dos modelos.

As reações reativas às múltiplas alterações que ocorrem nos estudos de otimização do sistema IEEE30 são melhor representadas pelos modelos **WARD REATIVO INTERNO**. Nestes modelos as reações são introduzidas na parte interno do sistema, adaptando a resposta reativa através da escolha das barras de resposta, feita levando-se em consideração os locais efetivos previamente conhecidos onde ocorrerão as alterações.

## Capítulo 5

### Conclusões

Neste trabalho foi feita uma análise do modelo equivalente **WARD ESTENDIDO** e sua aplicação em estudos onde as alterações do sistema são do tipo efetuadas em estudos de otimização. Em [19] os erros de resposta desse equivalente obtidos em estudos de otimização foram atribuídos à não representação das perdas e restrições do sistema externo.

Neste trabalho procurou-se desenvolver um equivalente externo (**WRINT**) que apresente uma melhoria na resposta obtida pelo **W.E.** em alterações similares às ocorridas em passos de otimização. Assim sendo, está sendo proposto um modelo equivalente que é obtido do modelo **W.E.** representando parte de sua reação reativa junto a barras do sistema interno. Esse procedimento permite obter a reação externa diretamente em barras do sistema interno, apresentando melhorias em relação às respostas do equivalente **W.E.** como mostram os resultados.

Assim, mostra-se que uma parcela dos erros de resposta ocorridos em estudos de otimização está associada ao modelo equivalente utilizado e não somente "à não representação de restrições e objetivos do sistema externo".

No modelo estudado **WRINT** a resposta reativa do sistema externo "entra" no sistema interno, melhorando o desempenho em relação ao modelo **W.E.**. Dos resultados apresentados pode-se constatar que o desempenho do modelo **WARD REATIVO INTERNO** depende de estudos prévios para se definir o conjunto das barras de resposta nas quais as admitâncias fictícias irão atuar diretamente. Ou seja, é necessário analisar previamente onde e em que grau ( $\alpha$ ) deverão atuar as admitâncias fictícias junto ao sistema interno. Este modelo é mais adaptado às alterações em variáveis de controle, já que mudando-se este conjunto de variáveis, é possível atualizar o equivalente de forma que um novo conjunto de barras de resposta seja convenientemente escolhido de modo a diminuir os erros de resposta. Por outro lado, a reação dos modelos equivalentes clássicos não é flexível,

sendo localizada apenas na fronteira.

Pela forma como o modelo **WARD REATIVO INTERNO** atua no sistema interno, diminuindo os erros, aproximando a resposta das alterações ocorridas, redistribuindo e aumentando os locais efetivos de resposta, este equivalente se mostra mais adaptado para a representação das reações externas nos casos de estudos de otimização.

# BIBLIOGRAFIA

- [1] **Monticelli, A. J.**; *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*; CEP-PEL/Eletróbrás/Edgard Blucher Ltda; São Paulo; 1985.
- [2] **Elgerd, O. I.**; *Electric Energy Systems Theory: an introduction*; Mac Graw Hill Company; New York; 1971.
- [3] **Morozowski, M.**; *Matrizes Esparsas em Redes de Potências: Técnicas de Operação*; LTC; Rio de Janeiro; 1981.
- [4] **Zolenkopf, K.**; *Bi-Factorization Basic Computational Algorithm and Techniques - Large Sparse Set of Linear Equations*; J. K. Reid; Academic Press; 1971.
- [5] **Tinney, W. F. & Walker, J. W.**; *Direct Solutions of Sparse Network Equations by Optimally Ordered Triangular Factorization*; IEEE pp 1801-1809; 1967.
- [6] **Ward, J. B.**; *Equivalent Circuits for Power Flow Studies*; AIEE Transactions; vol 68; pp 373-382; New York; 1949.
- [7] **Ward, J. B.**; *Digital Computer Solution of Power Flow Problems*; AIEE Transactions; vol 75; pp 398-404; New York; june; 1956.
- [8] **Tomas E. Dy Liacco.**; *The Adaptive Reliability Control System*; IEEE Trans. Power App. Syst.; PAS-86; pp 517-530; may; 1967.
- [9] **Deckmann, S. & Pizzolante, A. & Monticelli, A. & Sttot, B. & Alsaç, O.**; *Studies on Power System Load Flow Equivalentencing*; IEEE Trans. Power App. Syst.; PAS-99; pp 2292-2300; New York; 1980.
- [10] **Deckmann, S. & Pizzolante, A. & Monticelli, A. & Sttot, B. & Alsaç, O.**; *Numerical Testing of Power System Load Flow Equivalents*; IEEE Trans. Power App. Syst.; PAS-99; pp 2292-2300; New York; 1980.
- [11] **Shoultz, R. & Bierk, W.**; *Buffer System Analysis Selection of a Steady State External Equivalent Model for Real-Time Power Using an Automated Sensitivity Analysis Procedure*; IEEE Trans. Power Syst.; pp 1104-1110; New York; 1988.

- [12] **Tavares, P.**; *Equivalente Estático Reduzido. Uma Revisão Crítica do Modelo Ward Estendido.*; Tese de Mestrado; Faculdade de Engenharia Elétrica; UNICAMP; setembro; 1987.
- [13] **Tavares, P. & Deckmann, S.**; *The One-Step Extended Ward Equivalent For On-Line Static Security Analysis*; SC - 39 CIGRE meeting, Tokyo, october, 1987.
- [14] **Deckmann, S.**; *Equivalentes Estáticos para Sistemas de Energia Elétrica*; Tese de Doutorado; Faculdade de Engenharia Elétrica; UNICAMP.
- [15] **Pizzolante, A. C.**; *Representação de Partes Parcialmente Observáveis de Sistemas de Energia Elétrica*; Tese de Mestrado; Faculdade de Engenharia Elétrica; UNICAMP.
- [16] **Tinney, W. F. & Brandwajn, V. & Chan S. M.**; *Sparse Vector Method*; IEEE Trans. Power Syst.; vol PAS-104; pp 295-301; february; 1985.
- [17] **Tinney, W. F. & Bright, J. M.**; *Adaptative Reduction for Power Flow Equivalents*; IEEE Trans Power Sist.; PWRS-2; pp 351-360; may; 1987.
- [18] **Nara, K. & Tanaka, K. & Kodama, H. & Shoults, R. R. & Chen, M.S. & Van Olinda, P. & Bertagnolli, D.**; *On-line Contingency Selection for Voltage Security Analysis*; IEEE Trans. Power. App. Syst; PAS-104; pp 847-856; April; 1985
- [19] **Tinney, W. F. & Bright, J. M. & Demaree, K. D. & Hugues B. A.**; *Some Deficiencies in Optimal Power Flow*; IEEE Trans. Power Syst Vol 3; pp 676-683; may; 1988.
- [20] **Monticelli, A. J. & Deckmann S. & Garcia A. & Sttot B.**; *Real time External Equivalents for Static Security Analysis.*; IEEE Tans. Power App. Syst.; PAS-98; March/April; 1979.
- [21] **R. A. M. Van Amerongen & H. P. Van Meeteren**; *A Generalised Ward Equivalent for Security Analysis*; IEEE Trans. Power Syst.; PAS-101; pp 1519-1525; june; 1982.
- [22] **Kenneth I. Geisler & Anjan Bose** *State Estimation Based External Network Solution for On-line Security Analysis*; IEEE Trans on Power Syst.; PAS-102; pp 2447-2454; august; 1983.
- [23] **Anjan Bose**; *Modeling of External Networks for On-line Security Analysis*; IEEE Trans on Power Syst.; PAS-103; pp 2117-2125; august 1984.
- [24] **Kenneth I. Geisler & Nand K. Tripathi** *State Estimation Based External Network Solution: Field Testing*; IEEE Trans on Power Syst.; PAS-104; pp 2126-2132; august; 1985.
- [25] **A. Monticelli & Felix F. Wu**; *A Method that Combines Internal State Estimation and External Network Modelling*; IEEE Trans Power Syst.; PAS-104; january; 1985.

- [26] **Anjan Bose**; *The Effects of External Modeling Errors on On-line Security Analysis*; IEEE Trans. Power Syst.; PWRS-1; February; 1986.
- [27] **C. N. Lu & K. C. Liu & S. Vemuri**; *An External Network Modeling Approach for On-line Security Analysis*; IEEE Trans. Power Syst.; may; 1990.
- [28] **Stott, B. & Alsac, O.**; *Fast Decoupled Load Flow*; IEEE Trans. Power App. Syst.; PAS-73; pp 859-869; may/june; 1974.

## Apêndice a

# Sistema para Estudos de Modelos Equivalentes

Neste ítem procurou-se detalhar a estruturação do programa de equivalenciamento utilizado para a obtenção dos resultados conforme mostrado no capítulo 4. Esta estrutura está mostrada na figura a.1 e cada bloco numerado da figura é explicado em mais detalhe nos ítems a seguir:

- 1 - Dados do sistema a ser testado (SYS1) sem nenhuma alteração e dividido nos subsistemas interno, fronteira e externo.
- 2 - Montagem do modelo **W.E** a partir da topologia do sistema externo. O cálculo deste modelo é explicado mais detalhadamente no apêndice 2.
- 3 - Acoplamento do modelo **W.E** calculado em 2 com o sistema interno alterado conforme ítem 14 e a fronteira para formar o sistema SYS3.
- 4 - São calculadas as injeções equivalentes na fronteira necessárias ao ajuste do sistema SYS3 (dado no ítem anterior) para o caso básico dado no bloco 19. Inserindo-se as injeções equivalentes ao sistema SYS3 obtem o sistema SYS5 representando:

$$\text{SYS5} = \text{sistema interno} / \text{fronteira} / \text{modelo equivalente W.E.}$$

- 5 - Cálculo do fluxo de carga para o sistema SYS5.
- 6 - Obtenção do estado do sistema SYS5: sistema alterado e com as partes externas representadas pelo modelo **W.E.**.
- 7 - São calculados os erros percentuais para o modelo **W.E** comparando-se os estados obtidos em 6 e 16 (comparação entre as respostas dos modelos com e sem equivalenciamento).

- **8** - Montagem do modelo **WRINT** a partir da topologia do sistema externo. O cálculo deste modelo é explicado mais detalhadamente no apêndice 3 onde é mostrado como adaptar o **W.E** para o cálculo do **WRINT**.
- **9** - Acoplamento do modelo **WRINT** calculado em **8** com o sistema interno alterado conforme item **14** e a fronteira para formar o sistema **SYS4**.
- **10** - São calculadas as injeções equivalentes na fronteira necessárias ao ajuste do sistema **SYS4** (dado no item anterior) para o caso básico dado no bloco **19**. Inserindo-se as injeções equivalentes ao sistema **SYS4** obtém-se o sistema **SYS6** representando:

$$\text{SYS6} = \text{sistema interno} / \text{fronteira} / \text{modelo equivalente WRINT}$$

- **11** - Cálculo do fluxo de carga para o sistema **SYS6**.
- **12** - Obtenção do estado do sistema (**SYS6**): sistema alterado e com as partes externas representadas pelo modelo **WRINT**.
- **13** - São calculados os erros percentuais para o modelo **WRINT** comparando-se os estados obtidos em **12** e **16** (comparação entre as respostas dos modelos com e sem equivalenciamento).
- **14** - Simulação de alteração (que se deseja estudar) no sistema interno. Formação do sistema sem equivalenciamento **SYS2**, dado por:

$$\text{SYS2} = \text{sistema interno alterado} / \text{fronteira} / \text{sistema externo completo (sem equivalenciamento)}$$

- **15** - Cálculo de fluxo de carga do sistema **SYS2**.
- **16** - Obtenção do estado alterado conforme **14** para o sistema completo (não equivalenciado) **SYS2**.
- **17** - Comparação entre os modelos baseando-se nos erros percentuais calculados em **7** e **13** respectivamente para os modelos **W.E.** e **WRINT**.
- **18** - Cálculo de fluxo de carga do sistema completo e sem alterações **SYS1** dado por:

$$\text{SYS1} = \text{sistema interno sem alteração} / \text{fronteira} / \text{sistema externo completo (sem equivalenciamento)}$$

- **19** - Obtenção do estado básico para o sistema a partir do fluxo de carga obtido no item **18**.

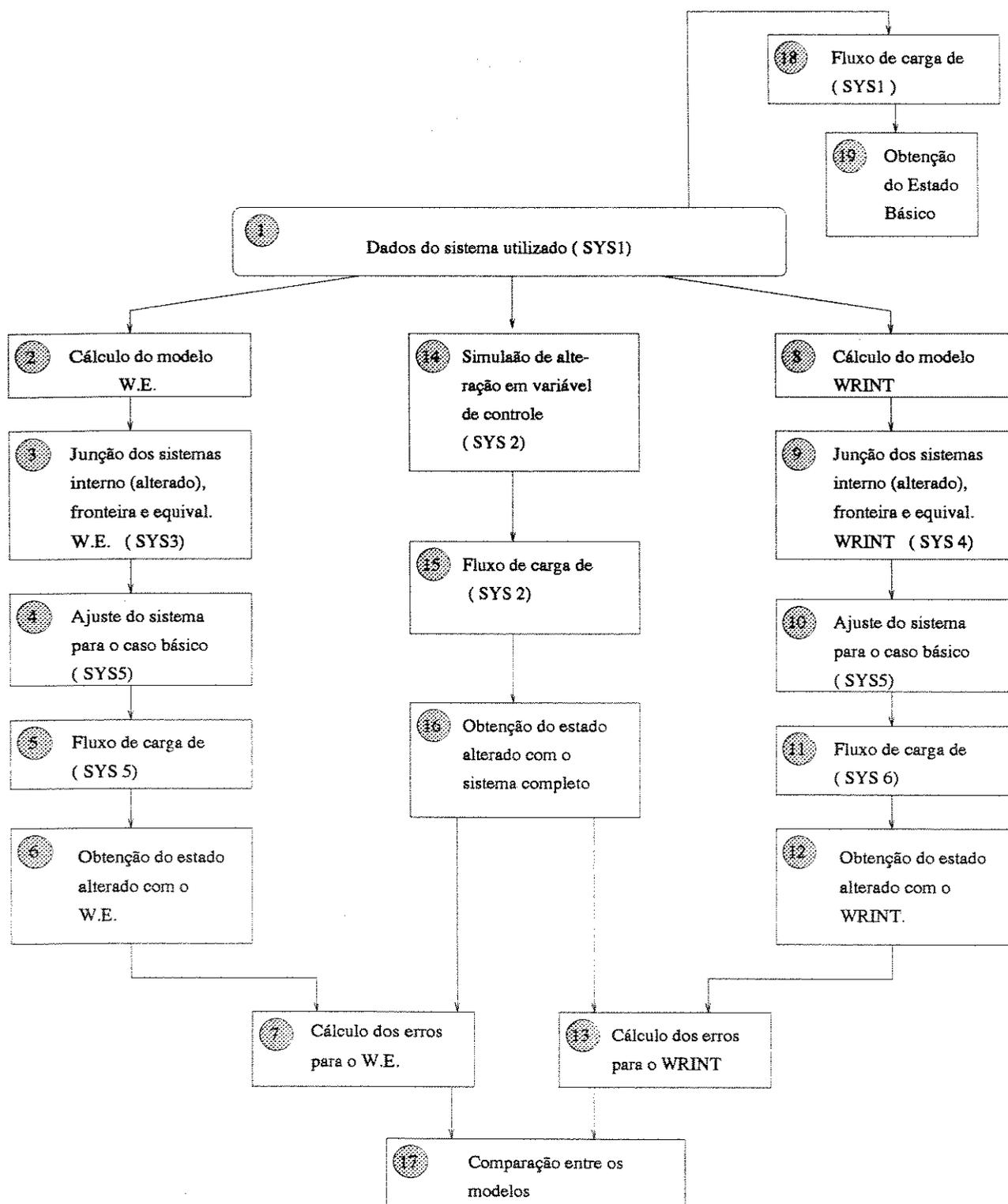


Figura a.1: Estrutura do programa de equivalentes utilizado na obtenção dos resultados

## Apêndice b

# Implementação do Modelo Ward-Estendido

Conforme já mencionado no capítulo 2, o modelo **W.E.** compreende basicamente dois processos de eliminação gaussiana: para as partes ativa e reativa. O modelo é composto de :

- ramos equivalentes: calculados na parte ativa, são conectados entre as barras de fronteira.
- admitâncias fictícias: calculadas na parte reativa, sendo conectadas às barras PQ's de fronteira para representação do efeito reativo das PV's externas.
- injeções equivalentes: calculadas no processo de "boundary matching" (ajuste às condições do caso básico).

As etapas de cálculo do modelo **W.E.** conforme acima estão mostradas no diagrama de blocos da figura b.1, sendo que cada bloco numerado é explicado mais detalhadamente a seguir.

- **1** - Dados do sistema externo a ser equivalenciado. Os modelos **W.E.** e **WRINT** usam informações apenas da topologia do sistema externo.
- **2** - Formação da matriz admitância  $Y$  para a parte ativa. Conforme mencionado no capítulo 2, nesta formação não aparece nenhum elemento shunt. Na implementação utilizada nos testes utilizaram-se processos de armazenamento compacto (conforme referência [4], onde apenas os elementos não nulos da matriz são armazenados, e pode-se explorar o fato de estas matrizes serem esparsas).

- **3** - Eliminação de gauss dos elementos externos da matriz  $Y$  formada em **2**. No esquema de tratamento da matriz utilizado [4], pressupõe-se que previamente à redução haja uma ordenação da matriz  $Y$  de forma a minimizar os elementos "fill-in" que aparecem no processo de redução.
- **4** - A partir da matriz eliminada dada em **3** é possível calcular os ramos equivalentes que aparecem na fronteira.
- **5** - Formação da matriz admitância  $Y'$  (também armazenada de forma compacta) para a parte reativa. Conforme mencionado no capítulo 2, nesta formação são considerados os elementos shunts externos e as barras PV's são aterradas (colocando-se valores "infinitos" de admitância na diagonal de  $Y'$ ).
- **6** - Eliminação de gauss dos elementos externos de  $Y'$  formada em **5**.
- **7** - São calculadas as admitâncias fictícias na fronteira a partir da matriz  $Y'$  eliminada.
- **8** - É criado o sistema formado por:

sistema equivalenciado = sistema interno / fronteira / equivalente W.E.

- **9** - Rodadndo-se o fluxo de carga do sistema formado em **8** calculam-se as injeções equivalentes que ajustam o sistema externo ao caso básico (casamento de fronteira).

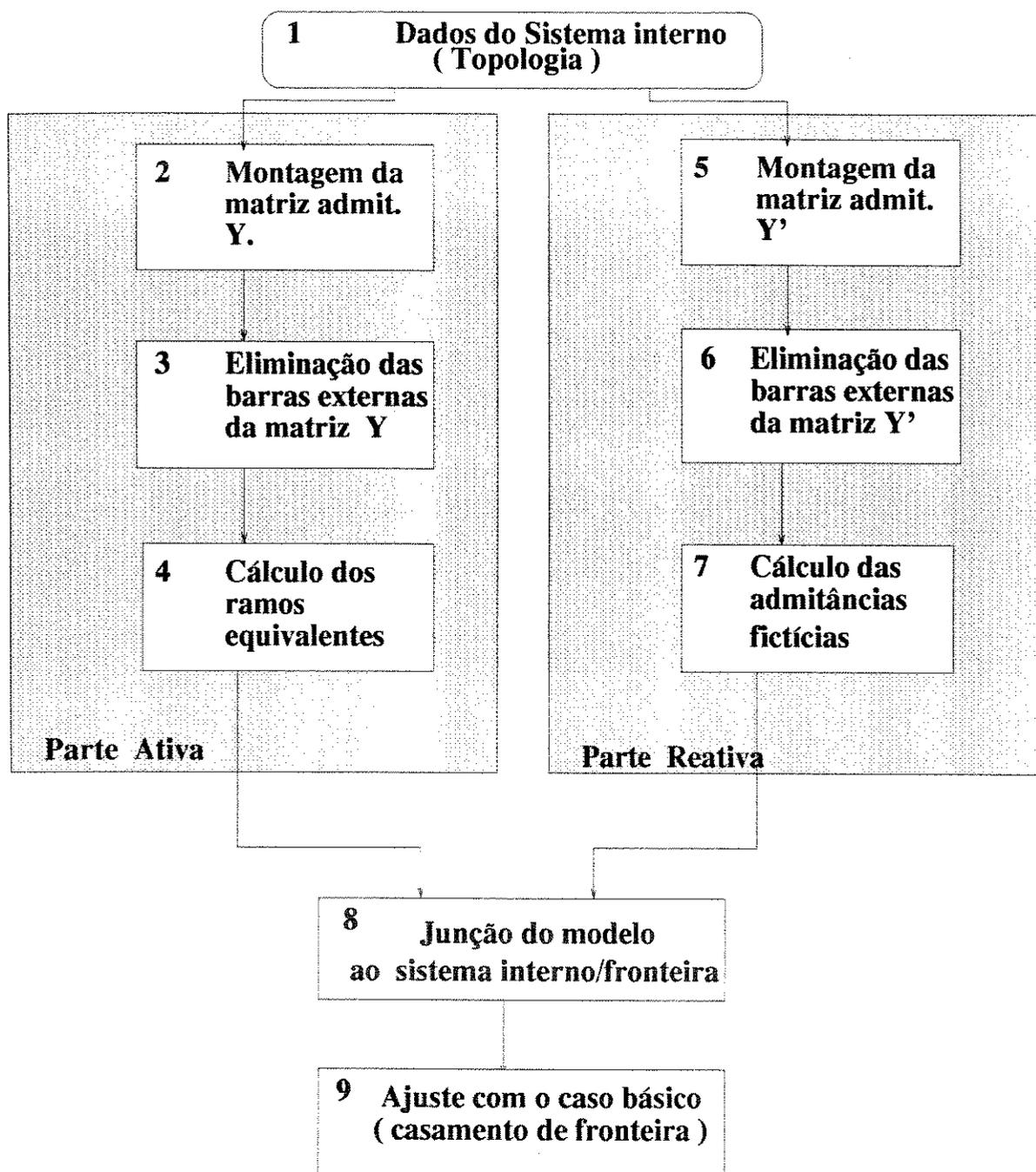


Figura b.1: Obtenção do modelo W.E.

## Apêndice c

# Implementação do Modelo Ward Reativo Interno

O modelo **WRINT** consiste basicamente em uma extensão do efeito reativo das admitâncias fictícias do modelo **W.E.** para a parte interna do sistema. Como o **W.E.**, compreende as partes ativa e reativa de resolução. A parte ativa do modelo **WRINT** é feita de forma idêntica ao modelo **W.E.**, não necessitando portanto de adaptação.

Para a parte reativa, seguindo-se o algoritmo de solução dado no capítulo 3 é necessário primeiramente montar a matriz admitância. Esta matriz deve ser formada respeitando-se o particionamento definido no seção 3.3.3. As barras externas de controle de tensão devem ser aterradas. Isto pode ser feito computacionalmente colocando-se valores de admitâncias "infinitos" (valores bastante elevados) nas diagonais correspondentes a estas barras.

Os shunts externos devem ser incluídos na formação dos elementos da parte externa da matriz. Na parte interno/fronteira da partição da matriz não devem ser levados em conta os elementos shunts. A inclusão de shunts internos na formação da matriz faria com que tais elementos fossem duplamente considerados. A formação da matriz corresponde ao bloco 2 da figura c.3.

A seguir devem ser eliminados da matriz  $Y$ , montada conforme mencionado acima, os elementos correspondentes às barras externas. Este processo corresponde ao bloco 3 da figura c.3.

A matriz reduzida resultante é mostrada na figura c.1 possui informações a respeito dos valores das admitâncias fictícias. Para uma dada barra de carga  $k$  de fronteira desta matriz, a admitância fictícia pode ser calculada pela equação c.1.

$$Y_{diag} + Y_{foradiag} = Y_{fic} \quad (c.1)$$

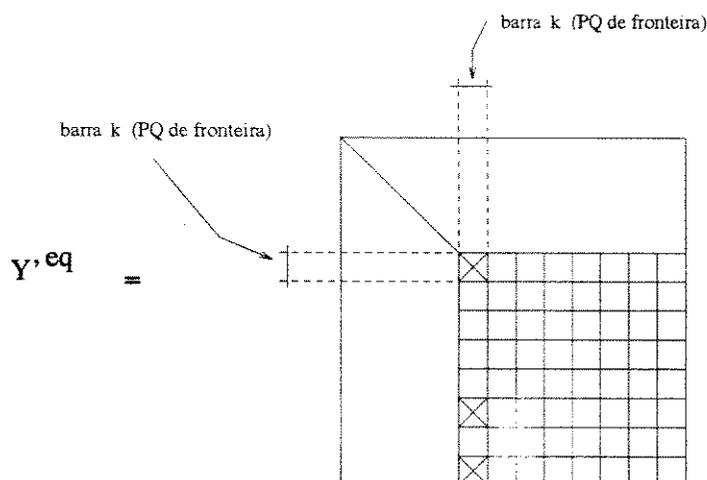


Figura c.1: Coluna  $k$  da matriz  $Y_R^{eq}$

Estes valores de admitância fictícia calculados são os mesmos do modelo **W.E** e estão mostrados no bloco 4 da figura c.3. Sendo assim, os blocos 2, 3, e 4 correspondem exatamente à parte reativa de cálculo do modelo **W.E**, conforme é destacado na figura.

Para que as admitâncias fictícias internas das barras de resposta possam ser calculadas é necessário que sejam eliminadas as barras do sistema interno/fronteira previamente especificadas. Antes porém, e a fim de tornar o modelo mais flexível, pode-se "quebrar" as admitâncias de fronteira em duas frações, conforme mostrado na equação c.2. Este procedimento está mostrado na figura c.2.

$$Y_{fic} = (1 - \alpha) * Y_{fic} + \alpha * Y_{fic} \quad (c.2)$$

onde:

- $\alpha - 0 < \alpha \leq 1; \alpha \in R$
- $Y_{fic}$  - admitância fictícia do modelo **W.E**.

Pretende-se com este procedimento que uma certa fração da admitância  $(1 - \alpha)$  seja desprezada, e a fração complementar seja incluída no processo subsequente de elimi-

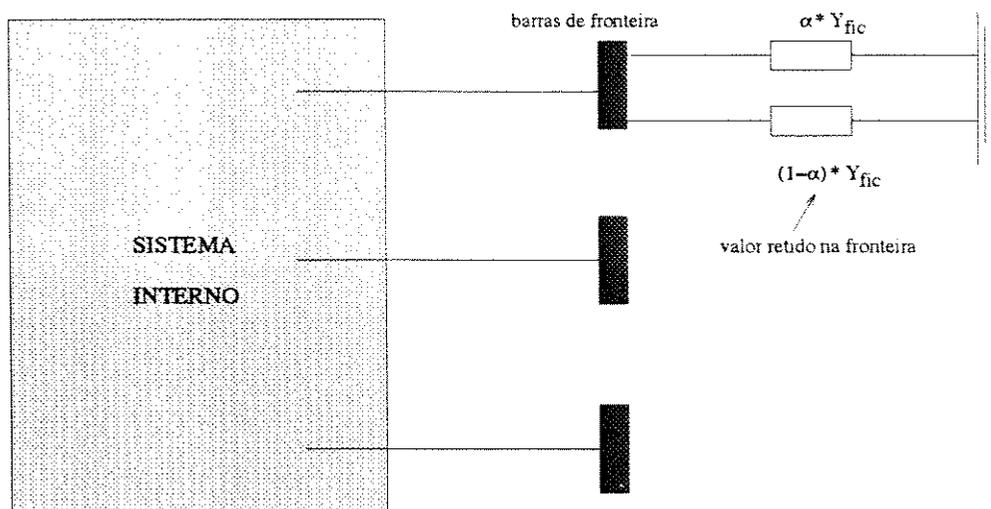


Figura c.2: Divisão das admitâncias fictícias

nação das barras de fronteira. Para tal, é necessário que a matriz  $Y_{eq}$  seja alterada em sua diagonal para que reflita uma admitância cujo valor seja  $\alpha * Y_{fic}$  (valor retido na fronteira).

É possível encontrar o valor  $Y^+$  que deve ser somado à diagonal, a fim de que isso ocorra. Seja uma determinada coluna  $k$  da matriz reduzida  $Y_{eq}$  correspondente a uma barra de carga de fronteira como mostrado na figura c.1. Sabe-se das propriedades de redução de circuitos que:

$$Y_{diag} + Y_{foradiag} = Y_{fic} \quad (c.3)$$

Somando-se  $Y^+$  teremos:

$$Y_{diag} + Y^+ + Y_{foradiag} = \alpha * Y_{fic} \quad (c.4)$$

c.3 em c.4 temos:

$$Y^+ + Y_{fic} = \alpha * Y_{fic}$$

$$Y^+ = (\alpha - 1) * Y_{fic} \quad (c.5)$$

Somando-se o valor calculado em c.5 nas diagonais das barras de carga, estas barras terão admitâncias fictícias de valor  $\alpha * Y_{fic}$ . Esta correção nas diagonais da matriz admitância  $Y_{eq}$  corresponde ao bloco 5 da figura c.3.

Com a matriz  $Y_{eq}$  corrigida são eliminadas as barras especificadas do sistema interno/fronteira, obtendo-se a matriz  $Y'_{eq}$ . Este processo é mostrado no bloco 6 da figura c.3.

Analisando-se as colunas correspondentes às barras de carga internas pode-se reinterpretar os elementos da matriz  $Y'_{eq}$  como elementos de rede e determinar as admitâncias fictícias internas para as barras de resposta do sistema interno. Estas admitâncias são funções do valor  $\alpha$  adotado no modelo e seu cálculo é mostrado no bloco 7 da figura c.3.

Partindo-se do modelo **W.E.**, o modelo **WRINT** pode ser adaptado facilmente conforme mostra a figura c.3, bastando que sejam implementados os blocos 5, 6, e 7 descritos nesta figura.

Percebe-se que o custo computacional adicional em relação ao modelo **W.E** é pequeno visto que, com mais algumas poucas eliminações adicionais na matriz admitância (comparando-se com o número de eliminações do **W.E.**), pode-se calcular as admitâncias fictícias internas.

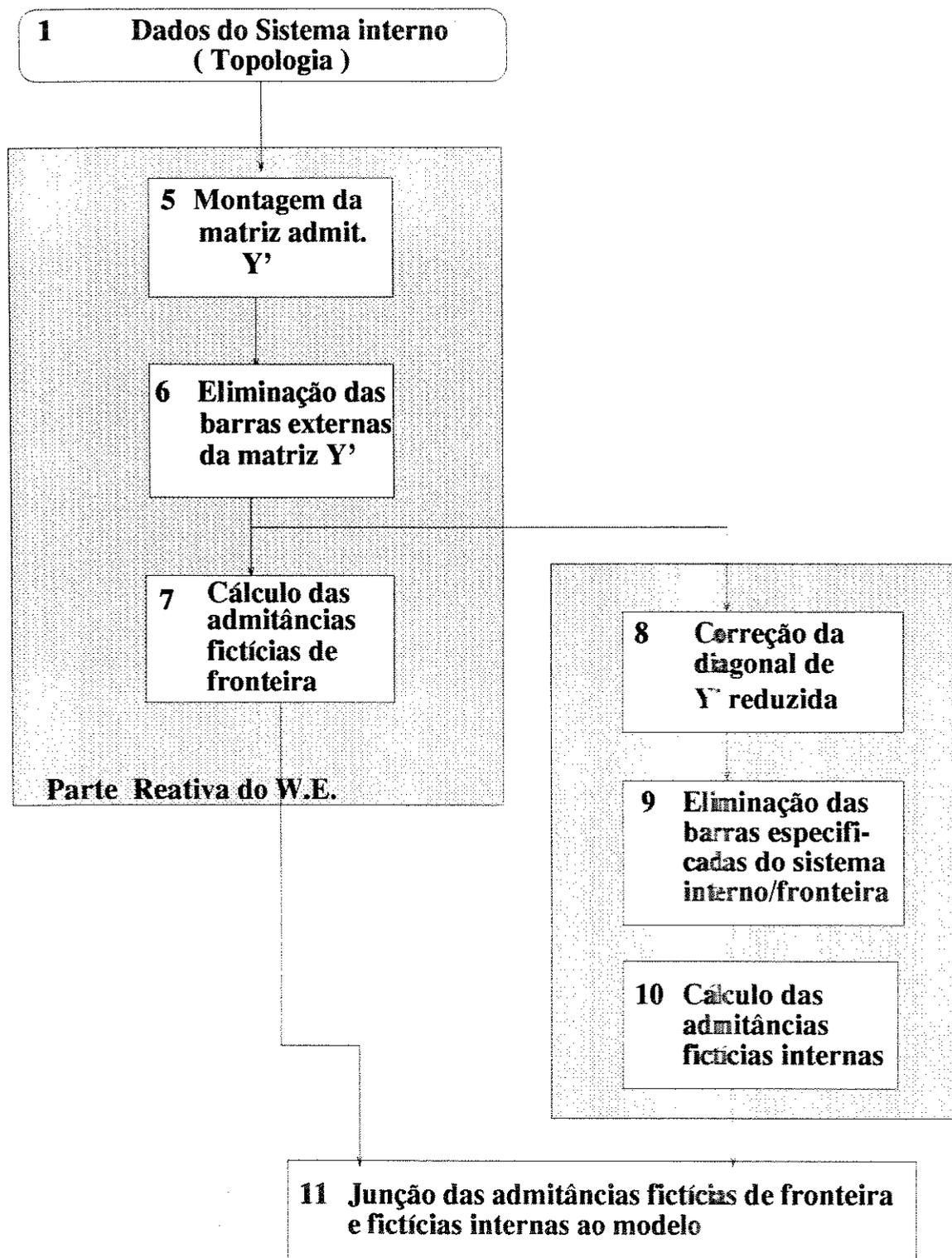


Figura c.3: Adaptação do modelo W.E. ao cálculo do modelo WRINT

# Apêndice d

## Sistema Teste

O sistema IEEE30 utilizado na validação e comparação dos modelos W.E. e WRINT é mostrado na figura d.1 com os subsistemas interno fronteira e externo que o compõem. Os dados mais importantes do sistema estão mostrados na tabela d.1.

Dados de barra do sistema IEEE30

Quantidade	Sistema Externo	Fronteira	Sistema Interno
Barras totais	18	5	7
Barras de tensão controlada	2	1	2

Dados de carga/geração do IEEE30

	Externa	Total
Geração (MW)	0	280

Carga externa	87.8 (MW)
---------------	-----------

Dados das linhas do IEEE30

	Tie-lines	total
Número de linhas de transmissão	5	42

Tabela d.1: Dados do sistema IEEE30

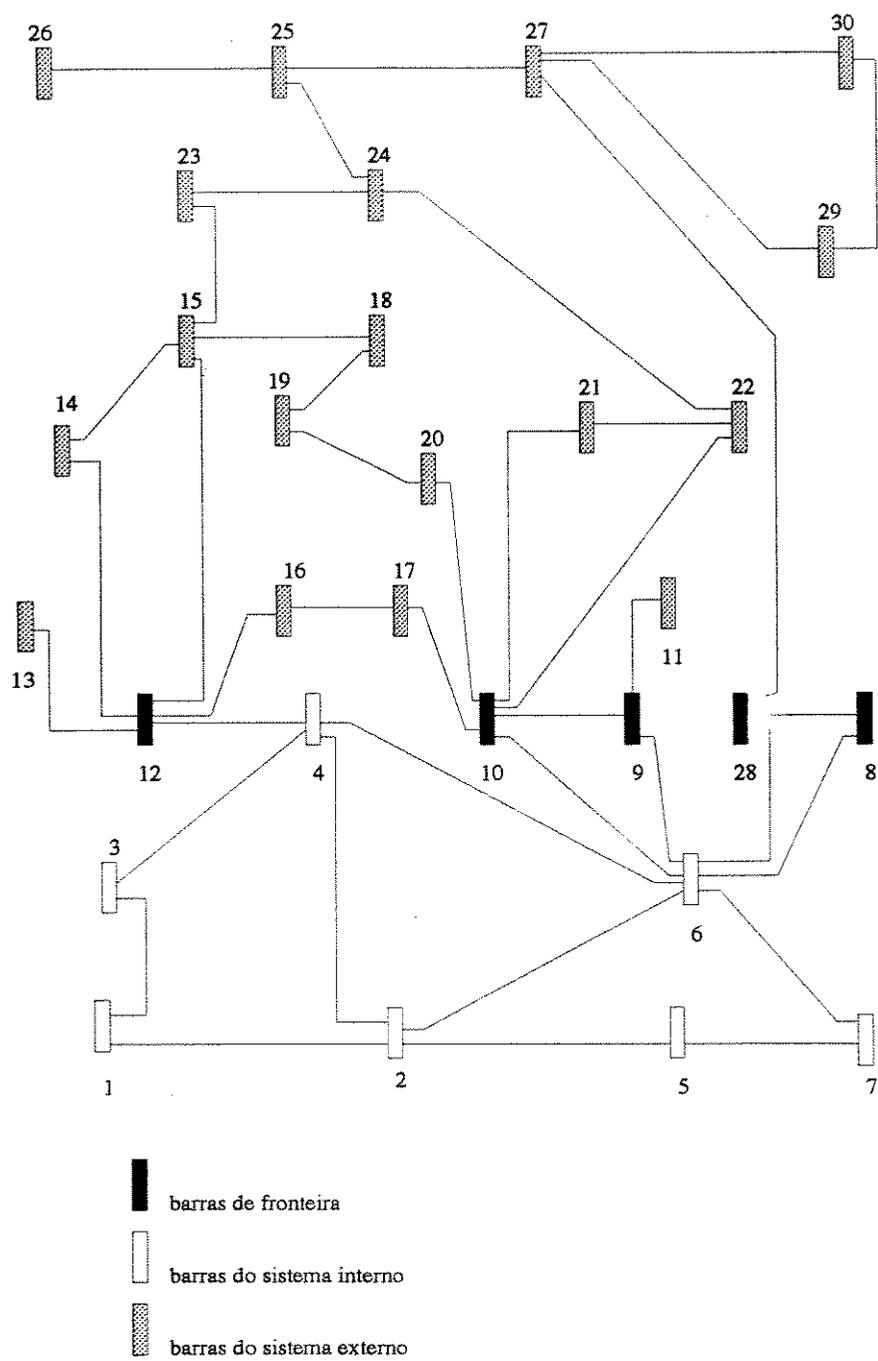


Figura d.1: Sistema IEEE30